

De druppel die de emmer deed overlopen?

De rol van aerosol bij verspreiding SARS-CoV-2

*Red Team, o.l.v. Peter Slagter¹ en Bert Slagter¹
Met medewerking van Mariette Knaap en Jos Lelieveld^{2,3}
27 oktober 2020*

¹ Lid van [Red Team Nederland](#)

² Max Planck Institute for Chemistry, Hahn-Meitner-Weg 1, 55128, Mainz, Germany

³ Begeleidende positie

Op vrijdag 18 september verscheen op de website van de *US Centers for Disease Control and Prevention* een opvallende wijziging over de manier waarop SARS-CoV-2, het virus dat de ziekte Covid-19 veroorzaakt, zich door de samenleving verspreidt¹:

“Covid-19 kan verspreid worden via respiratoire druppels of kleine deeltjes, zoals die in aerosolen, die geproduceerd worden wanneer een besmet persoon hoest, niest, zingt, praat, of ademt. Deze deeltjes kunnen worden ingeademd in de neus, mond, luchtwegen en longen, en daar een infectie veroorzaken. **We denken dat dit de voornaamste manier is waarop het virus zich verspreidt.**”

“Er is groeiend bewijs dat druppels en zwevende deeltjes in de lucht kunnen blijven hangen en door anderen kunnen worden ingeademd en afstanden groter dan anderhalve meter kunnen afleggen (bijvoorbeeld gedurende de repetitie van een koor, in restaurants of in fitnessscholen). Binnenruimtes zonder goede ventilatie dragen een verhoogd risico.”

Aerosol is de algemene benaming voor zwevende deeltjes die in de lucht te vinden zijn. Bovenstaande wijziging suggereerde dat transmissie via zwevende deeltjes of aerosolen de belangrijkste route is voor transmissie van SARS-CoV-2. Vanzelfsprekend deed dit stof opwaaien, niet in de minste plaats omdat het de prioritering van te nemen preventiemaatregelen sterk zou beïnvloeden, evenals de beschermende maatregelen die in ziekenhuis- en verpleegzorg worden genomen.

Op maandag 21 september werd de informatie over het belang van aerosolen weer van de website verwijderd. Volgens een woordvoerder van de CDC² ging het om een conceptversie

¹ Covid-19: CDC publishes then withdraws information on aerosol transmission ([bron](#))

² CDC Adds Then Retracts Aerosols as Main COVID-19 Mode of Transmission ([bron](#))

die per ongeluk online was gezet. Op dinsdag 5 oktober verscheen de definitieve versie online waarin de CDC bevestigt dat het coronavirus zich door de lucht kan verspreiden.³

De definitieve aanbevelingen van de CDC wijken af van de conceptversie in die zin dat de nadruk op aerosolen als route voor verspreiding is verdwenen. De route an sich wordt erkend, maar de bij de CDC “beschikbare data wijst erop dat het veel gebruikelijker is dat Covid-19 zich via nauw [direct] contact verspreid dan via de lucht”.

Het nieuw inzicht van het ‘Amerikaanse RIVM’ nodigt uit tot een review van de stand van zaken rond aerosolen. Dat belang wordt verder versterkt door reacties van deskundigen op het gebied van aerosolen en virustransmissie, zoals professor Linsey Marr (Virginia Polytechnic Institute and State University). Zij gaat een stuk verder dan wat de CDC op dit moment aanneemt: “Ik denk dat aerosolen erg belangrijk zijn. Belangrijk genoeg dat ze in het centrum geplaatst zouden moeten worden van maatregelen rond de volksgezondheid. Ik hoop dat het terugkomt op een manier waarop het belang van aerosolen wordt erkent.”⁴

Van insignificant naar ‘smoking gun’

Centraal in de ontstane consternatie staat het idee dat *inhalatie* de voornaamste manier is waarop het virus zich verspreidt. Inhalatie staat voor het inademen van dampen, of lucht met aerosolen, dat in deze context ter discussie staat.

Eerst is het tijd om tot enkele definities te komen. Het Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu (RIVM) stelt dat aerosol bestaat uit een wolk van grote druppels ($> 5\text{-}10\ \mu\text{m}$) en kleine fijne druppels en druppelkernen ($< 5\ \mu\text{m}$)⁵. De Wereldgezondheidsorganisatie (WHO) spreekt over respiratoire druppeltjes ($> 5\text{-}10\ \mu\text{m}$) en druppelkernen ($< 5\ \mu\text{m}$). Voorts stelt de WHO dat enkel druppelkernen in de categorie aerosol vallen. Respiratoire druppeltjes vallen volgens het agentschap in de categorie druppeltransmissie, waarvan de besmettelijkheid als bewezen wordt gezien. Of transmissie via aerosolen kan plaatsvinden, is volgens het agentschap nog niet bewezen, maar ook niet uitgesloten: “er zijn snel meer studies nodig om de significantie van aerosolen te beoordelen”⁶.

Sinds april 2020 wijzen critici de WHO met enige regelmaat op verspreiding van het virus door de lucht, onder wie hoogleraar binnenmilieu Philo Bluysen (TU Delft). Bluysen is ook één van de 239 wetenschappers die middels een brief in het vakblad *Clinical Infectious Disease*

³ How COVID-19 Spreads ([bron](#))

⁴ Advice on Airborne Virus Transmission Vanishes From C.D.C. Website ([bron](#))

⁵ Aerogene verspreiding SARS-CoV-2 en ventilatiesystemen (onderbouwning) ([bron](#))

⁶ Q&A: How is COVID-19 transmitted? ([bron](#))

om aandacht vroegen voor het belang van ventilatie.⁷ “We kregen keer op keer nul op het rekest”, zegt Bluysen. “Verspreiding door de lucht moest eerst bewezen worden. Terwijl wij zeggen: er zijn allerlei aanwijzingen dat transmissie via de lucht een rol speelt, neem nu eens het zekere voor het onzekere.”⁸

Bluysen werkte meer dan twintig jaar bij TNO aan kennisontwikkeling over het binnenmilieu van gebouwen.⁹ Een belangrijk onderdeel daarvan is de ontwikkeling van klachten en ziekte. Bluysen en haar vakgenoten nemen in hun experimenten waar dat mensen bij het praten, zingen en ademen een mist van kleine druppeltjes uitstoten. Volgens hen kan dat leiden tot verspreiding door de lucht – aerogene verspreiding – met in het bijzonder in bedompte ruimtes, zoals restaurants, kerken en kantoren.

Deze stellingname wordt versterkt door het bestaan van zogeheten *superspreading events*. Het eerste signaal daarvan verscheen al op 19 februari. Toen werd een voetbalwedstrijd tussen het Italiaanse Bergamo en Valencia gespeeld. Die wedstrijd staat nu bekend als ‘biologische bom’ en de stad Bergamo werd het epicentrum van de Italiaanse uitbraak.¹⁰ Sindsdien zijn er vele voorbeelden langsgekomen van dergelijke explosieve uitbraken, in restaurants, tijdens koorrepetities, kerkdiensten en in cafés. Een recent voorbeeld komt uit Hongkong¹¹. Uit een analyse van ruim duizend ziektegevallen ontdekten de Hongkongers “een monnik die waarschijnlijk elf tempelgangers heeft aangestoken, een huwelijksfeest waar zeventien mensen ziek werden en een uitbraak waarbij een groep muzikanten in vier bars in totaal ruim honderd bezoekers besmetten,”¹² schrijft de Volkskrant. “Vooral in de tempel en de bars lijkt het virus zich via ademwolken te hebben verspreid.” Dat omstandigheden een belangrijke rol lijken te spelen, blijkt uit diverse papers omtrent dit fenomeen. Zo kwamen Chinese onderzoekers erachter dat van de 318 uitbraken tussen 4 januari 2020 en 11 februari 2020 slechts één in de buitenlucht plaatsvond.¹³

De laatste maanden zijn de meeste rijksinstituten en gezondheidskoepels overstag gegaan: het risico op verspreiding door de lucht wordt erkend. Na de WHO¹⁴, de ECDC¹⁵, en het RIVM¹⁶ erkent nu ook de CDC het risico. Wat opvalt is de terughoudendheid: lang werd transmissie

⁷ It Is Time to Address Airborne Transmission of Coronavirus Disease 2019 (COVID-19) ([bron](#))

⁸ ‘Luchtoorlog’ om corona: ruim 200 wetenschappers vragen in brief aandacht voor ventilatie ([bron](#))

⁹ TUDelft - Prof.dr.ir. P.M. Bluysen ([bron](#))

¹⁰ ‘A biological bomb’: The story of the Champions League game which sparked Italy’s coronavirus crisis ([bron](#))

¹¹ Clustering and superspreading potential of SARS-CoV-2 infections in Hong Kong ([bron](#))

¹² Ook het RIVM van Amerika erkent: corona verspreidt zich soms door de lucht ([bron](#))

¹³ Indoor transmission of SARS-CoV-2 ([bron](#))

¹⁴ Coronavirus: WHO rethinking how Covid-19 spreads in air ([bron](#))

¹⁵ EU health body considering airborne spread of virus as well as droplets ([bron](#))

¹⁶ Aerogene verspreiding SARS-CoV-2 en ventilatiesystemen (onderbouwing) ([bron](#))

via de lucht enkel als theoretische route gezien, onder andere omdat niet bewezen was dat 'zwevend virus' het vermogen heeft tot schadelijke werking – virulentie. Hoogleraar microbiologie John Lednicky van de Universiteit van Florida zette daar een streep doorheen. Hij bewees samen met zijn team dat er rond een patiënt wel degelijk besmettelijke virusdeeltjes rondwarrelen.¹⁷ In de media werd dit bewijs neergezet als 'smoking gun'.¹⁸

Desondanks lijken de uitgangspunten die ten grondslag liggen aan preventieve maatregelen onveranderd. Dat blijkt uit het feit dat ventilatie en mondneusmaskers nog niet zijn opgenomen in de door de overheid gestelde basisregels¹⁹. Ook stelt het RIVM nog "dat op basis van de huidige inzichten onduidelijk is of aerogene transmissie een rol speelt in de verspreiding van SARS-CoV-2"²⁰. Eind augustus verscheen een extra nota gericht op ventilatie, niet zozeer omdat het RIVM daarvan het belang wilde strepen, maar omdat het ministerie van VWS daar om vroeg. Daarin wordt dezelfde onduidelijkheid rond de rol van aerosolen benadrukt en aangestipt dat er geen aanvullende maatregelen worden genomen.²¹

Vermoedelijk zijn de onderliggende bezwaren gestoeld op overwegingen uit de medische wetenschap. Soms blijkt uit onderzoek dat verspreiding door de lucht niet de enige verklaring hoeft te zijn voor een explosieve uitbarsting van besmettingen. Een veelvuldig aangehaald voorbeeld is dat van een vol restaurant in het Chinese Guangzhou²², waar een vrouw met corona negen andere besmette, van wie vijf aan andere tafels. Dat kan door de lucht zijn gegaan, maar ook via andere routes: de restaurantbezoekers betastten dezelfde deuren en voorwerpen en dus is besmetting via fomieten niet uitgesloten, ook al is de rol van die transmissieroute niet onbesproken²³. Voorts staan er nog relevante vraagstukken open. Hoeveel virusdeeltjes zitten er in kleine druppeltjes? Zijn die altijd besmettelijk? Hoeveel van die druppeltjes moeten worden ingeademd om te worden besmet? Is iedereen daar vatbaar voor? In welke omstandigheden?

De status quo is dat aerogene verspreiding het met de stempel 'insignificant' moet doen, met als – twijfelachtige – gevolg dat voorzorgsmaatregelen niet of beperkt worden getroffen. Is dat terecht? Voordat we recente ontwikkelingen aankaarten, duiken we eerst in een belangrijke aanname die ten grondslag ligt aan het Nederlandse – en internationale – beleid: de definitie van aerosol.

¹⁷ Viable SARS-CoV-2 in the air of a hospital room with COVID-19 patients ([bron](#))

¹⁸ 'A Smoking Gun': Infectious Coronavirus Retrieved From Hospital Air ([bron](#))

¹⁹ De Nederlandse maatregelen: basisregels voor iedereen ([bron](#))

²⁰ Aerogene verspreiding SARS-CoV-2 en ventilatiesystemen (onderbouwing) ([bron](#))

²¹ Ventilatie en COVID-19 ([bron](#))

²² Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant ([bron](#))

²³ Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites ([bron](#))

Wat kan je inademen?

Inademing, ook wel inspiratie, is de beweging van lucht van buiten, via de luchtwegen, naar de longblaasjes. Voor mensen is dat een grotendeels autonoom proces, in de eerste plaats om het organisme in leven te houden door aanvoer van zuurstof en afvoer van afvalstoffen.

De huidige richtlijnen voor de preventie van de verspreiding van SARS-CoV-2 zijn gebaseerd op de aanname dat mens-op-mens-transmissie voornamelijk direct plaatsvindt binnen een afstand van anderhalve meter²⁴, via druppels die vrijkomen bij hoesten en niezen, of indirect via contact met besmette voorwerpen of oppervlakken. In de context van druppelinfectie gaat het volgens het RIVM om druppels die groter zijn dan 10 μm .²⁵ Het leidt tot de volgende categorisering:

Type transmissie	Naam	Grootte
Direct	Druppel	> 10 μm
Aerogeen	Respiratoire druppel	5-10 μm
Aerogeen	Druppelkern	< 5 μm

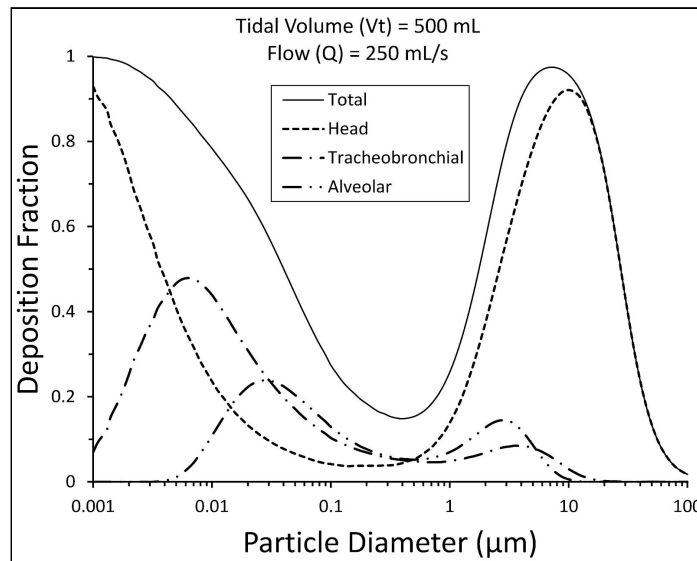
Aerogene verspreiding, transmissie via de lucht, is gebaseerd op de gedachte dat virusdeeltjes worden ingeademd via kleine, vaak onzichtbare, druppeltjes, die in de lucht zweven: aerosol. Een essentiële vraag is hoe het zit met de scheiding tussen directe transmissie en aerogene transmissie. En bestaat er consensus over de genoemde druppelgroottes?

Allereerst zoomen we in op de grootte van de zwevende deeltjes die ingeademd kunnen worden. Voor informatie die relevant is om die vraag te kunnen beantwoorden, moeten we het blikveld verbreden. De United States Environmental Protection Agency (EPA) heeft veel van het actuele onderzoek naar het neerslaan van ingeademde deeltjes in de luchtwegen op een rij gezet. Daaruit blijkt dat deeltjes **tot en met een grootte van 100 μm** ingeademd kunnen worden.²⁶

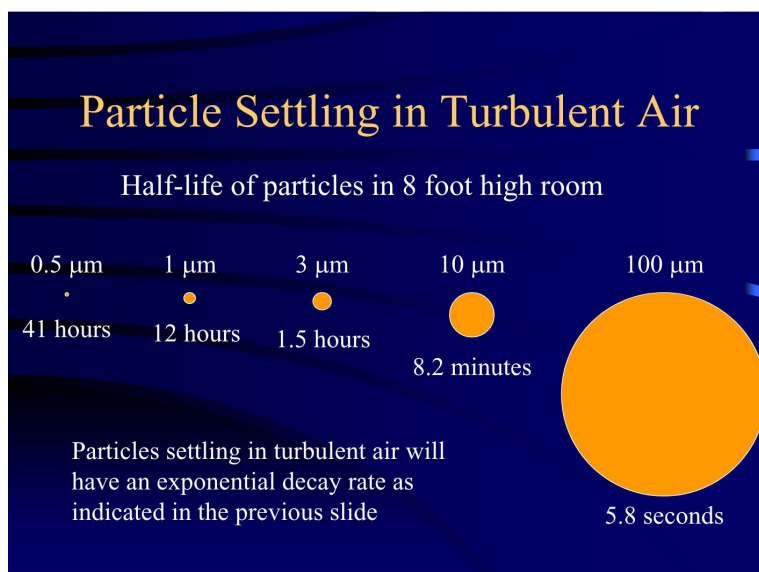
²⁴ Voor de exacte afstand van anderhalve meter is geen hard wetenschappelijk bewijs. Aan de maatregel 'afstand houden' wordt daarom op diverse manieren invulling gegeven, met afstanden variërend van 1 tot 2 meter. De keuze voor een afstand lijkt dus vooral op pragmatisme te zijn gebaseerd. ([bron](#))

²⁵ Aerogene verspreiding SARS-CoV-2 en ventilatiesystemen (onderbouwning) ([bron](#))

²⁶ Particle Pollution Exposure ([bron](#))



Ook volgens aerosolenspecialist professor Jose-Luis Jimenez (Universiteit van Colorado) ligt de grens op een diameter van 100 μm . Sterker, hij geeft aan dat “de 5 μm -grens een al lang bestaande fout is”.²⁷ Eind augustus is de grens van 100 μm bevestigd in een workshop georganiseerd door *The National Academies of Sciences, Engineering and Medicine* (NASEM)²⁸, waar specialisten uit een breed spectrum van de academische wereld bij aanwezig waren. Kijken we naar het verleden, zien we dat deze kennis al voorhanden is sinds 1934, toen **Wells** schreef over *airborne infections*²⁹. Een ander voorbeeld van erkenning van deze grens vinden we in een presentatie van wijlen Paul Baron, gerenommeerd aerosolenwetenschapper bij de Amerikaanse CDC.³⁰



²⁷ Tweet van professor Jose-Luis Jimenez ([bron](#))

²⁸ Airborne Transmission of SARS-CoV-2: A Virtual Workshop ([bron](#))

²⁹ On air-borne infection: Study II. Droplets and droplet nuclei ([bron](#))

³⁰ Generation and Behavior of Airborne Particles (Aerosols) ([bron](#))

Op 10 september 2020 kwam Dr. Anthony Fauci, onder andere bekend als prominente corona-adviseur van de regering-Trump, naar buiten met het bericht te erkennen dat de grens van 5-10 µm fout is: “De aerosolfysici die ons hebben benaderd, hebben ons nu verteld dat we het jarenlang echt bij het verkeerde eind hebben gehad en dat deeltjes groter dan 5 µm nog steeds veel langer in de lucht blijven dan we dachten.”³¹ De correcte verdeling van druppelgroottes ziet er volgens deze deskundigen en literatuur grofweg als volgt uit:

Transmissie	Grootte	Doelgebied ³²
Aerogeen	< 0,5 µm	Alveoli
Aerogeen	0,5-1 µm	Luchtpijp en bronchiën
Aerogeen	1-3 µm	Luchtpijp en bronchiën
Aerogeen	3-10 µm	Luchtpijp, mond- en neusholte
Aerogeen	10-100 µm	Mond- en neusholte
Direct	>100 µm	Mond, neus, huid, ogen, fomieten

De deeltjes betrokken bij aerogene transmissie worden *aerosolen* genoemd en de deeltjes betrokken bij directe transmissie *druppels*. Een druppel heeft, in tegenstelling tot aerosol, ballistische eigenschappen, dat wil zeggen dat de zwaartekracht erop van invloed is en het deeltje voldoende inert is om van richting te veranderen.³³ Niet alle druppels hebben die eigenschap; daarom spreken aerosolfysici van een ‘valley of death’ voor druppels met een diameter tussen de 100 en 300 µm. In een recente studie is nogmaals de splitsing tussen aerogene en directe transmissie vastgesteld: “Directe transmissie (via druppels) domineert als de druppels groter zijn dan 100 µm, op minder dan 0,2 meter bij praten en minder dan 0,5 meter bij hoesten. Directe transmissie (via druppels) draagt minder dan 10 procent bij aan de transmissie als de deeltjes kleiner zijn dan 50 µm en wanneer de mensen meer dan 0,3 meter van elkaar verwijderd zijn, zelfs bij hoesten.”³⁴

Nu hebben we een beeld bij de grootte van deeltjes die ingeademd kunnen worden en waar die deeltjes in het lichaam terecht kunnen komen. De vraag die zich nu aandient, draait om *wat* er ingeademd wordt. Daartoe komen we terug bij Wells, die in 1934 het lot van respiratoire

³¹ COVID-19: Public Health and Scientific Challenges (Harvard Medical School) ([bron](#))

³² Waar het deeltje terecht komt of kan komen.

³³ The dispersion of spherical droplets in source–sink flows and their relevance to the COVID-19 pandemic ([bron](#))

³⁴ Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact ([bron](#))

druppeltjes beschreef met de Wells-curve³⁵. Hij beschreef twee distincte uitkomsten: het druppeltje belandt op de grond (en wordt als zodanig onderdeel van de transmissieroute via fomieten) *of* het druppeltje verdampt en laat zijn droge inhoud achter in de lucht, een kwetsbare druppelkern, waarvan de besmettelijkheid van eventueel resterende virusdeeltjes onduidelijk is.

Wells beschrijft de relatie tussen de omvang van een druppel, de valtijd (over 2 meter, zonder verdamping) en de verdampingstijd (in stille lucht, bij een temperatuur van 22 graden celsius en een luchtvochtigheid van 50%) als volgt:

Diameter (μm)	Valtijd (s)	Verdampingstijd (s)
>1.000	0,65	-
200	1,5	5.2
120	3	3
100	6	1.3
50	25	0.31
25	100	0.08
12	400	0.02

Het is belangrijk om op te merken dat de door Wells genoemde val- en verdampingstijden gebaseerd zijn op enkele aannamen, te weten (1) een stilstaande lucht, (2) een temperatuur van 22 graden celsius en (3) een relatieve luchtvochtigheid van 50 procent. Er zijn gegronde aanwijzingen dat de door Wells genoemde tijden de realiteit **sterk onderschatten** bij verandering van die omgevingsvariabelen, oplopend tot een factor 100 tot 150.³⁶

“We found that for an ambient relative humidity of 50% the lifetime of the smallest droplets of our study with initial diameter of $10\mu\text{m}$ gets extended by a factor of more than 30 as compared to what is suggested by the classical picture of Wells, due to collective effects during droplet evaporation and the role of the respiratory humidity, while the larger droplets basically behave ballistically. With increasing ambient relative humidity the extension of the lifetimes of the small droplets further increases and goes up to 150 times for 90% relative humidity, implying more than two meters advection range of the respiratory droplets within one second. Smaller droplets live even longer

³⁵ *Wells curve* op Wikipedia (bezoekt op 7 oktober 2020, [bron](#)).

³⁶ Extended lifetime of respiratory droplets in a turbulent vapour puff and its implications on airborne disease transmission ([bron](#))

and travel further. Our results may explain why COVID-19 superspreading events can occur for large ambient relative humidity such as in cooled-down meat-processing plants or in pubs with poor ventilation.”

Hoe temperatuur, (absolute en relatieve) luchtvochtigheid en turbulentie het gedrag en de levensduur van een microdruppel precies beïnvloeden is onderwerp van onderzoek. Duidelijk is wel dat het factoren zijn die in deze context van invloed zijn op *virus survival*³⁷ en dat de omstandigheden voor het virus in herfst- en wintermaanden waarschijnlijk gunstiger zijn dan in de zomermaanden.³⁸

Op basis van deze informatie zijn vraagtekens te zetten bij de heersende onderbouwing rond de rol van aerosol en druppels bij de transmissie van Covid-19. Zo lijkt vast te staan dat de deeltjes die in de categorie aerosol vallen **tot 20 keer groter zijn** dan waar het RIVM vanuit gaat bij. Voorts lijkt vast te staan dat de deeltjes in deze categorie onder de juiste omstandigheden **tot 150 keer langer** in de lucht blijven zweven dan aangenomen wordt op basis van de curve van Wells. Dat kan ook betekenen dat er onder de noemer aerosol meer schuilgaat dan opgedroogde druppelkernen, te weten het zwevende en **nog niet opgedroogde aerosol** met een diameter van boven de 10 micron.

Mysterieuze grens

Een open vraag blijft waar de door het RIVM en andere op de medische wereld georiënteerde agentschappen gebruikte grens van 5 µm vandaan komt. Dat verdient wat toelichting en voor een mogelijke verklaring moeten we terug in de tijd.

Het idee dat een ziekte zich kan verspreiden via druppels komt van het werk van Carl Flügge (1899). Hij toonde aan dat bacteriën vanuit de mond in de buurt van proefpersonen terecht kwamen. De micro-organismen werden door hem verzameld op agarplaten.³⁹

Dr. Charles Chapin, Amerikaans pionier op het gebied van publieke gezondheidszorg, publiceerde in 1910 een richtinggevend boek⁴⁰ waarin hij 50 jaar aan verzameld bewijs op een rij heeft gezet rond de transmissie van diverse ziekten, via lucht, water, handen, voedsel, grond, en meer. Hij realiseerde zich dat luchtweginfecties zich het makkelijkst verspreiden als

³⁷ Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence ([bron](#))

³⁸ COVID-19: Effects of environmental conditions on the propagation of respiratory droplets ([bron](#))

³⁹ Die Verbreitung der Phthise durch staubförmiges Sputum und durch beim Husten verspritzte Tröpfchen ([bron](#))

⁴⁰ The Sources and Modes of Infection ([bron](#))

mensen dicht op elkaar leven en dat *social distancing* de kans op besmetting verlaagde. Dat was een empirisch vastgestelde en correcte observatie. Hier komt de afstandsregel vandaan die ook heden ten dage gehanteerd wordt en voor de bestrijding van diverse respiratoire infecties succesvol is toegepast.

Chapin vervolgt met een poging om uit te leggen *waarom* afstand houden – social distancing – een dempende werking heeft op de verspreiding. Hij geeft aan dat er twee opties zijn: een luchtweginfectie wordt *ofwel* overgedragen via (a) grote druppels (direct contact), *ofwel* via (b) kleinere aerosolen die in de lucht zweven.

Let wel dat in de tijd van Chapin nog weinig bekend was over het gedrag van aerosolen. Het zou nog enkele decennia duren totdat die allerkleinste druppeltjes tot in detail worden bestudeerd. In de periode van Chapin leefde de angst dat aerosolen enorme afstanden konden afleggen, zoals het oversteken van de oceaan tussen Europa en de Verenigde Staten. De miasmatheorie⁴¹ leefde nog sterk bij de bevolking, een etiologisch leerstuk dat de oorzaak van epidemieën zocht bij slechte lucht. Zo werd moeraslucht verantwoordelijk gehouden voor malaria.

Volgens Chapin moest het *of* (a) zijn, *of* (b). Hij kiest ervoor om (a), de grote druppels, aan te nemen als verklaring voor de transmissie van respiratoire infecties, onder andere gedreven door de bevindingen van Flügge:

“Bacteriology teaches that former ideas in regard to the manner in which diseases may be air-borne are entirely erroneous; that most diseases are not likely to be dust-borne, and they are spray-borne only for two of three feet, a phenomenon which after all resembles contact infection more than it does aerial infection as ordinarily understood.”

Maar Chapin geeft toe dat er geen bewijs is om verspreiding via de lucht uit te sluiten. “In reviewing the subject of air infection it becomes evident that our knowledge is still far too scanty, and that the available evidence is far from conclusive,” schrijft Chapin. In zijn afweging laat hij de tijdgeest meewegen, vanwege zorgen rond preventiemaatregelen, maar ook om mensen te “bevrijden van het spook van besmette lucht”.

⁴¹ Miasma theory ([bron](#))

In reviewing the subject of air infection it becomes evident that our knowledge is still far too scanty, and that the available evidence is far from conclusive. Yet it is of the greatest practical importance that we should know definitely just what danger there is of air-borne infection and in what diseases it is to be feared. Infection by air, if it does take place, as is commonly believed, is so difficult to avoid or guard against, and so universal in its action, that it discourages effort to avoid other sources of danger. If the sick-room is filled with floating contagium, of what use is it to make much of an effort to guard against contact infection? If it should prove, as I firmly believe, that contact infection is the chief way in which the contagious diseases spread, an exaggerated idea of the importance of air-borne infection is most mischievous. It is impossible, as I know from experience, to teach people to avoid contact infection while they are firmly convinced that the air is the chief vehicle of infection.

While it is not possible at present to state with exactness the part played by aerial infection in the transmission of the different infectious diseases, we are by the evidence forced to the conclusion that the current ideas in regard to the importance of infection by air are unwarranted. Without denying the possibility of such infection, it may be fairly affirmed that there is no evidence that it is an appreciable factor in the maintenance of most of our common contagious diseases. We are warranted, then, in discarding it as a working hypothesis and devoting our chief attention to the prevention of contact infection. It will be a great relief to most persons to be freed from the specter of infected air, a specter which has pursued the race from the time of Hippocrates, and we may rest assured that if people can as a consequence be better taught to practice strict personal cleanliness, they will be led to do that which will more than anything else prevent aerial infection also, if that should in the end be proved to be of more importance than now appears.

De stellingname van Chapin is sindsdien het voornaamste paradigma geweest voor de bestrijding van infectieziekten. Aerogene verspreiding is grotendeels uitgesloten, tenzij verspreiding lastig of niet op een andere manier te verklaren is, zoals bij tuberculose of mazelen het geval is. Maar zelfs voor tuberculose heeft die omslag lang op zich laten wachten. Decennialang werd vastgehouden aan het idee dat ook tuberculose zich uitsluitend via levenloze objecten en druppels verspreidde, ondanks verdachte uitbraken op schepen, in café's, bussen, koren en slecht geventileerde ruimtes⁴². Pas in de jaren 50 kon verspreiding niet meer ontkend worden na de uitvoering van de beroemde Wells-Riley-experimenten⁴³. Nog later werd duidelijk dat tuberculose zich *alleen* via de lucht kan verspreiden, omdat het de alveoli moet bereiken – dieper in de longen – om zijn schadelijke werk te doen. De kennisontwikkeling rond mazelen heeft een soortgelijk proces doorgemaakt. Nog in 1985 “geloofden de meeste volksgezondheidsorganisaties dat de ziekte zich voornamelijk via druppels [direct contact] verspreidt, meestal op een afstand van minder dan 1 meter”⁴⁴.

⁴² How Contagious Is Tuberculosis? ([bron](#))

⁴³ The experiment that proved airborne disease transmission ([bron](#))

⁴⁴ Measles Outbreak in a Pediatric Practice: Airborne Transmission in an Office Setting ([bron](#))

Ondertussen ontstond in de medische wereld de leerstelling dat ziekten die via aerosolen worden overgedragen *én een hoog reproductiegetal hebben én besmettelijk zijn over lange afstanden*. Het RIVM zegt hierover⁴⁵:

“De duidelijkste aanwijzing hiervoor is het reproductiegetal (R_0) van het nieuwe coronavirus. Dit getal is een maat voor hoeveel mensen besmet raken door een ziek persoon als je geen maatregelen treft. Voor het nieuwe coronavirus ligt het reproductiegetal tussen de 2 en 4. **Ziekten die zich via fijne kleine druppeltjes verspreiden en lang in de lucht blijven ‘hangen’ hebben een hoger reproductiegetal.** Enkele bekende voorbeelden hiervan zijn tuberculose en mazelen.”

Hoewel deze leerstelling in de medische wereld breed gedragen is, blijkt die consensus er *niet* te zijn als het wetenschappelijke spectrum wordt verbreed, waaronder de tak die zich bezighoudt met de studie van aerosolen⁴⁶. Een groep van tien professoren van diverse universiteiten omschrijven deze overtuiging als een mythe: “een geschiedkundig artefact dat verward wordt met een natuurwet”⁴⁷. Ze wijzen erop dat ook bij de transmissie van ziekten als de griep, SARS of MERS aerosolen een rol spelen^{48, 49}. “Maar door het gebrek aan acceptatie van dit feit heeft de medische gemeenschap weinig voorbeelden van minder besmettelijke ziekten die zich door de lucht verspreiden.”

De professoren wijzen ook op patronen in de verspreiding van het coronavirus, in het bijzonder de superspreading events die wereldwijd plaatsvinden. Voor dergelijke gebeurtenissen ligt het reproductiegetal zeer hoog, een indicatie dat aerosolen op die plekken een rol hebben gespeeld⁵⁰. Variabiliteit in de emissie van het virus over tijd en onder mensen ligt volgens hen ten grondslag aan een scheve verdeling van het reproductiegetal, met vele lage en enkele zeer hoge waarden. In de statistiek wordt dit overdispersie genoemd⁵¹.

Terug naar de mysterieuze grens van 5 μm . Gegeven de huidige kennis over aerosolen is deze grens volkomen onbegrijpelijk. Toch wordt het nog steeds in papers en richtlijnen van vooraanstaande agentschappen (WHO, CDC) gebruikt⁵². Soms wordt Wells (1934) foutief geciteerd voor de grens van 5 μm tussen aerosol en druppel, ondanks dat hij duidelijk over

⁴⁵ Verspreiding COVID-19 ([bron](#))

⁴⁶ Tweet van professor Jose-Luis Jimenez ([bron](#))

⁴⁷ FAQs on Protecting Yourself from COVID-19 Aerosol Transmission (1.3, [bron](#))

⁴⁸ Recognition of aerosol transmission of infectious agents: a commentary ([bron](#))

⁴⁹ Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: a review ([bron](#))

⁵⁰ Most People With Coronavirus Won't Spread It. Why Do a Few Infect Many? ([bron](#))

⁵¹ Overdispersion ([bron](#))

⁵² Use of medical face masks versus particulate respirators as a component of personal protective equipment for health care workers in the context of the COVID-19 pandemic ([bron](#))

een omvang van meer dan 100 µm spreekt⁵³. Tot op heden is er geen enkele paper gevonden waarin deze grens expliciet wordt gedefinieerd. Het vermoeden is daarom dat de grens enkel op traditie is gestoeld; een onderzoek van professor Linsey Marr (Virginia Tech) naar de geschiedenis rond aerogene transmissie moet daarin doorslag geven⁵⁴. Haar voorlopige conclusie: “we zijn de argumenten van 100 jaar geleden aan het herkauwen”.

Voor veel mensen is de totstandkoming van de foutieve grens van 5 µm zo lang geleden, dat deze grens het enige referentiepunt is dat ze kennen. Inmiddels spreken steeds meer wetenschappers zich erover uit. Dr. Anthony Fauci maakte die zijn hernieuwde inzicht in een video wereldkundig⁵⁵. Epidemioloog Sam Horwich omschrijft het als volgt: “Ik denk dat de grootste fout die epidemiologen hebben gemaakt is dat we vast bleven houden aan het idee dat een besmettelijke dosis van een virus in aerosol automatisch een R_0 impliceert gelijk aan die van mazelen, tuberculose, etcetera.”⁵⁶ En bioloog Dylan Morris bepleit dat deze pandemie aanleiding moet geven voor een verandering van de manier waarop biologen denken over virusverspreiding: “Mensen produceren kleine respiratoire deeltjes bij het praten, ademen en zingen. In die deeltjes kan het virus verborgen zitten. Alleen dit al betekent dat we aerogene transmissie niet mogen uitsluiten in alledaagse settings. Ik kende deze feiten niet en ik vermoed dat voor veel biologen en doktoren hetzelfde geldt.”⁵⁷

Hoe werkt verspreiding via aerosolen?

Er zijn drie manieren waarop je besmet kan raken met het coronavirus dat de ziekte Covid-19 veroorzaakt.

1. **Via een fomiet.** Dat is een levenloos object of substantie die pathogenen kan herbergen en overbrengen. De reling van een bed en nachtkastjes zijn vaak bronnen in een ziekenhuis die besmet zijn. Het risico op besmetting via deze route lijkt beperkt.⁵⁸
2. **Via druppelcontact.** Andere namen hiervoor: grote druppels, ballistische druppels. Druppels bestaan uit speeksel of slijm uit de luchtwegen en hebben een diameter van meer dan 100 µm. Ze worden uitgescheiden door besmette personen als ze hoesten, niezen, en, in mindere mate, praten. Ze vliegen door de lucht als een projectiel en kunnen iemand besmetten door te landen op de mond, ogen of neusgaten. Deze druppels zijn in

⁵³ On air-borne infection: Study II. Droplets and droplet nuclei ([bron](#))

⁵⁴ Tweet van professor Linsey Marr ([bron](#))

⁵⁵ Video in tweet van Adam Hamdy ([bron](#))

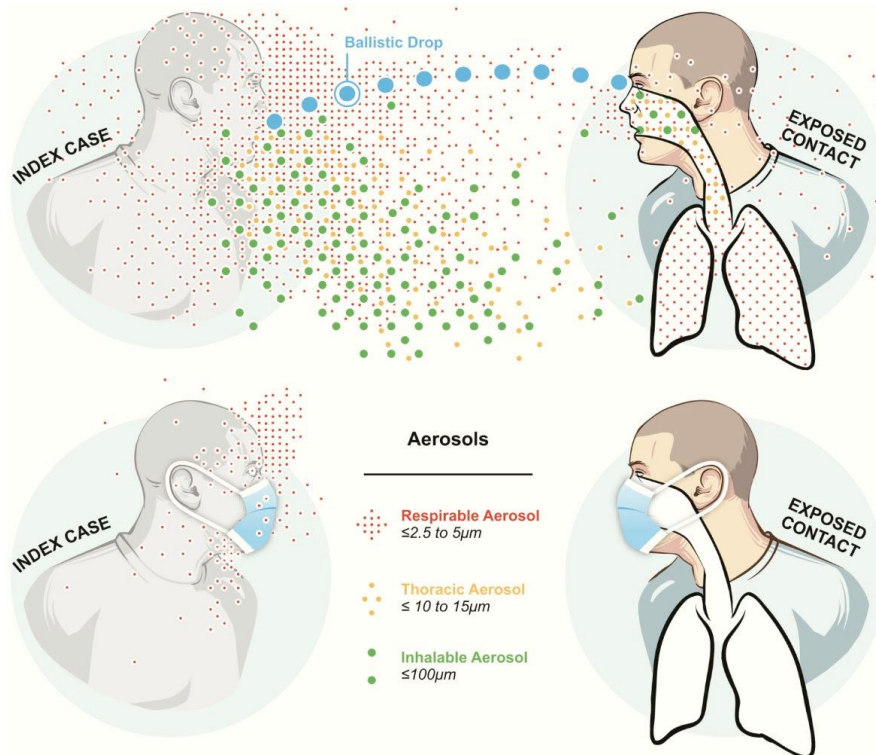
⁵⁶ Tweet van Sam Horwich ([bron](#))

⁵⁷ Tweet van Dylan Morris ([bron](#))

⁵⁸ Low risk of SARS-CoV-2 transmission by fomites in real-life conditions ([bron](#))

het lichtblauw weergegeven in onderstaand schema.

3. **Via aerosolen.** Aerosolen bestaan net als druppels uit speeksel of slijm uit de luchtwegen, maar zijn kleiner dan $100\ \mu\text{m}$. Om die reden kunnen ze lang(er) in de lucht blijven zweven én kunnen ze over langere afstanden verplaatsen. Iemand kan via deze weg besmet raken door de aerosolen in te ademen. In onderstaand schema zijn de aerosolen zichtbaar in het groen, geel, en rood.



Transmissiepotentieel van (ballistische) druppels en aerosolen.⁵⁹

Het is onbekend welk van de drie paden het meest bewandeld wordt door het virus. Dat is een belangrijke notie: wetenschappers die graag zien dat de rol van aerogene verspreiding erkend of omarmd wordt, bepleiten dat *niet* omdat ze geloven dat het virus zich enkel of vooral via die weg verspreidt.

In de medische wereld neigt men ernaar dat het grootste deel van de transmissie verloopt via druppelcontact. “Maar ik weet wel: mensen die hoesten, niezen of zingen, verspreiden een wolk aan druppels. Hoe groter de druppels, hoe hoger de virusconcentratie, en hoe groter de druppels, hoe sneller ze neerslaan. Dat werkt in ons voordeel. Met die anderhalve meter afstand vermijd je de meeste besmettingen,” zegt viroloog en OMT-lid Marion Koopmans in gesprek met Trouw. “We weten niet exact hoeveel de grote druppels aan de verspreiding

⁵⁹ A Rosetta Stone for Understanding Infectious Drops and Aerosols ([bron](#))

bijdragen en hoeveel de kleine. Maar uit het merendeel van de studies blijkt wel: die aerosolen spelen een ondergeschikte rol.”⁶⁰

Sinds deze uitspraak hebben zich nieuwe signalen ontvouwd, waaronder de vondst van besmettelijke virusdeeltjes in aerosol. Belangrijker is de vraag in hoeverre de foutief gehanteerde aerosol/druppel-grens de bevindingen heeft beïnvloed. Daarvoor gecorrigeerd is niet uitgesloten dat aerosolen een grotere rol spelen dan tot nu toe aangenomen. Eind mei liet de Duitse topviroloog Christian Drosten deze mogelijkheid doorschemeren⁶¹. Dr. Anthony Fauci onderstreept dat vermoeden nu: “*Bottomline, this is much more aerosol than we thought*”⁶². De Amerikaanse gezondheidswetenschapper Ashish Jha deed er recent in reactie op de concepttekst van de CDC over aerosolen nog een schep bovenop: “It’s incredibly confusing because [...] the science on this is clear; airborne transmission is not only just a real thing, *it is probably the main way that this virus is transmitted.*”⁶³

Voorts lijkt er onvoldoende rekening gehouden te worden met de dynamiek van aerosol. Meeroken is een goede analogie die voor veel mensen herkenbaar is en dat gedrag van aerosol concreet maakt. Bijna iedereen kent het aanzicht en de geur van mensen die sigarettenrook uitblazen. De concentratie ervan is het dichtst vlakbij de roker. Daarna wordt het vermengd met andere luchtstromen. In een kamer met slechte ventilatie kan de rook in concentratie toenemen. In de meeste binnenruimtes slaat een klein deel van de rook neer en de rest blijft in de lucht zweven totdat verse (buiten)lucht de rook volledig vervangen heeft.

Aerosol dat bestaat uit met virusdeeltjes bezet speeksel of respiratoir slijm is niet zichtbaar, maar het gedraagt zich gelijksoortig aan de hierboven beschreven sigarettenrook. Het gevolg ervan is dat óók transmissie via aerosolen waarschijnlijker wordt naarmate iemand zich dichterbij de bron ervan bevindt; de concentratie van besmettelijke virusdeeltjes is daar immers het hoogst. Evenzo kan de concentratie aerosol in slecht geventileerde zodanig toenemen dat het besmettelijke waardes bereikt.

Een argument dat door virologen en medici wordt aangedragen ter onderbouwing van het idee dat aerosol geen significante bijdrage leveren komt uit de klinische praktijk. In het ziekenhuis zijn bijvoorbeeld nog geen speciale luchtsluizen nodig geweest om het coronavirus tegen te houden. “Een grote rol voor overdracht op afstand via microdruppels ligt vanuit de klinische praktijk gezien niet zo voor de hand. Als je iets moest benadrukken, is daarom gekozen voor

⁶⁰ Aerosolen: volgens de experts komen ze overal. Maar ze doen niks, zeggen virologen ([bron](#))

⁶¹ „Im Alltag eher aufs Lüften konzentrieren als auf ständiges Desinfizieren“ ([bron](#))

⁶² Dr. Fauci on Virus Transmission ([bron](#))

⁶³ Interview op CNN ([bron](#))

die klassieke, directe overdracht via korte afstand, waarvoor wél heel veel ondersteunend bewijs is,” zegt hoogleraar klinische virologie Louis Kroes tegen de Volkskrant.⁶⁴ Er zijn vraagtekens te zetten bij wat Kroes onder ‘microdruppels’ verstaat; vermoedelijk gaat het hier om de lage grens die ook het RIVM hanteert. Belangrijker nog is dat deze redenering is gebaseerd op de vermeende natuurwet dat een infectieziekte die via de lucht verspreidt net zo besmettelijk moet zijn als de mazelen of tuberculose. Inmiddels weten we dat het genuanceerder ligt. Tenslotte blijken zogeheten aerosol genererende procedures weinig aerosol te produceren. “Aerosol generating procedures - intubation and extubation - do not produce aerosols significantly above background, but coughs do,” vertelde Florence Gregson⁶⁵ (Reid Group) tijdens de jaarlijkse conferentie van de American Association for Aerosol Research (5 tot 8 oktober 2020). Professor Shelly Miller vult aan dat het haar niet verbaast: “When I did a literature search on aerosol generating procedures I only found one study that measured the particles emitted during AGP, and there was not very much at all. So this doesn’t surprise me.”⁶⁶

Hoe verder?

Laten we eerst vaststellen wat we weten:

- Gezondheidsorganisaties wereldwijd, het RIVM inclus, lijken een verkeerde dan wel achterhaalde grenswaarde te gebruiken voor de scheiding tussen aerosol en druppel. Het verschil loopt op tot een factor 20.
- Val- en verdampingstijden afgeleid uit de curve van Wells zijn enkel betrouwbaar als voldaan wordt aan de aannames waarop de curve is gebaseerd. In de praktijk lijken de tijden sterk onderschat te worden, omdat de omgevingsomstandigheden (sterk) afwijken.
- Aerosolen is een paraplueterm voor ‘in de lucht zwevende deeltjes’ waar in de context van virustransmissie én opgedroogde druppeltjes vallen (de druppelkern) én nog niet opgedroogde druppeltjes vallen, tot een grootte van ~100 micron.
- Er zijn vele explosieve uitbraken bekend waarbij het zeer aannemelijk is dat aerosolen een significante rol hebben gespeeld in de transmissie van het virus.
- Er is inmiddels bewijs dat rondzwevende virusdeeltjes besmettelijk kunnen zijn.
- Er is te beperkt gebruikt gemaakt van de kennis en ervaring van aerosolfysici en andere wetenschappers in dat domein bij de totstandkoming van richtlijnen en aanbevelingen.

⁶⁴ ‘Luchtoorlog’ om corona: ruim 200 wetenschappers vragen in brief aandacht voor ventilatie ([bron](#))

⁶⁵ Tweet van professor Linsey Marr ([bron](#))

⁶⁶ Tweet van professor Shelly Miller ([bron](#))

- Vanwege de bias richting druppeltransmissie neigt de medische wetenschap naar een waarschijnlijke onderschatting van de rol van aerosolen bij infectieziekten.

Laten we ook vaststellen wat we *niet* weten:

- Het is onbekend welke transmissieroute het meeste bijdraagt aan de verspreiding van het coronavirus.
- Het is onbekend op welke plaats in de luchtwegen het virus zich het meest eenvoudig kan nestelen.
- Het is onbekend hoe groot de dosis is die iemand binnen moet krijgen om besmet te raken en ziek te worden.
- Het is onbekend onder welke precieze omstandigheden aerosolen de kans krijgen iemand te besmetten.

Met andere woorden: (a) hoewel er onzekerheden zijn rond de omstandigheden waarin aerogene transmissie kan plaatsvinden, (b) is er **voldoende aanleiding** aan te nemen dát het plaatsvindt en (c) is het waarschijnlijk dat de **rol van aerosolen onderschat wordt**. Het is daarom verstandig om in overweging te nemen hier het voorzorgsprincipe te hanteren om de potentiële bijdrage van aerosolen aan de verspreiding zoveel als mogelijk te dempen.

In deze context zijn preventiemaatregelen gericht op het verlagen van de concentratie besmettelijk aerosol in de lucht enerzijds en het verkorten van de blootgestelde tijd aan besmet aerosol anderzijds. Recente modelstudies^{67,68} geven een goede indruk van de krachten die van invloed zijn op aerogene transmissie, waaronder fysieke, fysiologische, en aan de ziekte gerelateerde parameters. Voorts bieden ze handvatten om te rekenen met deze parameters, teneinde inzichten aan te reiken over invloed van het aantal mensen in een ruimte, de tijd die ze aldaar veilig met elkaar kunnen doorbrengen en het effect daarop van de voorzorgsmaatregelen die zijn genomen.

Een voorbeeld van zo'n voorzorgsmaatregel is de aanpak van productie van besmettelijk aerosol bij de bron, bijvoorbeeld door het dragen van mondneusmaskers⁶⁹. Het beïnvloeden van de samenstelling van de lucht is een andere weg. Hierin spelen ventilatie en filtratie een grote rol.⁷⁰ Tenslotte zijn er basale preventiemaatregelen als het vermijden van drukte, afstand

⁶⁷ Model Calculations of Aerosol Transmission and Infection Risk of COVID-19 in Indoor Environments ([bron](#))

⁶⁸ Beyond Six Feet: A Guideline to Limit Indoor Airborne Transmission of COVID-19 ([bron](#))

⁶⁹ Aerosol filtration efficiency of household materials for homemade face masks: Influence of material properties, particle size, particle electrical charge, face velocity, and leaks ([bron](#))

⁷⁰ Performance analysis of portable HEPA filters and temporary plastic anterooms on the spread of surrogate coronavirus ([bron](#))

en activiteiten waarbij relatief grote hoeveelheden aerosol worden geproduceerd⁷¹, met name in afgesloten ruimtes.

Voor beleidsmakers ligt een vraagstuk op tafel betreffende de toepassing van het voorzorgsprincipe⁷². Is er voldoende aanleiding om de *mogelijk onderschatte* rol van aerosolen preventief te dempen door het nemen van daarop gerichte maatregelen? In deze context noemen we drie thema's die aandacht verdienen.

Ten eerste zijn er omstandigheden die veranderen en invloed kunnen hebben op de samenstelling van de gedeelde lucht tussen mensen. In Nederland is de herfst begonnen en dat brengt een dalende temperatuur en veranderingen in de luchtvochtigheid met zich mee. Neem daarom in overweging dat het Wells-doctrine in deze omstandigheden mogelijk geen stand houdt. Hou bij deze overweging rekening met de mogelijkheid dat intact en niet opgedroogd aerosol met grotere diameter (tussen de 10 en 100 micron) bestaat. In deze context kan wijdverbreid **gebruik van mondneusmaskers** op populatieniveau effectiever blijken dan verwacht. Rond deze relatief goedkope preventiemaatregel is de vraag: 'hoeveel bewijs is genoeg?'⁷³

Het thema van **ventilatie en filtratie** verdient hierbij de aandacht, bij voorkeur in samenwerking met specialisten rond binnenmilieu, aerosolen en luchtkwaliteit, -capaciteit, en -behandelingsystemen. Mogelijk is het zinvol om de potentiële rol van aerogene verspreiding expliciet te erkennen en in beslissingen voor te sorteren op maatregelen die deze transmissieroute voor het virus in meerdere mate onbruikbaar maken. Een te overwegen doel is om te komen tot gezonde gebouwen, waaronder scholen, kantoren, winkels, uitgaansgelegenheden en andere locaties waar grote(re) groepen mensen samenkomen. Een voorbeeld van zo'n richtlijn is geschreven door de Harvard T.H. Chan School of Public Health, gericht op de luchtkwaliteit in klaslokalen⁷⁴. Het voornemen van de Rijksoverheid om te investeren in gezonde schoolgebouwen lijkt in dat kader een zinvolle stap.⁷⁵

Tenslotte is de luchtkwaliteit in **verzorgingstehuizen en verpleeghuizen** een thema van aandacht. Het is niet uitgesloten dat zogeheten HVAC-systemen in dergelijke settings hebben bijgedragen aan de verspreiding van het virus onder kwetsbare ouderen. Expliciete aandacht voor de werking, instellingen en kwaliteit van de gebruikte HVAC-systemen is daarom het

⁷¹ Comparing the Respirable Aerosol Concentrations and Particle Size Distributions Generated by Singing, Speaking and Breathing ([bron](#))

⁷² Voorzorgsprincipe ([bron](#))

⁷³ Face masks: what the data say ([bron](#))

⁷⁴ 5-step guide to checking ventilation rates in classrooms ([bron](#))

⁷⁵ 360 miljoen voor verbetering ventilatie in scholen ([bron](#))

overwegen waard, evenals op basis van centrale aansturing al deze locaties uit voorzorg te controleren en – waar nodig – aan te passen.

Acknowledgements

Veel dank aan professor D. Frenkel (University of Cambridge) en professor D. Lohse (Universiteit Twente) voor het duidelijke en inzichtvolle inhoudelijke commentaar.