

TNO-rapport**TNO 2020 R11208 Rev. 1****Literatuurstudie naar de afstand die deeltjes
($>5\ \mu\text{m}$) afleggen bij verschillende respiratoire
activiteiten****Buildings, Infrastructure &
Maritime**Leeghwaterstraat 44
2628 CA Delft
Postbus 6012
2600 JA Delftwww.tno.nl

T +31 88 866 22 00

Datum	19 augustus 2020
Auteur(s)	Ir. Karin Kompatscher Dr. Roberto Traversari
Aantal pagina's	41 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	2
Opdrachtgever	Ministerie van Economische Zaken en Klimaat T.a.v. Rick Roelofs
Projectnaam	Literatuurstudie
Projectnummer	060.45679

Alle rechten voorbehouden.

Niets uit deze uitgave mag worden vermenigvuldigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze dan ook, zonder voorafgaande toestemming van TNO.

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2020 TNO

Samenvatting

Inleiding

Luchtweeginfecties zoals COVID-19 kunnen worden overgedragen via druppels. Deze deeltjes komen vrij bij verschillende respiratoire activiteiten zoals o.a. ademhalen, praten, zingen, hoesten en niezen. De World Health Organization (WHO) categoriseert de vrijgekomen deeltjes als ademhalingsdeeltjes ($>5\text{ }\mu\text{m}$) en druppelkernen ($\leq 5\text{ }\mu\text{m}$). Onderzoek toont aan dat overdracht van het SARS-CoV-2 virus via de ademhalingsdeeltjes mogelijk is als er sprake is van nauw contact (*close contact*). In veel landen is ter beperking van het risico van verspreiding via deze transmissieroute een *social distance* ingesteld. Deze afstand (1 m, 1,5 m, 1,8m (6 ft), 2 m) varieert per land. Er wordt vanuit gegaan dat grotere deeltjes ($>5\text{ }\mu\text{m}$) neerslaan binnen deze horizontale afstand. Literatuur toont aan dat grote deeltjes de gehanteerde richtlijn van 1,5 m in Nederland kunnen overschrijden bij respiratoire activiteiten als hoesten en niezen waar bij de luchtstroom niet wordt geblokkeerd door bijvoorbeeld in de elleboog te hoesten of niezen of de hand voor de mond te houden. Buiten hoesten en niezen zijn er nog andere manieren om deze deeltjes te emitteren en is de (horizontale) afstand die afgelegd kan worden afhankelijk van meerdere variabelen, waaronder druppelgrootte, bronsterkte en aanwezige luchtstroming.

Vraagstelling

De onderzoeksvraag in deze literatuurstudie is:

Wat zijn de afstanden die deeltjes $>5\text{ }\mu\text{m}$ kunnen afleggen bij verschillende wijze van productie (ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen)?

Deelvragen die op basis van de onderzoeksvraag zijn geformuleerd betreffen:

- Wat is de deeltjesverdeling van de geëmitteerde deeltjes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?
- Wat is de initiële snelheid van de verschillende deeltjesgroottes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?
- Wat is de horizontale afstand die de verschillende deeltjesgroottes bij verschillende respiratoire activiteiten kunnen afleggen en wat is het effect van binnen- en buitenluchtsnelheden op de horizontale afstand die deeltjes kunnen afleggen?

Aanpak

De literatuurstudie is uitgevoerd door middels relevante zoektermen in verschillende databases en op websites (wetenschappelijke) publicaties te identificeren. Uitbreiding van de literatuurset is via de zogenoemde sneeuwbalmethode gedaan, hiervoor is gebruik gemaakt van verkregen literatuur via experts en verwijzingen in publicaties op dit onderwerp. Middels criteria voor inclusie en exclusie is een selectie gemaakt op basis van de gevonden titels en samenvattingen. Er is voor deze literatuurstudie geen *systematic review* gedaan. Geïnccludeerde publicaties zijn in geheel gelezen en beoordeeld op relevantie voor de te beantwoorden onderzoeksvraag. Indien relevant is de literatuur opgenomen in dit rapport. Om

inzicht te geven in de horizontale afstand die deeltjes afleggen onder binnen- en buitencondities is, op basis van verschillende lichtsnelheden en de valtijden van verschillende deeltjesgroottes uit de gevonden literatuur, de afstand berekend.

Resultaten

Wat is de deeltjesverdeling van de geëmitteerde deeltjes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?

Bij respiratoire activiteiten zoals ademen, praten, kuchen en niezen worden naast deeltjes $<5\ \mu\text{m}$ ook deeltjes $>5\ \mu\text{m}$ geëmitteerd. In studies met de focus op praten en kuchen zijn de meest voorkomende deeltjes gemeten met groottes $>5\ \mu\text{m}$. In een aantal andere studies worden voor deze activiteiten juist de meeste deeltjes gemeten in de range $<5\ \mu\text{m}$. Voor activiteiten als ademen, fluisteren, luid praten en zingen ligt deze in de literatuur gevonden modus overwegend bij deeltjes $\leq 5\ \mu\text{m}$. Een aantal studies vermeldt dat er sprake is van een bimodale verdeling bij praten en één maal kuchen waarbij de tweede categorie ligt bij deeltjes $>100\ \mu\text{m}$. De verdeling van de deeltjes is afhankelijk van de activiteit en varieert per studie; dit kan komen door verschillen in meetmethode, gebruik van kunstmatige opwekking van deeltjes in plaats van personen en verschillen in steekproefgrootte. De concentratie geëmitteerde deeltjes en de lichtsnelheid waarmee deeltjes geëmitteerd worden, is gerelateerd aan de respiratoire activiteit. Bij praten is de concentratie deeltjes hoger dan bij ademen, dit geldt ook indien het volume van spreken toeneemt.

Wat is de initiële snelheid van de verschillende deeltjesgroottes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?

De gevonden literatuur geeft een range aan lichtsnelheden die veelvoorkomend zijn bij respiratoire activiteiten zoals ademen (0,58-5 m/s), praten (3,1-3,9 m/s), kuchen (2-22 m/s) en niezen (10-50 m/s). Verschillen in snelheid zijn gemeten tussen mannen en vrouwen waarbij mannen een hogere snelheid meegeven. Voor de lichtsnelheid wordt ervan uitgegaan dat bij niezen de hoogste initiële snelheden worden behaald en bij ademhalen de laagste.

Wat is de horizontale afstand die de verschillende deeltjesgroottes bij verschillende respiratoire activiteiten kunnen afleggen en wat is het effect van binnen- en buitenlichtsnelheden op de horizontale afstand die deeltjes kunnen afleggen?

De horizontale afstand die deeltjes $>5\ \mu\text{m}$ kunnen afleggen wordt beïnvloed door de mate van verdamping die optreedt na emissie en door de aanwezige luchtstroming in de omgeving. Zo kan bij een lage relatieve vochtigheid meer verdamping optreden en zal een geëmitteerd deeltje in diameter reduceren waardoor het langer duurt voordat het neerslaat op een oppervlak en de horizontale afstand toeneemt. De relatieve vochtigheid kan met name voor deeltjes $<40\ \mu\text{m}$ een groot effect hebben op de afstand die deze deeltjes afleggen. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het effect. Verspreiding via luchtstroming is met name op kleinere deeltjes van invloed, een toenemende ventilatie zorgt voor meer verdunning en vermindering in concentratie. Indien er sprake is van een drukke ruimte en weinig ventilatie kan een verlengde pluim met een hoge deeltjesconcentratie in stand

blijven. Gangbare binnencondities voor luchtsnelheden zijn 0,10 – 0,20 m/s waarbij lokale afwijkingen mogelijk zijn, denk aan koudeval bij bijvoorbeeld ramen en nabij toevoerroosters waar luchtsnelheden plaatselijk hoger kunnen zijn. Voor buitencondities zijn gangbare luchtcondities lastiger te bepalen in de gebouwde omgeving. Het kan voorkomen dat bebouwing voor afremming of juist versnelling van de luchtstroming zorgt. Tabel 1 geeft een eerste inzicht in de horizontale afstanden voor verschillende deeltjesgroottes in verschillende binnen -en buitencondities indien de luchtstroming horizontaal is en constant blijft en er geen initiële snelheid is gegeven aan de deeltjes. Bij respiratoire activiteiten is er echter wel sprake van een initiële snelheid van de geëmitteerde deeltjes. In deze tabel is te zien dat zonder initiële snelheid deeltjes <20 µm de afstand van 1,5 m ruim overschrijdt bij binnencondities. Hoe groter het deeltje, hoe kleiner de invloed van luchtstroming op de horizontale afgelegde afstand. Bij buitencondities kunnen door de hogere luchtsnelheid deeltjes van 100 µm ook verder dan 1,5 meter worden verplaatst.

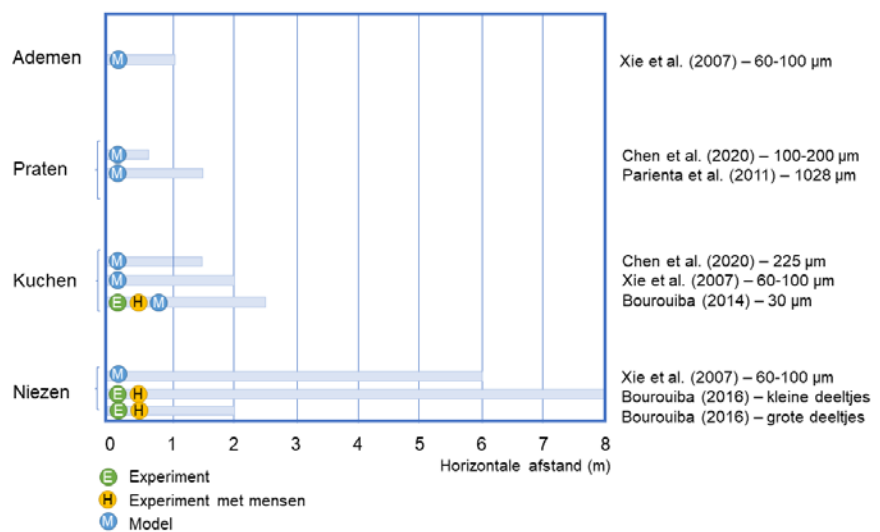
Tabel 1. Berekenende horizontale afstand voor gangbare luchtsnelheden binnen en voor de gemiddelde windsnelheid in Nederland (2019) voor deeltjesgroottes 5 µm, 10 µm, 20 µm en 100 µm (uitgangspunten: emissiehoogte 1,5 m, deeltjes hebben geen initiële snelheid, effect van verdamping is hierin niet meegenomen). De valtijd is bekend uit (Wells, 1934).

Luchtsnelheid (m/s)	Deeltjesgrootte (µm)				Toelichting luchtsnelheid
	5	10	20	100	
0,05	102 m	26 m	6 m	0,25 m	
0,10	204 m	51 m	12 m	0,5 m	binnencondities laag
0,20	408 m	102 m	24 m	1 m	binnencondities hoog
0,25	510 m	128 m	30 m	1,3 m	
3,15	6,4 km	1,6 km	378 m	16 m	Gemiddelde windsnelheid NL (2019) vrije veld ¹

Bij grotere deeltjes geldt dat de afstand die ze kunnen afleggen met name wordt bepaald door de startsnelheid, die weer wordt bepaald door de activiteit (zie Figuur 1). Bij kleine deeltjes bepalen met name de deeltjesgrootte en de luchtsnelheid de afgelegde afstand.

De literatuur die beschouwd is in deze studie heeft aangetoond dat deeltjes (>5 µm) bij respiratoire activiteiten als praten, kuchen en niezen horizontale afstanden behalen van 1,5 m of meer. Voor ademen is een horizontale afstand van ongeveer 1 m berekend voor deeltjes van 60-100 µm waarbij verdamping is meegenomen en geen luchtstroming is gemodelleerd. Bij praten kunnen grote deeltjes (1028 µm) een afstand van <1 m afleggen, de modellen hebben rekening gehouden met de invloed van relatieve vochtigheid en zonder aanwezige luchtstroom in de ruimte. Meerdere studies hebben modelmatig de horizontale afstand bepaald voor de activiteit kuchen. Met deeltjesgroottes van 60 – 225 µm kunnen afstanden van 1,5 m tot ongeveer 2 m behaald worden. De modellen gaan uit van een effect door verdamping en geen extra gemodelleerde luchtstroming. Deeltjesgroottes van 60-100 µm behalen horizontale afstanden van ongeveer 6 m bij niezen gebaseerd op een simulatiestudie. Data uit een experimentele studie laat voor grotere deeltjes een afstand van 2 m zien en voor kleinere deeltjes afstanden tot 8 m. De genoemde afstanden worden behaald indien het kuchen of niezen onbelemmerd plaatsvindt.

¹ https://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/klimatologie/gegevens/mow/jow_2019.pdf



Figuur 1. Overzicht van de horizontale afstand die deeltjes >60 µm afleggen die bij meerdere studies zijn bemeten (in laboratoriumsetting) en berekend (verdamping meegenomen en zonder luchtstroming). E, experimenten; H, menselijke deelnemers; M, modelleren.

Conclusies

De onderzochte literatuur geeft geen eenduidige deeltjesgrootteverdeling voor de verschillende respiratoire activiteiten als ademen, praten, kuchen en niezen. De literatuur geeft voor de snelheid waarmee deeltjes worden uitgestoten de volgende waarden voor ademen (0,58-5 m/s), praten (3,1-3,9 m/s), kuchen (2-22 m/s) en niezen (10-50 m/s).

Verdamping en luchtstroming hebben invloed op de afstand die deeltjes kunnen afleggen. Als verdamping snel optreedt, kan het deeltje een grotere afstand afleggen doordat het deeltje in grootte en gewicht vermindert. Als verdamping langzaam plaatsvindt, zal het deeltje – afhankelijk van de deeltjesgrootte – sneller neerslaan. De relatieve vochtigheid kan met name voor deeltjes kleiner dan 40 µm een groot effect hebben op de afstand die deze deeltjes afleggen. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het effect. Luchtstroming is belangrijk voor de afstand die deeltjes afleggen. Vooral kleinere deeltjes kunnen door luchtstroming verder worden meegevoerd.

Voor gangbare horizontale luchtsnelheden in binnen- en buitencondities is gekeken naar het effect op de afgelegde horizontale afstand die deeltjes groter dan 5 µm kunnen afleggen. Voor binnencondities (luchtsnelheden 0,05-0,25 m/s) blijkt dat deeltjes kleiner dan 20 µm de afstand van 1,5 m ruim overschrijden. Hoe groter het deeltje, hoe kleiner de horizontale afgelegde afstand. Voor deeltjes van 100 µm is de horizontale afstand onder binnencondities minder dan 1,5 m, uitgaande van een maximale luchtsnelheid van 0,25 m/s. Buiten met wind is het voor deeltjes van 100 µm echter mogelijk om afstanden meer dan 1,5 m af te leggen.

De onderzochte literatuur geeft aan dat deeltjes groter dan 5 µm horizontale afstanden behalen groter dan 1,5 m voor verschillende respiratoire activiteiten (ademen, praten, kuchen en niezen). Een studie waarin modelmatig is berekend wat de horizontale afstand is van uitgeademde deeltjes met grootte 60-100 µm concludeert dat deze een afstand van ongeveer 1 m afleggen. Bij deze activiteit

komen veelal deeltjes kleiner dan 5 μm vrij die een grotere afstand kunnen afleggen. De uitkomsten uit de literatuur variëren in grote mate, dit kan komen door onder andere verschillen in gebruikte meetmethode, gebruik van kunstmatige opwekking van deeltjes in plaats van proefpersonen en verschillen in steekproefgrootte, in sommige gevallen zelfs 1 proefpersoon.

Inhoudsopgave

	Samenvatting.....	2
1	Begrippenlijst	8
2	Inleiding	9
2.1	Aanpak.....	9
3	Literatuurstudie	10
3.1	Karakterisering van de bron.....	11
3.2	Invloed van omgevingsvariabelen op grotere deeltjes (>5 µm)	17
3.3	Horizontale afstand die grotere deeltjes (> 5 µm) kunnen afleggen onder verschillende omstandigheden.....	25
4	Conclusies.....	31
5	Referenties.....	33
6	Ondertekening.....	36
	Bijlage(n)	
	A Zoekstrategie literatuurstudie	
	B Overzicht karakteristieken van deeltjes gevonden in de literatuur	

1 Begrippenlijst

Aerosol:

een mengsel van druppels of kleine vaste deeltjes in de lucht.

Ademhalingsdruppels of -deeltjes:

druppels die uitgestoten worden bij respiratoire activiteiten en een diameter $>5 \mu\text{m}$ hebben.

Bron:

opwekker (natuurlijk of kunstmatig) die aerosolen en/of ademhalingsdeeltjes emitteert.

Deeltjesverdeling:

de distributie of verdeling van de geëmitteerde deeltjes gebaseerd op deeltjesgrootte.

Depositie:

de hoeveelheid van een stof of deeltjes die terechtkomt (neerslaat) op een oppervlak.

Druppelkern (nuclei):

bij verdamping van vocht in een druppel blijft er een druppelkern (deeltje) over.

Emitteren:

aerosolen en/of ademhalingsdruppels die via het ademhalingsstelsel door respiratoire activiteiten vrij komen in de omgeving.

Respiratoire activiteiten:

respiratoire activiteiten zijn onder andere ademen, fluisteren, praten, luid praten/ schreeuwen, zingen, kuchen/ hoesten en niezen.

Suspensie:

vloeistof of gas waarin een andere stof in zeer kleine deeltjes zweeft. Het mengsel laat zich niet snel scheiden.

2 Inleiding

Luchtweginfecties zoals COVID-19 kunnen worden overgedragen via druppels (deeltjes). Deze deeltjes komen vrij als mensen niezen, hoesten, praten, zingen of zelfs ademen. De grootte van deze deeltjes wordt over het algemeen gehouden op $>5\text{ }\mu\text{m}$ in diameter (ademhalingsdeeltjes) en $\leq 5\text{ }\mu\text{m}$ (druppelkernen) (World Health Organization (WHO), 2020). Onderzoek laat onder andere overdracht zien van het SARS-Cov-2 virus via de ademhalingsdeeltjes indien er sprake is van *close contact* (nauw contact) (WHO, 2020). Veel landen hebben, om het risico van verspreiding via deze transmissieroute te verminderen, een “*social distance*” ingesteld. Deze varieert van 1 m of 1,5 m tot 2 meter – afhankelijk van het land. Men gaat er van uit dat de grotere deeltjes ($>5\text{ }\mu\text{m}$) neerslaan binnen deze afstand. Er zijn publicaties die laten zien dat deze afgelegde afstand door hoesten of niezen groter kan zijn dan de gehanteerde richtlijn van 1,5 m in Nederland (Bourouiba, 2020; Xie, Li, Chwang, Ho, & Seto, 2007). Buiten niezen en hoesten zijn er nog meer manieren om deze deeltjes te emitteren en is de afstand die ze afleggen afhankelijk van meerdere variabelen, waaronder druppelgrootte, bronsterkte, relatieve vochtigheid en aanwezige luchtstroming.

De onderzoeksvraag in deze literatuurstudie is:

Wat zijn de afstanden die deeltjes $>5\text{ }\mu\text{m}$ kunnen afleggen bij verschillende wijze van productie (ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen)?

Deelvragen die op basis van de onderzoeksvraag zijn geformuleerd betreffen:

- Wat is de deeltjesverdeling van de geëmitteerde deeltjes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?
- Wat is de snelheid van de verschillende deeltjesgroottes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?
- Wat is de horizontale afstand die de verschillende deeltjesgroottes bij verschillende respiratoire activiteiten kunnen afleggen en wat is het effect van binnen- en buitenluchtsnelheden op de afstand die deeltjes kunnen afleggen?

2.1 Aanpak

Middels relevante zoektermen zijn in verschillende databases en websites (wetenschappelijke) publicaties gezocht. In de databases is gezocht naar wetenschappelijke publicaties, via de websites van verschillende instituten met kennis op dit onderwerp is gericht gezocht naar publicaties die aansluiten op de scope van dit onderzoek. Uitbreiding van de literatuurset is via de zogenoemde sneeuwbalmethode gedaan. Een selectie is gemaakt door criteria voor inclusie en exclusie te vormen en deze toe te passen op de titel en samenvatting van een publicatie. De geïnccludeerde publicaties zijn geheel gelezen en meegenomen in de studie indien de inhoud relevant was voor de te beantwoorden onderzoeksvragen. Er is voor deze literatuurstudie geen *systematic review* gedaan. Een uitgebreide beschrijving van de aanpak is opgenomen in bijlage A. Om inzicht te geven in de horizontale afstand die deeltjes afleggen onder binnen- en buitencondities is, op basis van verschillende luchtsnelheden en de valtijden van verschillende deeltjesgroottes uit de gevonden literatuur, de afstand berekend.

3 Literatuurstudie

Deeltjes die vrijkomen bij respiratoire activiteiten worden veelal onderverdeeld in de categorie $>5\ \mu\text{m}$ (ademhalingsdruppels) en $\leq 5\ \mu\text{m}$ (druppelkernen of airborne deeltjes) (Atkinson, Chartier, Pessoa-silva, Jensen, & Li, 2009). De vrijgekomen deeltjes kunnen luchtweginfecties overdragen door besmetting via de neus, mond of ogen indien een vatbare persoon zich in de directe nabijheid bevindt van een besmette persoon die kucht of niest (World Health Organization (WHO), 2020). Voor een aantal andere virussen is vastgesteld dat airborne deeltjes een aannemelijke route vormen voor overdracht, waarbij het overdrachtsrisico afhankelijk is van de hoeveelheid infectueus materiaal in deze deeltjes. Voor COVID-19 hebben de WHO en het RIVM de stelling dat dit een mogelijk risico is, maar slechts een beperkte invloed heeft op de verspreiding, alleen in speciale situaties als bijvoorbeeld zingen^{2,3}.

Er is in een experimentele setting vastgesteld dat SARS-CoV-2 virusdeeltjes ($<5\ \mu\text{m}$) meerdere uren infectieus kunnen blijven in airborne toestand (Doremalen et al., 2020; Fears et al., 2020) en dat overdracht via deze route aannemelijk is (Y. Liu et al., 2020; Schijven et al., 2020). Deze literatuurstudie richt zich echter niet op mogelijke infectierisico's en niet op deeltjes $<5\ \mu\text{m}$. Het doel van deze literatuurstudie is om, aan de hand van de gevonden literatuur, inzicht te geven in de afstand die deeltjes $>5\ \mu\text{m}$ kunnen afleggen. Hiervoor wordt meegenomen dat verschillende productiewijzen invloed hebben op de snelheid en richting die deeltjes meekrijgen bij het verlaten van de bron zoals ademen, fluisteren, spreken, luid spreken, zingen, kuchen/hoesten. De activiteit zal ook van invloed zijn op de bronsterkte en daarmee de concentratie deeltjes die vrijkomt (Asadi et al., 2019; L. Morawska et al., 2009; Yang, Lee, Chen, Wu, & Yu, 2007). Dat de distributie in deeltjesgrootte kan afwijken voor de verschillende productiewijzen is ook in deze studie betrokken/meegenomen.

Deze literatuurstudie focust op de grotere deeltjes $>5\ \mu\text{m}$ die worden geëmitteerd bij respiratoire activiteiten van mensen die zitten of staan. Buiten de verschillende variabelen die een rol spelen in de afgelegde afstand van deeltjes die betrekking hebben op de bron, zal ook de omgeving waarin deze bron zich bevindt meespelen. In deze studie is een overzicht gegeven van de gevonden literatuur die de relatie weergeeft tussen omgevingsvariabelen zoals o.a. luchtstroming en luchtvochtigheid en de afstand die deeltjes afleggen.

De volgende stappen zijn geïdentificeerd voor de literatuurstudie:

- Karakterisering van de bron
 - Beschrijving van gevonden concentraties per productiewijze
 - Beschrijving van gevonden deeltjesgrootte-distributie per productiewijze
 - Beschrijving van gevonden snelheid per productiewijze
- Beschrijving van de literatuur die de invloed van verschillende omgevingsvariabelen op de afstand die grotere deeltjes ($>5\ \mu\text{m}$) afleggen omschrijft
 - Verdamping

² <https://www.rivm.nl/coronavirus-covid-19/verspreiding>

³ <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>

- Luchtstroming
- Beschrijving van de horizontale afstand die grotere deeltjes ($>5 \mu\text{m}$) kunnen afleggen onder invloed van verschillende factoren

3.1 Karakterisering van de bron

3.1.1 Concentratie, distributie en snelheid

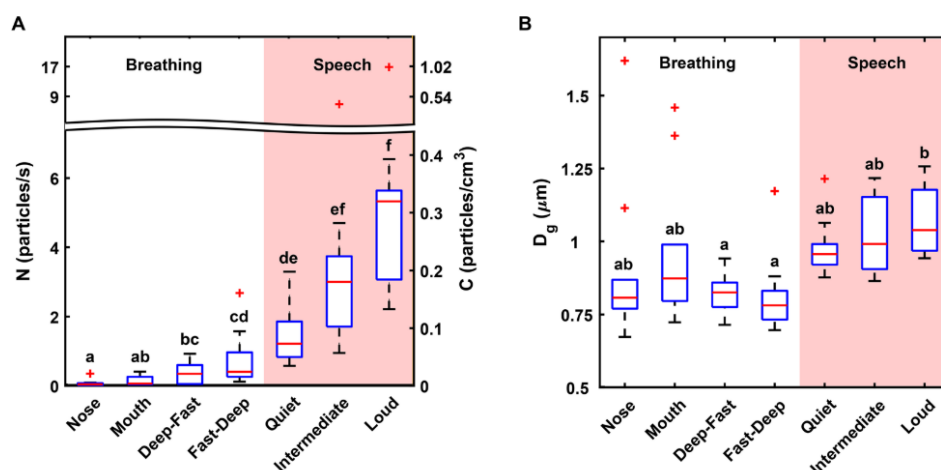
Bij verschillende respiratoire activiteiten komen verschillende concentraties deeltjes vrij. Zo zijn er studies die omschrijven welke concentraties vrijkomen bij ademen, praten (Asadi et al., 2019), zingen (L. Morawska et al., 2009), kuchen (Yang et al., 2007) en niezen (Dhand & Li, 2020). Met name deeltjes in de grootte van $0,5 - 5 \mu\text{m}$ komen vrij. In de deeltjesfractie $0,25 - 1 \mu\text{m}$ is door (Y. Liu et al., 2020) SARS-CoV-2 RNA van virussen aangetoond. RNA betreft erfelijk materiaal van een virus maar dit hoeft niet direct infectieus te zijn en kan ook uit niet infectieus (inactief) virus bestaan.

De studie van Morawska et al. laat een overzicht zien van welke deeltjesgroottes per productiewijze vrijkomen. Het gebruikte meetinstrument voor detectie van de deeltjesgrootte (*aerodynamic particle sizer*) in deze publicatie heeft een meetrange van $0,3 - 20 \mu\text{m}$. Vier modi zijn onderscheiden in de verdelingen ($0,8 \mu\text{m}$, $1,8 \mu\text{m}$, $3,5 \mu\text{m}$, $5,5 \mu\text{m}$). Tabel 2 geeft de gevonden druppelconcentraties per modus weer. Met name bij de niet gemoduleerde vocalisatie (spreken/ zingen van 'aah') zijn meer deeltjes in een kleinere grootteklasse aanwezig alsook in de hogere grootteklasse. Hierbij moet worden opgemerkt dat in deze studie niet gecorrigeerd is voor verdamping. Het meetinstrument is niet direct voor de mond geplaatst waardoor er $0,7 \text{ s}$ tussen uitstoten en meten heeft gezeten. Stadnytskyi et al. benoemt dit en gaat ervan uit dat er grotere deeltjes zijn geëmitteerd bij deze experimenten. Bij 75% dehydratatie zou een $5,5 \mu\text{m}$ deeltje resulteren uit een initiële grootte van $8,7 \mu\text{m}$ (Stadnytskyi, Bax, Bax, & Anfinrud, 2020). De resultaten uit Tabel 2 zeggen niets over besmettelijkheid (quanta/h), de bronsterkte wordt hier aangeduid met druppelconcentratie (deeltjes/ cm^3).

Tabel 2. Druppelconcentraties (deeltjes/ cm^3) voor verschillende respiratoire activiteiten (L. Morawska et al., 2009), $n = 15$.

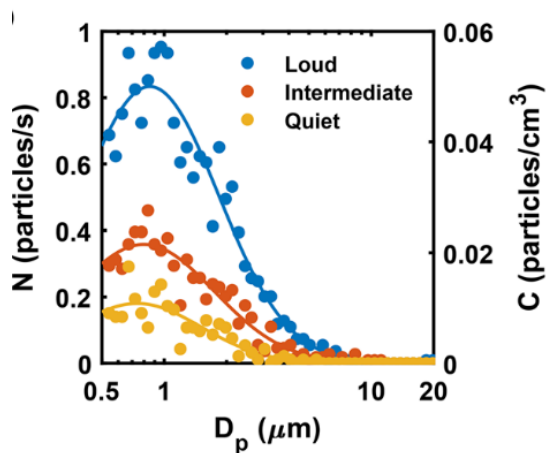
	$0,8 \mu\text{m}$	$1,8 \mu\text{m}$	$3,5 \mu\text{m}$	$5,5 \mu\text{m}$
Ademen	0,084	0,009	0,003	0,002
Fluisteren (tellen)	0,110	0,014	0,004	0,002
Praten (tellen)	0,236	0,068	0,007	0,011
Niet gemoduleerde vocalisatie	0,751	0,139	0,139	0,059

Figuur 2 laat zien, op basis van een studie van (Asadi et al., 2019), dat bij praten een hogere concentratie deeltjes geëmitteerd wordt dan bij ademen door de neus, mond, diep en snel (mond), en snel en diep (neus) ademen. In de figuur is ook te zien dat het aantal geproduceerde deeltjes toeneemt indien er luider gesproken wordt. Figuur 2 laat zien dat de geëmitteerde deeltjes ook groter zijn bij praten in vergelijking met verschillende vormen van ademen en bij luider praten zijn de deeltjes groter. Dit onderzoek is gebaseerd op experimenten met 48 deelnemers.



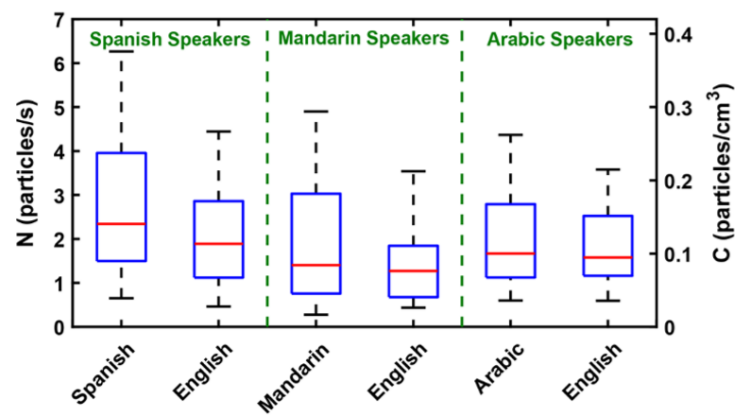
Figuur 2. Druppelmissie (a) en druppel diameter (b) bij ademen door neus en mond en verschillende spraaksterktes (Asadi et al., 2019).

Figuur 3 laat van dezelfde studie van (Asadi et al., 2019) de distributie van de deeltjesgrootte zien tussen 0,5 – 20 μm die geëmitteerd worden bij zacht, gemiddeld en luid praten. Deze distributie in figuur 2 is gebaseerd op één deelnemer van de studie. De deeltjesgrootte die het vaakst is gemeten en de hoogste concentratie deeltjes/cm³ heeft, ligt tussen de 0,8 – 1 μm voor deze deelnemers.



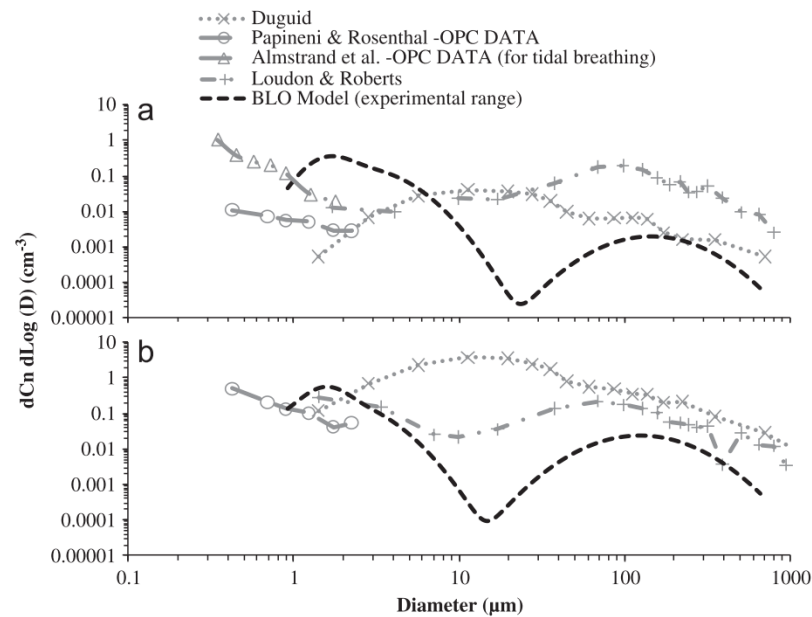
Figuur 3. Representatieve distributie van deeltjes voor één deelnemer (Asadi et al., 2019).

De studie van Asadi et al. vermeldt ook dat de hoeveelheid deeltjes die geëmitteerd worden niet afhankelijk is van de gesproken taal. Dit is onderzocht om te kijken of het aandeel superbronnen (*super emitters*) afhankelijk is van de gesproken taal. Deze superbronnen emitteren constant meer deeltjes dan andere personen die in deze studie deelnamen. Engels, Spaans, Mandarijn en Arabisch zijn onderzocht tijdens het onderzoek, waarbij, afhankelijk van het volume van het spreken, ongeveer 1 tot 50 deeltjes per seconde (0,06 – 3 deeltjes/cm³) worden uitgestoten, zie Figuur 4.



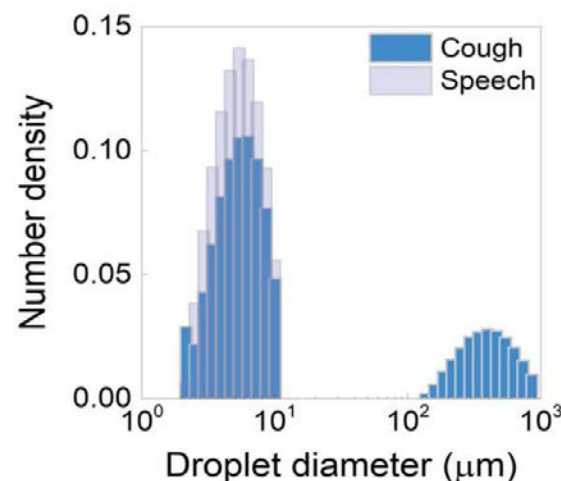
Figuur 4. Boxplot van geëmitteerde deeltjes tijdens het voorlezen van een passage tekst in twee talen (Asadi et al., 2019).

De dataset van (Duguid, 1946) wordt vaak gebruikt in studies om de verdeling in druppelgrootte en aantal deeltjes te beschrijven (zie Figuur 5). De studie van (Johnson et al., 2011) heeft een vergelijking gemaakt tussen de verschillende datasets en de verkregen distributies voor (a) praten en (b) kuchen. De data van Papineni en Rosenthal, en Almstrand et al. zijn niet gecorrigeerd voor verdamping van druppels, dit zou betekenen dat hun data richting hogere deeltjesgroottes zou schuiven (Papineni & Rosenthal, 1997). De nauwkeurigheid van de gebruikte meetmethode van deze datasets (Optical Particle Counter – OPC) wordt in twijfel getrokken door Johnson et al. als de meetinstrumenten niet op de juiste manier zijn gekalibreerd. Zowel voor de dataset van Duguid en die van Johnson et al. is te zien dat er een mogelijk bimodale verdeling is waarbij twee pieken te zien zijn. De pieken liggen op ongeveer 2 μm en 150 μm voor de data van Johnson et al. De data van Johnson et al. is verkregen middels *Aerodynamic Particle Sizing* (0,5 – 20 μm) en *Droplet Deposition Analysis* (>20 μm) in een experiment. Een numeriek model is gebruikt om voor elke modus (B, L, en O) te kunnen reproduceren wat de deeltjesverdeling is. B, L, en O zijn de verschillende locaties waar de deeltjes vandaan komen. B staat voor bronchioles (longvaten), L voor laryngeal (strottenhoofd) en O voor oral (mond).



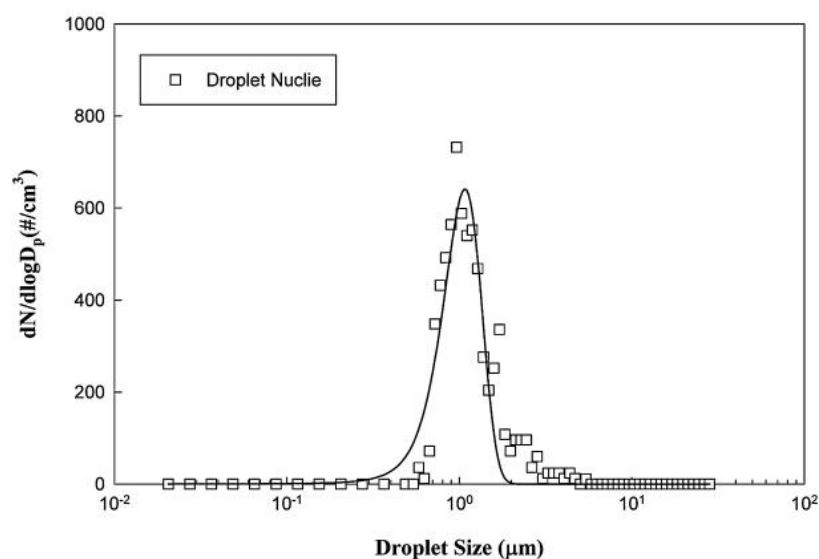
Figuur 5. Distributie deeltjesgrootte voor uitgeademde druppels bij a) praten en b) één maal kuchen (Johnson et al., 2011).

In een studie van Somsen et al. is middels een laserdiffractie meting achterhaald welke deeltjesgroottes vrijkomen bij kuchen en bij praten. De resultaten zijn in Figuur 6 weergegeven. Ook deze studie geeft, net als bij de studie van Johnson et al., een bimodale verdeling aan waarbij druppels met groottes tussen 1 – 10 μm en 100 – 1000 μm zijn gemeten. Praten gaf met dit experiment alleen 'kleine' druppels (1 – 10 μm) en één enkele kuch liet ook de druppels boven 100 μm zien. De studie is uitgevoerd met slechts één gezonde proefpersoon. Hierdoor is het niet mogelijk deze resultaten te veralgemeniseren (Somsen, Rijn, Kooij, Bem, & Bonn, 2020).



Figuur 6. Distributie deeltjes bij kuchen (donkerblauw) en praten (lichtblauw) (Somsen et al., 2020).

In de studie van (Yang et al., 2007) is gekeken naar de verschillende distributies van deeltjesgroottes bij kuchen. Figuur 7 laat de verdeling zien van de ingedroogde druppels. De druppelgrootte bedroeg 0,58 – 5,42 μm waarbij de initiële druppelgrootte 0,62 – 15,9 μm bedroeg bij kuchen.



Figuur 7. Distributie van druppelkernen bij kuchen (Yang et al., 2007).

Invloed van leeftijd op concentratie en deeltjesgrootte

In de studie van (Yang et al., 2007) is ook gekeken naar leeftijdscategorieën en het verschil tussen man en vrouw. Tabel 3 geeft een overzicht weer van de gevonden karakteristieken als het gaat over kuchen uit deze studie. De gemiddelde druppelconcentratie bij mannen was significant groter dan bij vrouwen. Dit wordt verklaard door het verschil in debiet (volumestroom) wat bij mannen hoger is dan bij vrouwen. De druppeldistributie lag dicht bij elkaar. De verdeling van opgehoeste druppels was wel multimodaal. De experimenten wezen uit dat er pieken aanwezig waren bij 1 µm, 2 µm, en 8 µm. De leeftijdscategorie 30 – 50 jaar heeft de hoogste concentratie geëmitteerde druppels, dit ligt in lijn met het hogere debiet waarmee de druppels vrijkomen.

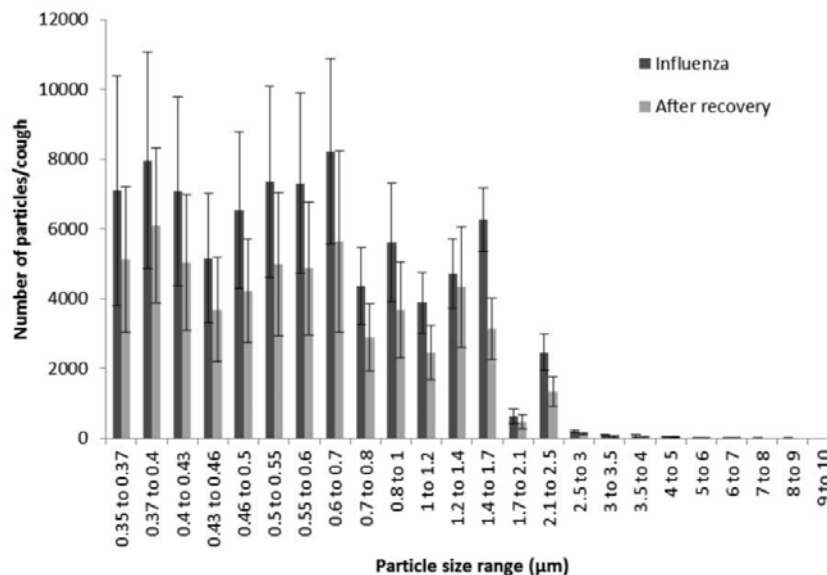
Tabel 3. Gemiddeld debiet bij kuchen van geteste deelnemers (9 mannen, 9 vrouwen per leeftijdscategorie) en gemiddelde druppelgrootte (Yang et al., 2007).

	10 - 20	10 - 20	20 - 30	20 - 30	30 - 50	30 - 50
	Man	Vrouw	Man	Vrouw	Man	Vrouw
Gemiddeld	0,30 ±	0,23 ±	0,48 ±	0,26 ±	0,90 ±	0,69 ±
debiet (L/s)	0,06	0,05	0,09	0,05	0,11	0,09
Druppelgroottes	4,37 -	4,23 -	4,37 -	4,37 -	4,37 -	4,37 -
(min – max)	7,77	7,23	8,35	8,35	6,73	6,73
(µm)						
Gemiddelde	5,99	5,84	6,29	6,46	5,46	6,01
druppelgrootte						
(µm)						
Concentratie	1089 ±	881 ±	1323 ±	896 ±	2355 ±	2066 ±
(druppels/cm ³)	594	358	685	442	663	612

Invloed van luchtweginfectie op concentratie en deeltjesgrootte

Lindsley et al. onderzocht het verschil tussen de hoeveelheid en distributie van aerosoldeeltjes bij participanten met influenza en nadat ze hersteld waren (zie Figuur 8). De gebruikte meetapparatuur had een bereik van 0,35 – 10 µm en de auteurs vermelden dat de range van gevonden deeltjesgroottes in werkelijkheid

veel groter is dan gemeten kon worden en dat het ook zeer waarschijnlijk is dat de grotere deeltjes sneller neerslaan op oppervlakken voordat ze gedetecteerd worden. De studie laat met name zien dat er door patiënten met Influenza een grotere hoeveelheid aerosoldeeltjes wordt geproduceerd bij kuchen dan wanneer ze hersteld zijn (Lindsley et al., 2012).



Figuur 8. Verdeling van deeltjesgroottes en hoeveelheid deeltjes die vrijkomen per kuchen bij deelnemers met influenza en nadat ze hersteld waren (Lindsley et al., 2012).

Initiële snelheid

De snelheid waarmee de deeltjes geëmitteerd worden varieert aanzienlijk tussen de verschillende studies. De aangegeven snelheden zijn de lichtsnelheden bij het verlaten van de mond/neus bij verschillende respiratoire activiteiten. Dit zal, met name bij grotere deeltjes, ook een groot effect hebben op de afstand die deeltjes kunnen afleggen. Bij ademen is 0,61 – 1,6 m/s in staande positie een resultaat van een experiment waarbij de lichtsnelheid vlak voor de mond wordt gemeten. In datzelfde experiment is ook gekeken naar de lichtsnelheid in een zittende positie, deze ligt tussen de 0,64 – 1,5 m/s (Ai, Hashimoto, & Melikov, 2019). Xu et al. hebben aan de hand van een experiment de lichtsnelheden gemeten bij het verlaten van de mond (zie Tabel 4). Een andere studie laat zien dat bij ademen de pieksnelheden tussen 1 – 5 m/s kunnen liggen (Gupta, Lin, & Chen, 2009).

Tabel 4. Gemiddelde lichtsnelheid bij het verlaten van de mond beïnvloed door verschillende manieren van ademen (C. Xu, Nielsen, Gong, Liu, & Jensen, 2015).

	Snelheid bij verlaten mond (m/s)
Neus in, mond uit (man)	0,58 ± 0,15
Mond in, mond uit (man)	0,81 ± 0,40
Neus in, mond uit (vrouw)	1,03 ± 0,56
Mond in, mond uit (vrouw)	1,03 ± 0,51

Voor praten ligt de gemiddelde snelheid nabij de mond op 3,9 m/s (Chen, Zhang, Wei, Yen, & Li, 2020). Chao et al. vermeldt nog dat bij praten de maximum lichtsnelheid voor een man 4,6 m/s is en bij een vrouw 3,6 m/s (Chao et al., 2009). Bij kuchen worden getallen genoemd tussen 6 – 22 m/s (gemiddeld >10 m/s), 2 – 7 m/s (bij het starten van een hoest), en gemiddeld 11,7 m/s, waarbij pieksnelheden

van 13,2 m/s voor een man mogelijk zijn en 10,2 m/s bij een vrouw (Chao et al., 2009; Chen et al., 2020; Somsen et al., 2020). Somsen et al. melden in hun publicatie dat ondanks de initiële snelheid van 2 – 7 m/s bij het starten van een hoest, de grote deeltjes (500 μm) binnen een seconde neervallen door de zwaartekracht.

De piek in snelheid bij niezen ligt tussen 10 – 30 m/s (Bourouiba, 2020).

In simulatiestudies worden veelal afgeronde getallen aangehouden en gaat men uit van 1 m/s (ademen), 10 m/s (kuchen) en 20 – 50 m/s (niezen) (Xie et al., 2007).

3.1.2 *Conclusie*

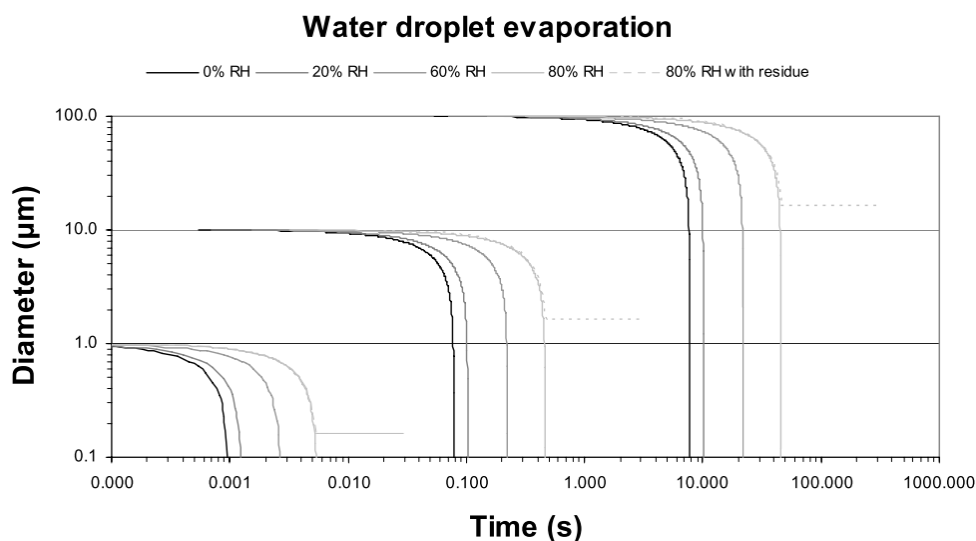
Bij ademen, fluisteren, praten (Asadi et al., 2019), zingen (L. Morawska et al., 2009) en kuchen (Yang et al., 2007) komen in toenemende mate druppels vrij in de grootte van 0,5 – 5 μm . Bij luider stemgebruik en kuchen is in studies gebleken dat ook druppels >5 μm vrijkomen (Johnson et al., 2011; Somsen et al., 2020; Yang et al., 2007). Het hangt af van de gebruikte meetinstrumenten met welke nauwkeurigheid of precisie in een bepaalde range wordt gemeten (Johnson et al., 2011; L. Morawska et al., 2009; Stadnytskyi et al., 2020). Er worden meerdere pieken (modi) gemeten bij verschillende respiratoire activiteiten. Voor praten en hoesten gaat het om een bimodale verdeling in enkele studies, de tweede modus ligt bij deeltjes >100 μm . Ook hierbij is variatie tussen verschillende studies geconstateerd, de meetrange van de apparatuur kan bijdragen in het wel of niet detecteren van multimodale verdeling. De tabel in appendix B geeft een overzicht van de snelheden, concentraties en deeltjesgroottes uit de verschillende studies die in de voorgaande sub paragrafen beschreven zijn. Deze afstanden worden behaald indien het kuchen of niezen onbelemmerd plaatsvindt.

3.2 **Invloed van omgevingsvariabelen op grotere deeltjes (>5 μm)**

3.2.1 *Verdamping*

De afstand die deeltjes afleggen is mede door de deeltjesgrootte bepaald. Tellier et al. benoemt in zijn publicatie dat deeltjes >20 μm door invloed van de zwaartekracht hun baan snel afbuigen naar beneden. Kleinere deeltjes (<5 – 10 μm) zijn potentieel in staat om korte en lange afstanden af te leggen door het volgen van de luchtstroming. Deze kleinere deeltjes zullen uiteindelijk neerslaan op een oppervlak. De deeltjes tussen deze afmetingen (10 – 20 μm) kunnen eigenschappen van beide categorieën hebben. Ze zullen zeer waarschijnlijk eerder neerslaan onder invloed van de zwaartekracht (Tellier, Li, Cowling, & Tang, 2019).

Het vocht in kleine druppels verdampt in korte tijd (zie Figuur 9). Morawska heeft aangetoond dat druppels kleiner dan 100 μm verdampen tot kleinere airborne deeltjes voordat ze de grond raken. Aangezien druppels ook zout (NaCl) bevatten, verdampen de druppels niet volledig en blijven kleinere deeltjes achter die langere tijd kunnen blijven zweven (Lidia Morawska, 2005).



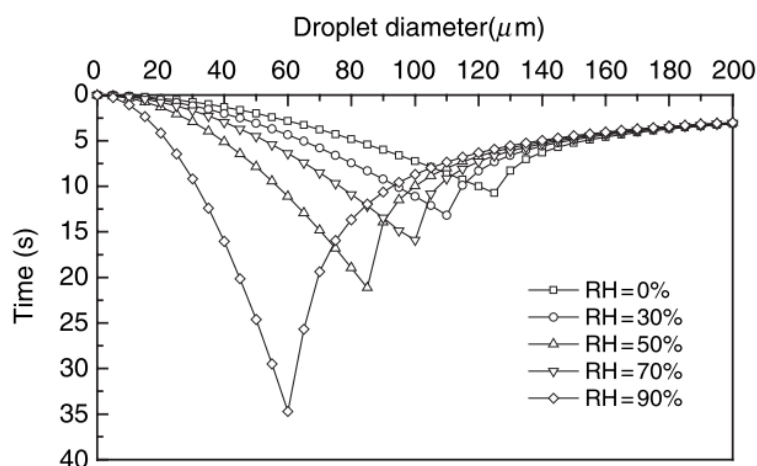
Figuur 9. Druppelverdamping als functie van initiële druppelgrootte en relatieve vochtigheid van de lucht. Resulterende druppelgrootte (gestippelde lijn) voor waterdruppels met 0,86% NaCl oplossing (Lidia Morawska, 2005).

Afhankelijk van de initiële druppelgrootte blijven druppels korter of langer in de lucht zweven (zie Tabel 5). Resulterende deeltjesgrootte van 1 - 3 µm blijven door de luchtbeweging uren (airborne) in de lucht zweven. Als de luchtsnelheid 0,1 m/s bedraagt zouden 10 µm druppels 30 meter verder op de grond terecht komen.

Tabel 5. Druppel valtijd als functie van druppel diameter (Wells, 1934).

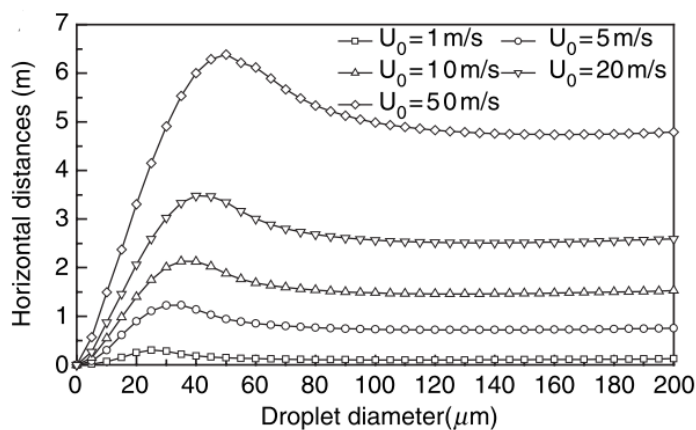
Druppel diameter (µm)	Valtijd vanaf 1 meter hoogte (s)
1000	0,3
100	3
10	300
1	30.000

De studie van Xie et al. omschrijft een simpel fysisch model om de beweging en verdamping van een druppel mee te nemen gebaseerd op de Wells verdamping/val curve. In de eerste sectie uit deze studie wordt aangetoond dat voor druppels bestaande uit puur water bij verschillende luchtvochtigheden verschillende deeltjesgroottes als cut-off grootte gezien kunnen worden voor de termen 'kleine deeltjes' en 'grote deeltjes'. Daarbij neemt Xie het verschil in aerodynamisch gedrag als scheidslijn. Kleine deeltjes worden beïnvloed door volledige verdamping zodra ze geëmitteerd worden en grote deeltjes zullen vanaf 2 meter hoogte de grond bereiken voordat ze volledig verdampen. Met een relatieve vochtigheid van 0% zal verdamping meer optreden en ligt de grens voor deeltjes die volledig verdampen voordat ze de grond bereiken bij 125 µm. Bij een relatieve vochtigheid van 90% zal verdamping minder snel optreden en duurt het ook langer voordat grotere deeltjes vallen. De grens voor deeltjes die volledig verdampen voordat ze de grond bereiken ligt in deze situatie op 60 µm (zie Figuur 10) (Xie et al., 2007).



Figuur 10. Tijd benodigd om te verdampen of neer te slaan op de grond (valtijd) voor deeltjes met verschillende diameters en onder verschillende relatieve vochtigheden (valhoogte = 2 m) (Xie et al., 2007).

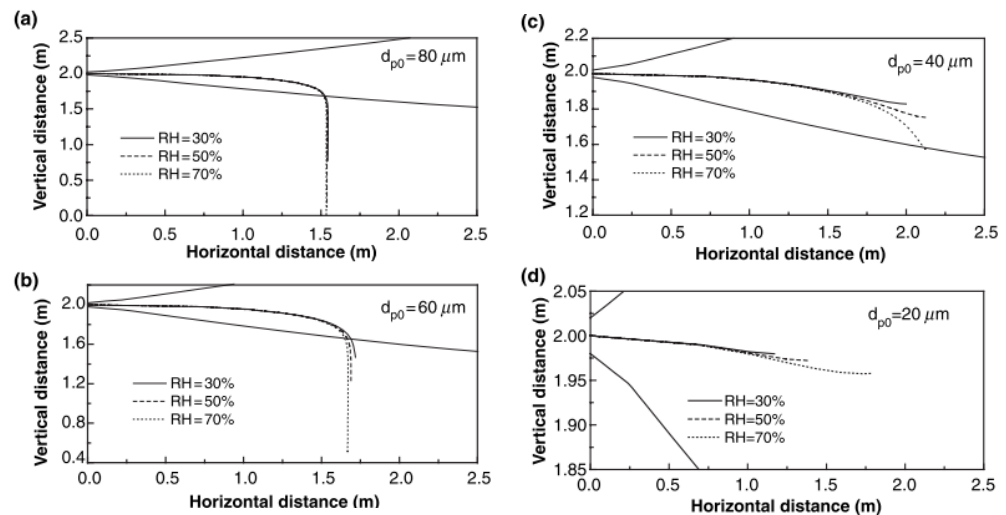
De voorgaande figuur is berekend voor druppels bestaande uit puur water. De tweede sectie uit deze studie berekent het gedrag van druppels representatief voor ademhalingsdruppels. Hiervoor zijn druppels met een zoutgehalte van 0,9% w/v (gewicht per volume: 0,9 g in 100 ml water) gebruikt om mee te rekenen. Figuur 11 laat zien welke horizontale afstand gehaald kan worden per druppelgrootte en afhankelijk van de initiële snelheid in een ruimte zonder luchtstroming. Bij hoge initiële snelheid (>20 m/s) is berekend dat de horizontale afstand voor deeltjes (>30 μm) boven de 2,5 m is. Voor lage snelheden (<1 m/s) is de berekende maximale horizontale afgelegde afstand van deeltjes minder dan 0,5 m.



Figuur 11. Horizontale afstand voor verschillende druppelgroottes en bij verschillende initiële snelheden (RV = 50%) (Xie et al., 2007) in een ruimte zonder luchtstroming.

De resultaten van Xie et al. laten zien dat de druppelgrootte de verdamping en beweging bepaalt die het deeltje aflegt. Voor grotere druppels (20 μm) is onderzocht hoe deze zich gedragen bij verschillende luchtvochtigheden. Figuur 12 laat de trajecten zien van vier druppelgroottes (20 μm, 40 μm, 60 μm, 80 μm) bij verschillende relatieve vochtigheden (30%, 50%, 70%). Figuur 12 laat zien dat relatieve vochtigheid met name voor deeltjes <40 μm een groot effect kan hebben op de afstand die deze deeltjes afleggen. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het

effect. Bij een hogere relatieve vochtigheid zullen druppels langzamer verdampen en door zwaartekracht naar de grond bewegen (Xie et al., 2007).



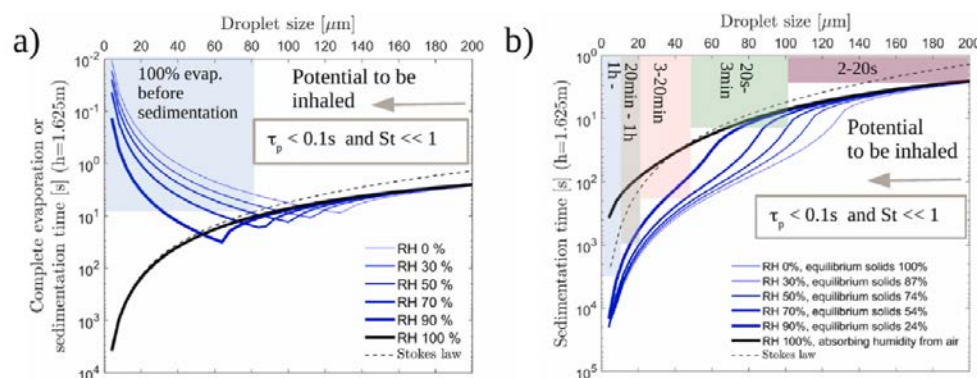
Figuur 12. Resultaten van de voorspelde trajecten van vier druppelgroottes bij verschillende relatieve vochtigheden. Initiële snelheid is 10 m/s (representatief voor hoesten) (Xie et al., 2007).

De conclusies van het onderzoek van Xie et al. zijn dat kleine druppels snel in omvang afnemen (verdampen) en grote druppels snel richting de grond bewegen, echter, horizontaal geëmitteerde grotere druppels kunnen alsnog een grote afstand afleggen. Bij niezen (50 m/s) kunnen grote druppels 6 m afleggen, bij hoesten (10 m/s) is dat meer dan 2 m en bij ademen (1 m/s) is berekend dat de deeltjes minder dan 1 m afleggen voor ze de grond bereiken. Afhankelijk van de relatieve vochtigheid valt 60 – 125 μm onder de definitie van ‘grote druppels’ volgens Xie et al. Xie et al. geven zelf aan dat het gebruik van alleen zouten in de druppel een limitatie van de studie is en dat andere aanwezige componenten het traject van een deeltje nog kunnen beïnvloeden als deze zwaarder wordt en mogelijk sneller neerslaat (Xie et al., 2007). De resultaten uit dit numerieke onderzoek worden ondersteund door de experimentele resultaten van Bourouiba en Loh et al. (Bourouiba, 2020; Loh et al., 2020).

Bij niezen komen niet alleen grotere deeltjes vrij die snel vallen, maar ook een turbulente gaswolk met kleinere deeltjes. De warme en vochtige wolk die vrijkomt bij niezen zorgt ervoor dat druppels in de kern van deze wolk langzamer verdampen dan geïsoleerde druppels. De levensduur kan daarmee met een factor 1000 verlengd worden (van een seconde naar minuten). In combinatie met de hoge snelheid die meegegeven wordt bij het niezen kunnen alle maten druppels wel 7 – 8 m ver komen. Samen met de vochtige gaswolk wordt dit een ‘verlengde pluim’ genoemd. Het experiment is uitgevoerd met weinig ventilatie. Bourouiba vermeldt dat de pluim uiteindelijk momentum en coherentie verliest, waarna deeltjes verder kunnen verdampen en blijven zweven in de lucht en mogelijk door luchtstroming verder vervoerd worden (al dan niet veroorzaakt door ventilatie of infiltratie) (Bourouiba, 2020).

Figuur 13 laat zien dat de verdamping van druppels bestaande uit alleen water met grootte $<80 \mu\text{m}$ sneller gaat dan depositie op de grond (emissiehoogte = 1,625 m,

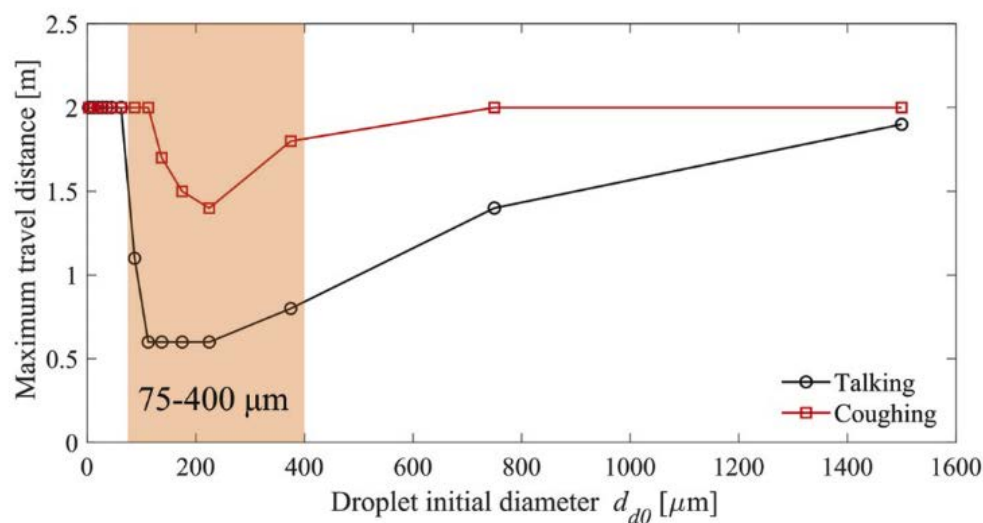
stilstaande lucht, $RH = 50\%$). Druppels $>80\ \mu\text{m}$ bewegen naar de grond voordat complete verdamping plaatsvindt. Voor druppels bestaande uit een gedeelte vaste stoffen (representatief voor ademhalingsdruppels) ligt de grens op $50\ \mu\text{m}$. Deeltjes van deze grootte kunnen airborne blijven gedurende ongeveer 3 minuten. Alle deeltjes $<200\ \mu\text{m}$ kunnen door de luchtstroom worden meegevoerd (de tijdsduur dat ze in de lucht blijven is afhankelijk van de grootte van de deeltjes) en ingeademd worden.



Figuur 13. Simulaties van verdampend vocht bij stilstaande luchtstroming. (a) laat de Wells-curve zien voor water, (b) tijd die deeltjes (druppels bestaande uit 3 w-% vaste stof) nodig hebben om neer te slaan op een oppervlak (Vuorinen et al., 2020).

De studie van Vuorinen et al. laat aan de hand van simulaties zien dat deeltjes $<20\ \mu\text{m}$ 20 min tot 1 u in de lucht kunnen blijven zweven en grotere deeltjes $50 - 100\ \mu\text{m}$ 20 s tot 3 min blijven zweven door snelle verdamping (Vuorinen et al., 2020).

Recent zijn door Chen et al. simulaties uitgevoerd om meer inzicht te krijgen in de afstand die deeltjes van meerdere diameters afleggen. Figuur 14 laat de resultaten hiervan zien. De maximum afgelegde afstand is in de berekeningen begrensd tot 2 m. Dit wil dus niet zeggen dat deeltjes geen grotere afstand kunnen afleggen (Chen et al., 2020). Met name deeltjes tussen $75 - 225\ \mu\text{m}$ zijn in deze berekening deeltjes die niet ver komen. Volgens Chen et al. hebben kleine deeltjes een snelle impuls-reactietijd wat resulteert in het snel volgen van de uitgeademde luchtstroom. Grotere deeltjes hebben een grotere massa en behouden hun eigen snelheid waardoor de weerstand minder grote invloed heeft op het afgelegde traject. Dit suggereert dat het onwaarschijnlijk is dat grotere druppels op korte afstand neerslaan (Chen et al., 2020). In het model komt dit tot uiting doordat druppels $>225\ \mu\text{m}$ een grotere horizontale afstand afleggen (zie Figuur 14).



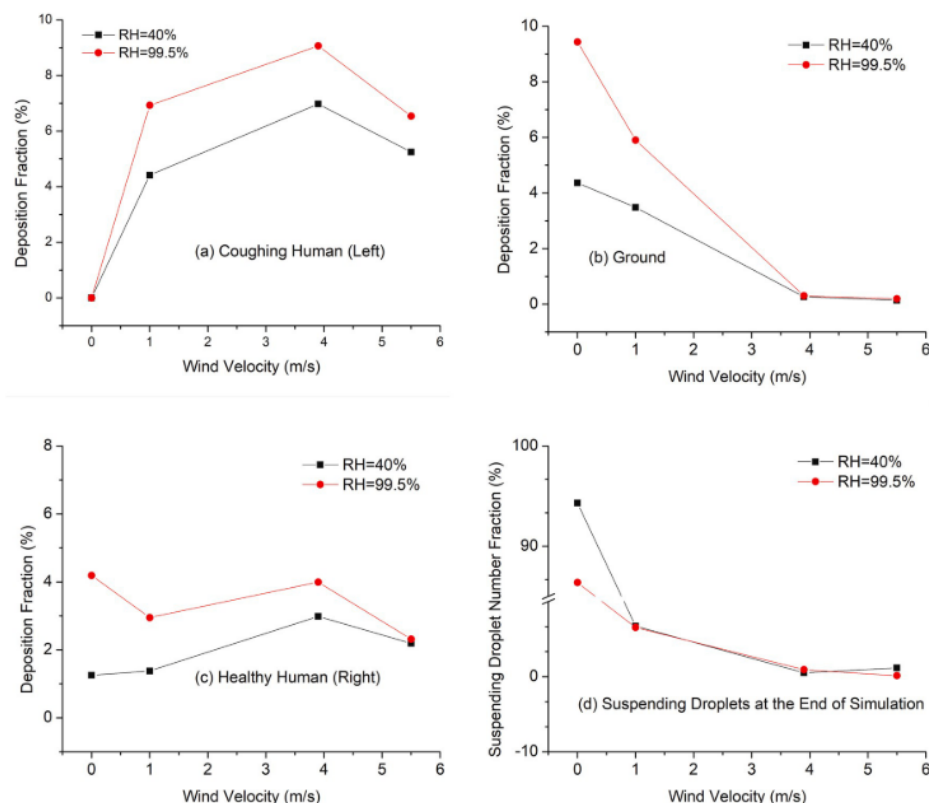
Figuur 14. Berekende afgelegde afstand van druppelgroottes voor praten (rood) en kuchen (zwart) (Chen et al., 2020).

3.2.2 Luchtstroming en ventilatie

Het transport van deeltjes vindt in eerste instantie plaats door de uitademingsstroom, vervolgens kan er nog verdere verspreiding optreden door luchtstroming. Door een verschil in temperatuur treedt convectie op, waarbij de warme lucht stijgt (thermiek). Met een ventilatiesysteem wordt een geforceerde luchtstroom geïntroduceerd waarin ofwel verse lucht wordt toegevoerd of gebruik wordt gemaakt van recirculatie. Natuurlijke ventilatie kan gerealiseerd worden door o.a. infiltratie of het openzetten van ramen. Onderscheid kan gemaakt worden tussen luchtstroming buiten (wind) en binnen (o.a. infiltratie en ventilatie).

Studie met buitencondities

Om het transport, verandering in grootte en depositie van infectieuze druppels uitgestoten door kuchen te voorspellen is in de studie van Feng et al. gebruik gemaakt van een gevalideerd numeriek model om dit te berekenen (Feng, Marchal, Sperry, & Yi, 2020). Er is gebruik gemaakt van de grootteverdeling van Duguid om de grootste spreiding in druppelgrootte te gebruiken. In de studie is gekeken welke afstand deeltjes uitgestoten door een kuch kunnen afleggen als er wind in de rug van de geïnfecteerde persoon is. Vier verschillende lichtsnelheden zijn toegepast (0 m/s, 1 m/s, 3,9 m/s en 5,5 m/s) om te voorspellen of 1,83 m (6 ft) voldoende afstand tussen mensen is om besmetting te voorkomen. Uit de studie blijkt dat deeltjes onder verschillende omstandigheden een afstand kunnen afleggen die de 1,83 m (6 ft) overschrijdt. Feng et al. noemt dat er ook nog geen rekening is gehouden met de nies studie van Bourouiba die aangeeft dat de gaswolk die ontstaat bij niezen tot 8 m kan overspannen (Feng et al., 2020). Onder andere de continuïteit in de luchtstroom is bepalend voor de afstand; bij een gesimuleerde windvlaag komen met name de grote deeltjes sneller aan bij een tweede persoon. Ook de relatieve vochtigheid speelt een rol, bij lage RV verkleint de diameter van deeltjes en kunnen deze langer in de lucht blijven zweven (zie Figuur 15).



Figuur 15. Effect van luchtsnelheid en relatieve vochtigheid op druppel depositie en suspensie voor depositie fractie op de kuchende persoon (a), op de grond (b), op de gezonde persoon (c) en de druppelsuspensie als functie van de luchtsnelheid (d) (Feng et al., 2020).

Studies met binnencondities

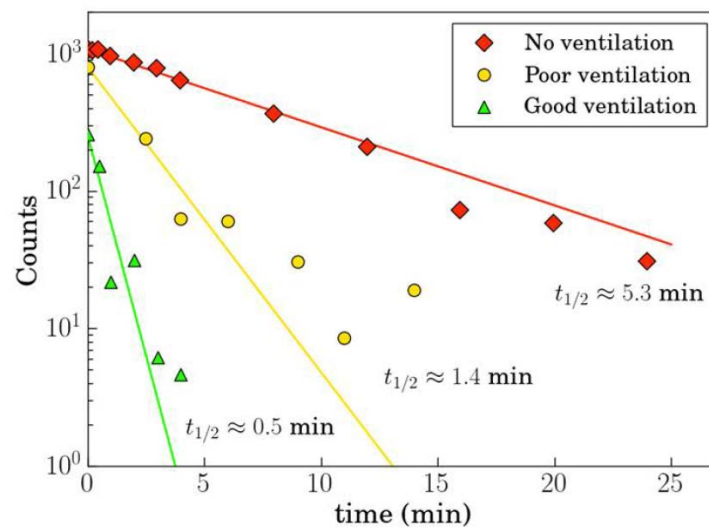
Luchtstroming in een gebouw wordt vaak gekwantificeerd als 0,2 m/s of <0,25 m/s om thermisch comfort te garanderen in de leefzone (Chen et al., 2020; Wei & Li, 2016). Door het domein van het model te begrenzen bij 2 m is de luchtstroming in deze studie niet significant gebleken om de baan van uitgestoten deeltjes te veranderen met deze luchtsnelheden (Chen et al., 2020). Andere studies wijzen juist op de invloed van luchtstroming op de afstand die deeltjes afleggen. Verspreiding via luchtstroming in gebouwen wordt beïnvloed door meerdere parameters, zoals bijvoorbeeld het ventilatiesysteem, kamerinrichting en de thermische pluim van een persoon (Wei & Li, 2016). In de studie van Li et al. wordt aangegeven dat een verlengde pluim kan ontstaan in een drukke ruimte met slechte ventilatie. Als er een stabiele luchtstroom met weinig verdunning (onvoldoende opmenging) aanwezig is, blijft de concentratie deeltjes hoog en blijft deze pluim over grotere afstand in stand. Indien voldoende menging aanwezig is, zal de concentratie deeltjes in de pluim dalen (Li et al., 2020).

De studie van Liu et al. heeft zowel in experimentele setting als met simulaties verschillende cases doorgemeten en gerekend. Hierbij zijn twee mannequins op verschillende afstand van elkaar geplaatst in een ruimte met een ventilatievoud van 5,6 verversingen per uur. De ventilatie is bekeken voor zowel mengventilatie als verdringingsventilatie. De studie concludeert o.a. dat sterkere menging met een hogere ventilatievoud kan resulteren in meer mengen van airborne deeltjes. Een mogelijk gevolg van verdringingsventilatie is het ontstaan van een verticale

temperatuurgradiënt. Aanvullend materiaal behorende bij deze studie vermeldt dat grote druppels voornamelijk door hun eigen momentum voortbewegen (o.a. tijdens kuchen). Luchtstroming heeft een grote impact op de afgelegde afstand van kleinere deeltjes (L. Liu, Li, Nielsen, Wei, & Jensen, 2017). Verdringingsventilatie is niet gangbaar in horeca, woningen of kantoren.

Waar veel van de eerdere studies uitgaan van stilstaande lucht om de afstand van deeltjes te berekenen, is het aannemelijk dat de suspensietijd van deeltjes, en daarmee de afstand die deeltjes kunnen afleggen, vergroot wordt door luchtinfiltratie of -ventilatie. Op eenzelfde manier kan de suspensietijd ook verkleind worden door gebruik te maken van effectieve afvoer van lucht of bijvoorbeeld verdringingsventilatie (Tellier et al., 2019). In de studie van Cao et al. is in een testsetting gekeken naar het effect op de baan die kuch-geëmitteerde deeltjes afleggen door verschillende ventilatieprincipes toe te passen (geen ventilatie, mengventilatie, 2 neerwaartse jets, 1 neerwaartse jet). Resultaten laten zien dat met name in een neerwaarts gerichte luchtstroom deeltjes meteen meegevoerd worden. Een opmerking dient hier geplaatst te worden dat de mechanische afzuiging op de grond als roostervloer van de testopstelling geplaatst was en dat als gevolg heeft dat circulatie in de ruimte niet overmatig aanwezig was (Cao, Liu, Boor, & Novoselac, 2015).

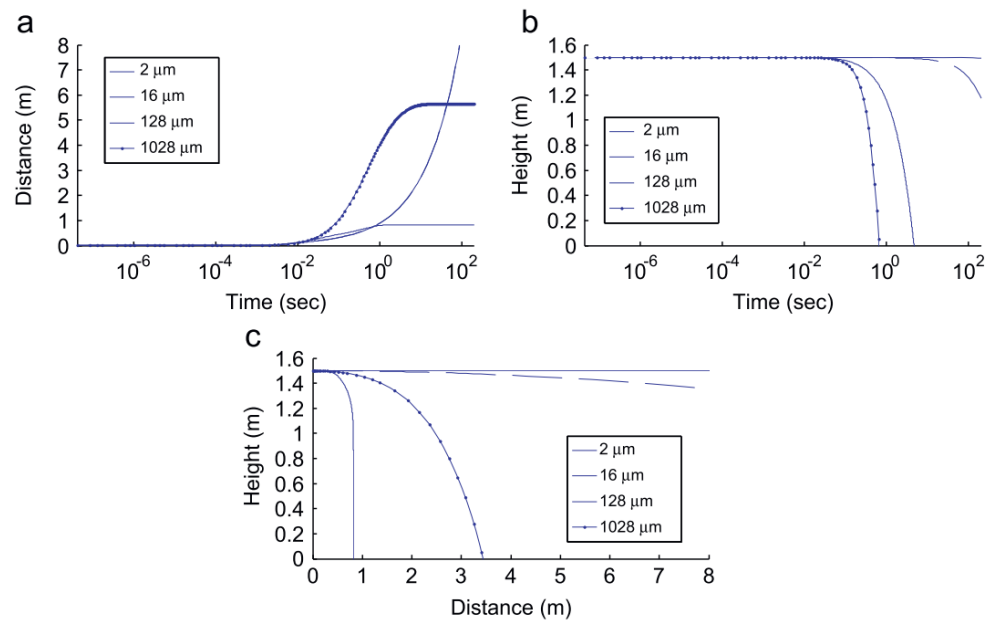
De studie van Somsen et al. laat zien dat bij een betere ventilatie van ruimtes de tijd dat deeltjes airborne aanwezig zijn significant wordt gereduceerd. Figuur 16 laat zien dat bij drie verschillende ventilatiestrategieën (geen ventilatie, mechanische ventilatie en mechanische ventilatie en deuropening met raam) de halfwaardetijd voor de aanwezige druppels sterk vermindert bij meer ventilatie. Bij de meeste ventilatie duurde het 30 s voordat het aantal aanwezige druppels gehalveerd was, bij het gebruik van alleen mechanische ventilatie was dat 1,4 min, en bij geen ventilatie duurde het 5,3 min voordat het aantal tot de helft was gereduceerd. Somsen concludeert aan de hand van de uitgevoerde studie dat het verbeteren van de ventilatie de verdunning van mogelijk infectueuze aerosolen zal bevorderen (Somsen et al., 2020).



Figuur 16. Tijd die nodig is om het aantal deeltjes te reduceren voor geen ventilatie (rood), alleen mechanische ventilatie (geel), en mechanische ventilatie met deur- en raamopening (groen) (Somsen et al., 2020).

3.3 Horizontale afstand die grotere deeltjes (> 5 µm) kunnen afleggen onder verschillende omstandigheden

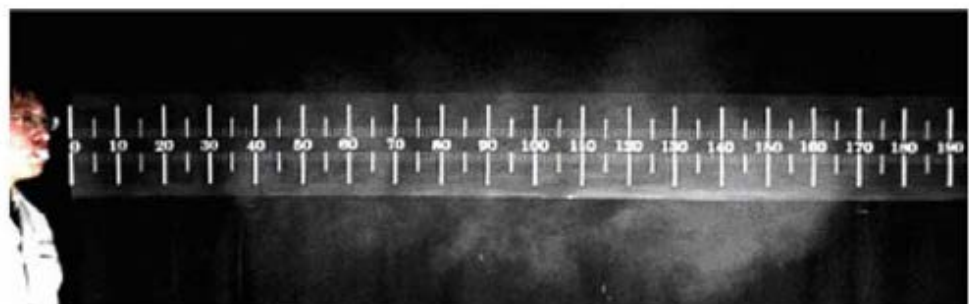
De studie van (Parianta et al., 2011) berekent de afstand behorende tot verschillende deeltjesgroottes voor o.a. een kuchen en spraak. Grotere deeltjes bereiken hun horizontale afstand redelijk snel en vallen daarna met een bepaalde valsnelheid naar de grond, de lichtsnelheid is dan minder van invloed op de baan van het deeltje. In termen van druppeldynamiek laat de studie zien dat er een onderscheid is tussen grote druppels die binnen enkele meters vallen, en kleine deeltjes die blijven zweven en lange afstanden kunnen afleggen maar die meer beïnvloed worden door de relatieve vochtigheid en samenstelling van de druppel. Het model suggereert dat deeltjes met grootte 16 µm een horizontale afstand behalen van >8 m bij kuchen en praten. De studie geeft 100 µm als deeltjesgrootte aan als omslagpunt.



Figuur 17. Overzicht van berekende afgelegde afstand voor vier verschillende deeltjesgroottes bij een kuch (11,7 m/s) (Parianta et al., 2011)

Bourouiba et al. laat aan de hand van experimenten en een numeriek model zien dat bij activiteiten zoals hoesten en niezen een grote turbulente gaswolk vrijkomt die ervoor zorgt dat deeltjes een grote horizontale afstand overbruggen. Kleine druppels ($<50 \mu\text{m}$) kunnen door deze wolk lang in de lucht blijven hangen (4 – 6 m). Een druppel ($<10 \mu\text{m}$) verdampt in 0,027 s en blijft door de lage valsnelheid lang in de wolk zweven (Bourouiba, Dehandschoewercker, & Bush, 2014).

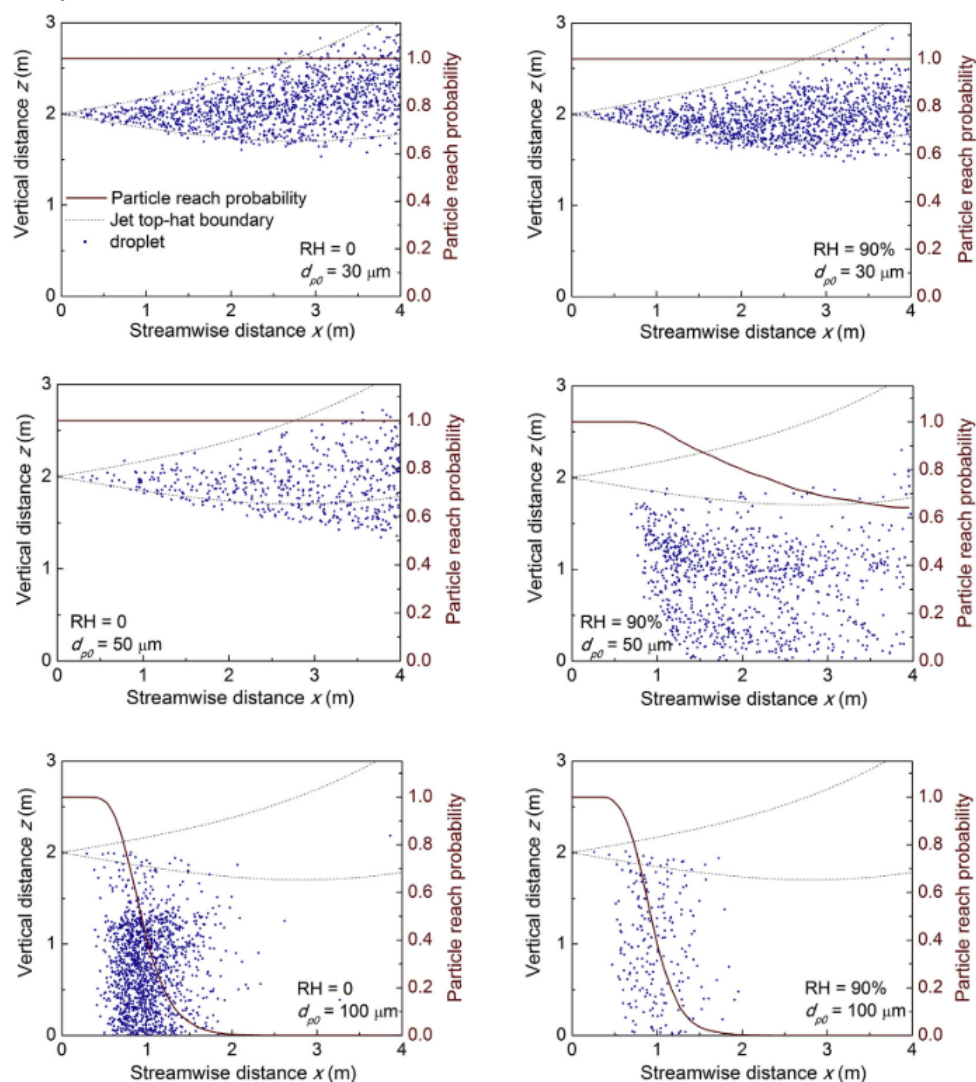
Met hoesten wordt meteen in de eerste 30 cm een grote snelheid meegegeven aan de deeltjes. Zhu et al. heeft in een experiment de onderstaande foto gemaakt waarin een deelnemer een tracermateriaal weghoest. Na de eerste 30 cm viel de wolk uiteen en verspreidde deze zich terwijl de snelheid afnam. De tracer werd 2 m verder nog in beperkte mate gevonden.



Figuur 18. Visualisatie van deelnemer die hoest (Zhu, Kato, & Yang, 2006).

Buiten dit experiment zijn ook simulaties uitgevoerd door Zhu et al. Deeltjes van $30 \mu\text{m}$ verspreidden zich door de gehele gesimuleerde ruimte. Deeltjes van $50 - 200 \mu\text{m}$ werden door de zwaartekracht beïnvloed en sloegen neer op het dichtstbijzijnde oppervlak (Zhu et al., 2006).

Figuur 19 laat het resultaat van een simulatie zien uit de studie van Wei & Li waarbij meerdere grotere deeltjes en de baan die zij afleggen zijn gesimuleerd. De deeltjes met grootte $100\text{ }\mu\text{m}$ slaan neer op de grond rond de 1 m afgelegde horizontale afstand. De deeltjes ($10\text{ }\mu\text{m}$) kunnen meerdere meters in de lucht blijven zweven. De figuur laat ook zien dat bij een hogere relatieve vochtigheid de deeltjes minder snel verdampen. De reden dat er in de simulatie met hogere luchtvochtigheid minder deeltjes afgebeeld zijn is omdat deze deeltjes een kortere tijd in de lucht verblijven en sneller neerslaan.



Figuur 19. Berekende horizontale afstand die drie deeltjesgroottes ($30\text{ }\mu\text{m}$, $50\text{ }\mu\text{m}$, $100\text{ }\mu\text{m}$) afleggen bij het simuleren van een kuch ($t = 50\text{ s}$ voor $30\text{ }\mu\text{m}$, $t = 200\text{ s}$ voor $50\text{ }\mu\text{m}$ en $100\text{ }\mu\text{m}$). Er is in de studie rekening gehouden met verdamping, de linkerkant is gesimuleerd bij een relatieve vochtigheid van 0% , de rechter bij 90% . Initiële snelheid is 10 m/s (Wei & Li, 2015).

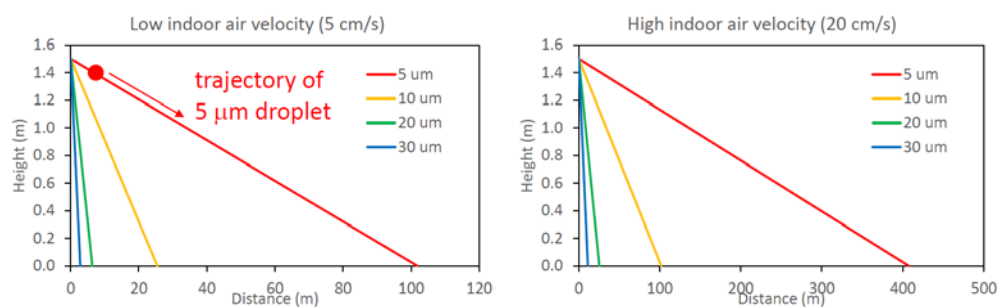
Invloed van horizontale luchtstroming binnen en buiten op horizontale afstand

Weerstations van het KNMI geven een beeld als het gaat om meetpunten op 10 m hoogte. Dan ligt de jaar gemiddelde windsnelheid op ongeveer 5 m/s en tijdens stormen kan dit oplopen tot gemiddeld 25 m/s . Indien je dit op $1,5\text{ m}$ zou willen bepalen kan dat voor het vrije veld berekend worden. In de gebouwde omgeving is dat door de bebouwing een stuk lastiger te bepalen. Bebouwing kan voor

afscherming zorgen alsmede voor versnelling van de wind en luchtsnelheden zijn daarom sterk locatieafhankelijk.

Luchtsnelheden die binnen verwacht kunnen worden liggen tussen de 0,1 en 0,2 m/s (Baldwin & Maynard, 1998). In de leefzone wordt vanwege comfortoverwegingen vereist dat de snelheid <0,2 m/s is, een uitschieter naar 0,24 m/s is toegestaan⁴. Lokaal zijn hogere snelheden ook mogelijk. Koudeval bij glasoppervlakken, dicht bij de inblaasvoorziening, dicht bij recirculatiesystemen zoals een ruimte airconditioner en dicht bij overstort voorzieningen zijn locaties waar hogere snelheden verwacht kunnen worden.

Figuur 20 laat de uitkomsten van de afgelegde horizontale afstand zien die deeltjes >5 µm kunnen afleggen bij luchtsnelheden die gangbaar zijn in binnenruimtes, ca. 0,2 m/s (Baldwin & Maynard, 1998). Bij een lage luchtsnelheid (0,05 m/s) kunnen druppels van 5 µm afstanden >100 m afleggen. Naarmate de deeltjesgrootte toeneemt worden de afgelegde horizontale afstanden kleiner. Voor een hogere luchtsnelheid zullen deeltjes grotere afstanden afleggen voordat ze neerslaan. Deze uitkomsten zijn gebaseerd op de valtijden vanaf 3 m voor verschillende deeltjesgroottes (Wells, 1934) en omgerekend naar een emissiehoogte van 1,5 m (L.C. Marr, correspondentie, 16-7-2020).



Figuur 20 Druppellocatie geëmitteerd van 1,5 m hoogte bij twee luchtsnelheden (0,05 m/s en 0,2 m/s). (L.C. Marr, correspondentie, 16-7-2020)

Aan de hand van deze figuur kan er voor gangbare luchtsnelheden in binnen- en buitencondities eenzelfde berekening gemaakt worden als in Figuur 20 welke ordegröte horizontale afstand grotere deeltjes kunnen afleggen indien ze zonder initiële snelheid worden geëmitteerd en zonder restricties als ruimtegröte.

⁴ NEN-EN-ISO 7730

Tabel 6. Berekende horizontale afstand voor gangbare luchtsnelheden binnen en voor de gemiddelde windsnelheid in Nederland (2019) voor deeltjesgroottes 5 μm , 10 μm , 20 μm en 100 μm (uitgangspunten: emissiehoogte 1,5 m, deeltjes hebben geen initiële snelheid, effect van verdamping is hierin niet meegenomen). De valtijd is bekend uit (Wells, 1934).

Luchtsnelheid (m/s)	Deeltjesgrootte (μm)				Toelichting luchtsnelheid
	5	10	20	100	
0,05	102 m	26 m	6 m	0,25 m	
0,10	204 m	51 m	12 m	0,5 m	binnencondities laag
0,20	408 m	102 m	24 m	1 m	binnencondities hoog
0,25	510 m	128 m	30 m	1,3 m	
3,15	6,4 km	1,6 km	378 m	16 m	Gemiddelde windsnelheid NL (2019) vrije veld ⁵

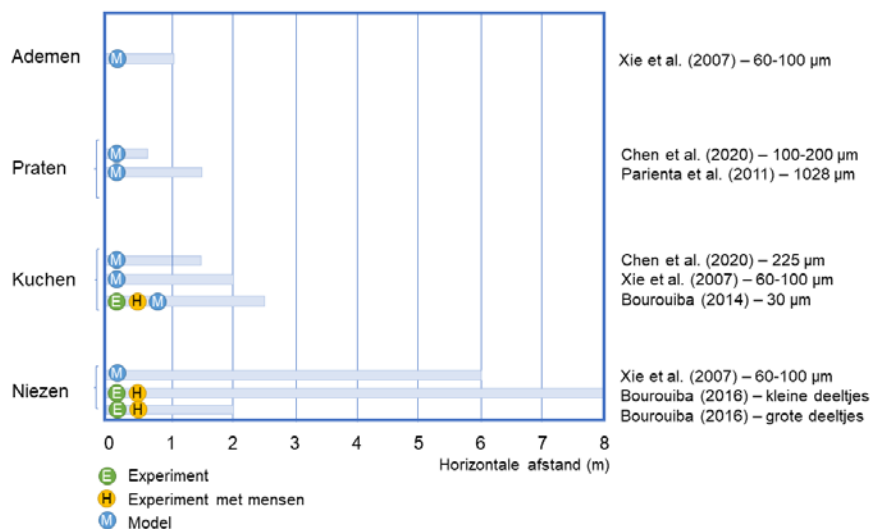
Samenvatting horizontale afstand

Figuur 21 geeft een grafisch overzicht van de uit verschillende studies gedestilleerde horizontale afstanden, vastgesteld in ruimtes zonder luchtstroming. Hierbij is een verdeling gemaakt in de respiratoire activiteiten ademen, praten, kuchen en niezen. Per afstand is aangegeven uit welke studie het afkomstig is, welke deeltjesgrootte het betreft en hoe de studie tot stand is gekomen.

Het overzicht laat zien dat voor deeltjes $>5 \mu\text{m}$ er bij activiteiten als praten, kuchen en niezen horizontale afstanden behaald kunnen worden van 1,5 m of meer voor zover op dit moment bekend is uit de literatuur. De hier gepresenteerde studies laten zien dat de verdeling van wat wordt verstaan onder grote en kleine deeltjes kan variëren per studie. De figuur presenteert de horizontale afgelegde afstand per gemeten of gemodelleerde deeltjesgrootte uit een bepaalde studie, dit zijn de afstanden tot een deeltje neerslaat op de grond. Niet voor elke studie is eenduidig welke horizontale afstand een bepaalde deeltjesgrootte aflegt. Dit kan komen doordat de grafiek vroegtijdig ophoudt of de gemodelleerde ruimtegeometrie niet toereikend is (Parianta et al., 2011).

Door onder andere verdamping kunnen deeltjes met een initiële diameter $>5 \mu\text{m}$ mogelijk langer in de lucht blijven zweven en onder invloed van luchtstroming verder komen dan 1,5 m (L. Liu et al., 2017; Schijven et al., 2020; Tellier et al., 2019). De relatieve vochtigheid kan met name voor deeltjes $<40 \mu\text{m}$ een groot effect hebben op de afstand die deze deeltjes afleggen. Hoe kleiner de deeltjes, hoe groter het effect. Voor ademen is een horizontale afstand van ongeveer 1 m berekend voor deeltjes van 60-100 μm . Bij praten kunnen grote deeltjes (1028 μm) een afstand van $<1 \text{ m}$ afleggen. Meerdere studies hebben berekeningen uitgevoerd om de horizontale afstand te bepalen van deeltjes geëmitteerd door kuchen. Voor zover bekend zijn de resultaten uit deze studies geldig voor situaties zonder extra aanwezige luchtstroming. Met deeltjesgroottes van 30-225 μm kunnen afstanden van 1,5 m tot 2,5 m behaald worden. Bij niezen behalen deeltjesgroottes van 60-100 μm horizontale afstanden van 6 m waarbij Bourouiba in haar experimentele studie grotere afstanden behaald met kleine deeltjes (8 m) en de grote deeltjes ongeveer 2 m afleggen. Bourouiba geeft helaas geen kwantificering voor de kleine en grote deeltjes (Bourouiba, 2016).

⁵ https://cdn.knmi.nl/knmi/map/page/klimatologie/gegevens/mow/jow_2019.pdf



Figuur 21. Overzicht van de horizontale afstand die deeltjes >60 µm afleggen die bij meerdere studies zijn bemeten (in laboratoriumsetting) en berekend (verdamping meegenomen en zonder luchtstroming). E, experimenten; H, menselijke deelnemers; M, modelleren.

In Figuur 20 en Tabel 6 zijn berekende horizontale afstanden gepresenteerd waarbij gangbare luchtsnelheden in binnenruimtes en de gemiddelde windsnelheid in Nederland over het jaar 2019 in het vrije veld zijn gebruikt om een inzicht te geven in de ordegrootte afstand die grote deeltjes kunnen afleggen. Daarbij is berekend dat deeltjes >5 µm horizontale afstanden groter dan de gangbare 1,5 m behalen. Indien de diameter van het deeltje toeneemt, neemt de horizontale afstand af en als de luchtsnelheid toeneemt zal de afgelegde horizontale afstand toenemen.

4 Conclusies

Deze literatuurstudie is uitgevoerd om de vraag ‘wat zijn de afstanden die deeltjes groter dan 5 µm kunnen afleggen bij verschillende wijze van productie (ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen)?’ te kunnen beantwoorden.

Om deze vraag te kunnen beantwoorden, is de deeltjesgrootteverdeling bij genoemde activiteiten, de snelheid van de verschillende deeltjesgroottes en de horizontale afstand die deeltjes kunnen afleggen onderzocht op basis van beschikbare literatuur.

Wat is de deeltjesverdeling van de geëmitteerde deeltjes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?

De onderzochte literatuur geeft geen eenduidige deeltjesgrootteverdeling voor de verschillende respiratoire activiteiten als ademen, praten, kuchen en niezen. Bij deze activiteiten komen ook deeltjes groter dan 5 µm vrij. In sommige studies zijn voor praten en kuchen voornamelijk deeltjes groter dan 5 µm gemeten, andere studies hebben juist hoofdzakelijk deeltjes kleiner dan 5 µm gemeten. Bij de activiteiten ademen, fluisteren, luid praten en zingen komen volgens enkele studies overwegend deeltjes van 5 µm en kleiner vrij. Sommige literatuur geeft voor praten en hoesten ook een verdeling met twee pieken (bimodaal). De tweede piek ligt dan bij deeltjes groter dan 100 µm.

De hoeveelheid deeltjes die vrijkomt verschilt ook per activiteit. Bij praten is de concentratie hoger dan bij ademen. Als het volume toeneemt, neemt ook de concentratie deeltjes toe.

Wat is de snelheid van de verschillende deeltjesgroottes bij ademen, praten, schreeuwen, zingen, hoesten, niezen?

De literatuur geeft voor de snelheid waarmee deeltjes worden uitgestoten de volgende waarden aan:

- ademen: 0,58-5 m/s
- praten: 3,1-3,9 m/s,
- kuchen: 2-22 m/s
- niezen: 10-50 m/s.

Er wordt een verschil in deze snelheid gegeven voor mannen en vrouwen waarbij mannen vaker een hogere snelheid produceren.

Wat is de horizontale afstand die de verschillende deeltjesgroottes bij verschillende respiratoire activiteiten kunnen afleggen en wat is het effect van binnen- en buitenluchtsnelheden op de afstand die deeltjes kunnen afleggen?

Verdamping en luchtstroming hebben invloed op de afstand die deeltjes kunnen afleggen. Relatieve vochtigheid kan met name voor deeltjes kleiner dan 40 µm een groot effect hebben op de afstand die deze deeltjes afleggen. Hoe kleiner de

deeltjes, hoe groter het effect. Door verdamping van het vocht neemt de afmeting af en kan de horizontale afstand die ze afleggen toenemen. Luchtstroming is belangrijk voor de afstand die deeltjes afleggen. Vooral kleinere deeltjes kunnen door luchtstroming verder worden meegevoerd. En in een ruimte waarin veel mensen aanwezig zijn met weinig ventilatie, kan een wolk met uitgeademde lucht met een hoge concentratie deeltjes langer in stand blijven.

Uit de literatuur volgt dat deeltjes groter dan 5 μm bij activiteiten als praten, kuchen en niezen horizontale afstanden kunnen afleggen van 1,5 m of meer. Deze afstanden worden gehaald als het kuchen of niezen onbelemmerd plaatsvindt. Op basis van de valtijden van deeltjesgroottes 5 μm , 10 μm , 20 μm en 100 μm is berekend welke horizontale afstanden deeltjes kunnen afleggen. Uitgangspunt voor de berekening is dat de luchtstroming horizontaal is en er geen beperking in ruimtegrootte is. Deeltjes van 5 μm , 10 μm en 20 μm kunnen volgens deze berekening de afstand van 1,5 m ruim overschrijden bij gangbare binnenluchtsnelheden (0,05-0,25 m/s). Hoe groter het deeltje, hoe kleiner de horizontale afgelegde afstand. Voor deeltjes van 100 μm is de horizontale afstand onder binnencondities minder dan 1,5 m, uitgaande van een maximale luchtsnelheid van 0,25 m/s. Bij een luchtsnelheid van 0,2 m/s is de berekende afgelegde afstand 1 m, bij 0,1 m/s is de afgelegde afstand 0,5 m en bij een lage luchtsnelheid van 0,05 m/s is de afstand 0,25 m. Buiten met wind is het voor deeltjes van 100 μm echter mogelijk om afstanden meer dan 1,5 m af te leggen. Indien luchtstroming aanwezig is, kan dit dus effect hebben op de afstand die deeltjes afleggen. Gangbare horizontale luchtsnelheden binnen kunnen de afstand die deeltjes groter dan 5 μm afleggen vergroten en resulteren dan in een horizontale afstand groter dan 1,5 m.

5 Referenties

- Ai, Z., Hashimoto, K., & Melikov, A. K. (2019). Influence of pulmonary ventilation rate and breathing cycle period on the risk of cross-infection. *Indoor Air*, 29(6), 993–1004. <https://doi.org/10.1111/ina.12589>
- Asadi, S., Wexler, A. S., Cappa, C. D., Barreda, S., Bouvier, N. M., & Ristenpart, W. D. (2019). Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Scientific Reports*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
- Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-silva, C. L., Jensen, P., & Li, Y. (2009). *WHO Report: Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings Edited by:*
- Baldwin, P. E. J., & Maynard, A. D. (1998). A Survey of Wind Speeds in Indoor Workplaces. *The Annals of Occupational Hygiene*, (February 2016). <https://doi.org/10.1093/annhyg/42.5.303>
- Bourouiba, L. (2016). A sneeze. *New England Journal of Medicine*, 375(8), e15. <https://doi.org/10.1056/NEJMicm1501197>
- Bourouiba, L. (2020). *Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19*. 1–2. <https://doi.org/10.1001/jama.2020.4756>
- Bourouiba, L., Dehandschoewercker, E., & Bush, J. W. M. (2014). Violent expiratory events: On coughing and sneezing. *Journal of Fluid Mechanics*, 745, 537–563. <https://doi.org/10.1017/jfm.2014.88>
- Cao, G., Liu, S., Boor, B. E., & Novoselac, A. (2015). Characterizing the dynamic interactions and exposure implications of a particle- laden cough jet with different room airflow regimes produced by low and high momentum jets. *Aerosol and Air Quality Research*, 15(5), 1955–1966. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2015.03.0146>
- Chao, C. Y. H., Wan, M. P., Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., ... Katoshevski, D. (2009). Characterization of expiration air jets and droplet size distributions immediately at the mouth opening. *Journal of Aerosol Science*, 40(2), 122–133. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.10.003>
- Chen, W., Zhang, N., Wei, J., Yen, H. L., & Li, Y. (2020). Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. *Building and Environment*, 176(March), 106859. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
- Dhand, R., & Li, J. (2020). Coughs and Sneezes: Their Role in Transmission of Respiratory Viral Infections, Including SARS-CoV-2. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 1–37. <https://doi.org/10.1164/rccm.202004-1263PP>
- Doremalen, N. van, Bushmaker, T., Morris, D. H., Holbrook, M. G., Gamble, A., & Williamson, B. N. (2020). Aerosol and Surface Stability of SARS-CoV-2 as Compared with SARS-CoV-1. *The New England Journal of Medicine*, 1–3. <https://doi.org/10.1056/NEJMc2004973>
- Duguid, J. P. (1946). The size and the duration of air-carriage of respiratory droplets and droplet-nuclei. *Journal of Hygiene*, 44(6), 471–479. <https://doi.org/10.1017/S0022172400019288>
- Fabian, P., McDevitt, J. J., DeHaan, W. H., Fung, R. O. P., Cowling, B. J., Chan, K. H., ... Milton, D. K. (2008). Influenza virus in human exhaled breath: An observational study. *PLoS ONE*, 3(7), 5–10. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0002691>
- Fears, A. C., Klimstra, W. B., Duprex, P., Hartman, A., Weaver, S. C., Plante, K. S., ... Roy, C. J. (2020). Comparative dynamic aerosol efficiencies of three

- emergent coronaviruses and the unusual persistence of SARS-CoV-2 in aerosol suspensions. *MedRxiv*, 2, 2020.04.13.20063784. <https://doi.org/10.1101/2020.04.13.20063784>
- Feng, Y., Marchal, T., Sperry, T., & Yi, H. (2020). Influence of wind and relative humidity on the social distancing effectiveness to prevent COVID-19 airborne transmission: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*, 147(April), 105585. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105585>
- Gupta, J. K., Lin, C. H., & Chen, Q. (2009). Flow dynamics and characterization of a cough. *Indoor Air*, 19(6), 517–525. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2009.00619.x>
- Johnson, G. R., Morawska, L., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Chao, C. Y. H., ... Corbett, S. (2011). Modality of human expired aerosol size distributions. *Journal of Aerosol Science*, 42(12), 839–851. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2011.07.009>
- Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Hong, L., Liang, P., ... Kang, M. (2020). Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *MedRxiv*, 2020.04.16.20067728. <https://doi.org/10.1101/2020.04.16.20067728>
- Lindsley, W. G., Pearce, T. A., Hudnall, J. B., Davis, K. A., Davis, S. M., Fisher, M. A., ... Beezhold, D. H. (2012). Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, 9(7), 443–449. <https://doi.org/10.1080/15459624.2012.684582>
- Liu, L., Li, Y., Nielsen, P. V., Wei, J., & Jensen, R. L. (2017). Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air*, 27(2), 452–462. <https://doi.org/10.1111/ina.12314>
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, N. K., ... Lan, K. (2020). Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*, 582(March). <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2271-3>
- Liu, Y., Ning, Z., Chen, Y., Guo, M., Liu, Y., Gali, N. K., ... Lan, K. (2020). Aerodynamic Characteristics and RNA Concentration of SARS-CoV-2 Aerosol in Wuhan Hospitals during COVID-19 Outbreak. *BioRxiv*, 86(21), 2020.03.08.982637. <https://doi.org/10.1101/2020.03.08.982637>
- Loh, N. H. W., Tan, Y., Taculod, J., Gorospe, B., Teope, A. S., Somani, J., & Tan, A. Y. H. (2020). The impact of high-flow nasal cannula (HFNC) on coughing distance: implications on its use during the novel coronavirus disease outbreak. *Canadian Journal of Anesthesia*, 67(7), 893–894. <https://doi.org/10.1007/s12630-020-01634-3>
- Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., Corbett, S., ... Katoshevski, D. (2009). Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *Journal of Aerosol Science*, 40(3), 256–269. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2008.11.002>
- Morawska, Lidia. (2005). Droplet fate in indoor environments, or can we prevent the spread of infection? *Proceedings of Indoor Air 2005*, (4-9 September). Beijing.
- Papineni, R. S., & Rosenthal, F. S. (1997). The size distribution of droplets in the exhaled breath of healthy human subjects. *Journal of Aerosol Medicine: Deposition, Clearance, and Effects in the Lung*, 10(2), 105–116. <https://doi.org/10.1089/jam.1997.10.105>
- Parianta, D., Morawska, L., Johnson, G. R., Ristovski, Z. D., Hargreaves, M., Mengersen, K., ... Katoshevski, D. (2011). Theoretical analysis of the motion and evaporation of exhaled respiratory droplets of mixed composition. *Journal of Aerosol Science*, 42(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.10.005>
- Schijven, J., Vermeulen, L. C., Swart, A., Meijer, A., Duizer, E., Maria, A., & Husman, D. R. (2020). *Exposure assessment for airborne transmission of SARS-CoV-2 via breathing, speaking, coughing and sneezing*.

- Somsen, G. A., Rijn, C. Van, Kooij, S., Bem, R. A., & Bonn, D. (2020). Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission. *The Lancet Respiratory*, 2600(20), 9–10. [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9)
- Stadnytskyi, V., Bax, C. E., Bax, A., & Anfinrud, P. (2020). *The airborne lifetime of small speech droplets and their potential importance in SARS-CoV-2 transmission*. 3–5. <https://doi.org/10.1073/pnas.2006874117>
- Tellier, R., Li, Y., Cowling, B. J., & Tang, J. W. (2019). Recognition of aerosol transmission of infectious agents: A commentary. *BMC Infectious Diseases*, 19(1), 1–9. <https://doi.org/10.1186/s12879-019-3707-y>
- Vuorinen, V., Aarnio, M., Alava, M., Alopaeus, V., Atanasova, N., Auvinen, M., ... Österberg, M. (2020). Modelling aerosol transport and virus exposure with numerical simulations in relation to SARS-CoV-2 transmission by inhalation indoors. *Safety Science*, 130(June), 104866. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2020.104866>
- Wei, J., & Li, Y. (2015). Enhanced spread of expiratory droplets by turbulence in a cough jet. *Building and Environment*, 93(P2), 86–96. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.018>
- Wei, J., & Li, Y. (2016a). Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *American Journal of Infection Control*, 44(9), S102–S108. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.06.003>
- Wei, J., & Li, Y. (2016b). Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *American Journal of Infection Control*, 44(9), S102–S108. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2016.06.003>
- Wells, W. F. (1934). On airborne infection: study II. Droplets and droplet nuclei. *American Journal of Epidemiology*, 20(3), 611–618. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aje.a118097>
- WHO. (2020). Report of the WHO-China Joint Mission on Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). *Who*, 2019(February), 16–24.
- World Health Organization (WHO). (2020). Modes of transmission of virus causing COVID-19: implications for IPC precaution recommendations. *Scientific Brief 29 March 2020*, (March), 1–3. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa2001316.5>
- Xie, X., Li, Y., Chwang, A. T. Y., Ho, P. L., & Seto, W. H. (2007). How far droplets can move in indoor environments. *Indoor Air*, 17, 211–2256. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2006.00469.x>
- Xu, C., Nielsen, P. V., Gong, G., Liu, L., & Jensen, R. L. (2015). Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects. *Indoor Air*, 25(2), 188–197. <https://doi.org/10.1111/ina.12129>
- Xu, Y., Li, X., Zhu, B., Liang, H., Fang, C., Gong, Y., ... Gong, S. (2020). Characteristics of pediatric SARS-CoV-2 infection and potential evidence for persistent fecal viral shedding. *Nature Medicine*. <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0817-4>
- Yang, S., Lee, G. W. M., Chen, C. M., Wu, C. C., & Yu, K. P. (2007). The size and concentration of droplets generated by coughing in human subjects. *Journal of Aerosol Medicine: Deposition, Clearance, and Effects in the Lung*, 20(4), 484–494. <https://doi.org/10.1089/jam.2007.0610>
- Zhu, S. W., Kato, S., & Yang, J. H. (2006). Study on transport characteristics of saliva droplets produced by coughing in a calm indoor environment. *Building and Environment*, 41(12), 1691–1702. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.06.024>

6 Ondertekening

Delft, 19 augustus 2020

TNO



Ir. A.C. Westerlaken
Research Manager



Karin Kompatscher
Roberto Traversari
Auteurs

A Zoekstrategie literatuurstudie

A.1 Databases

De volgende databases zijn gebruikt bij het verzamelen van publicaties middels zoektermen:

Pubmed (<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>)
Scopus (<https://www.scopus.com/>)
Google Scholar (<https://scholar.google.com/>)

De volgende websites zijn gebruikt voor het verzamelen van publicaties:

WHO (<https://www.who.int/health-topics/coronavirus>)
RIVM (<https://www.rivm.nl/>)
RKI (<https://www.rki.de/>)
Fraunhofer (<https://www.covid19-knowledgespace.de/>)

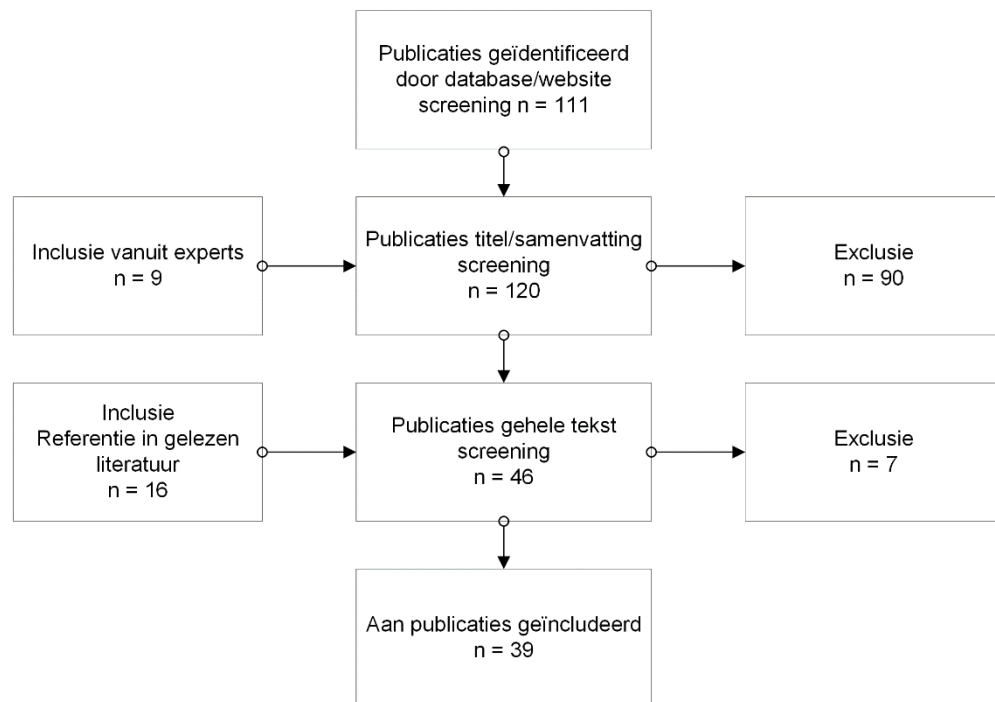
A.2 Zoektermen

Aan de hand van negen onderwerpen zijn zoektermen gevonden die al veel voorkomen in literatuur die bekend was bij de auteurs of later zijn toegevoegd bij blijk van waarde. De zoektermen zijn vervolgens omgevormd tot zoekstrings om in de verschillende databases publicaties te vinden. In de databases zijn meerdere zoekstrings gecombineerd om in een specifieke richting te zoeken (zie Tabel 7). Figuur 22 geeft de zoekstrategie in een overzicht weer.

Buiten het verzamelen van literatuur via online databases is gebruik gemaakt van de sneeuwbalmethode. Hierbij is gebruik gemaakt van de kennis van experts, gekeken naar bronnenlijsten uit gelezen literatuur en zijn specifieke websites (WHO, RIVM, RKI, Fraunhofer) doorzocht voor gepubliceerde studies.

Na het lezen van de gehele publicatie is op basis van de inhoud bekeken of de studie in deze literatuurstudie geïnccludeerd kon worden. Exclusie is gedaan op basis van een aantal randvoorwaarden:

- Studie benoemt geen deeltjesgrootte of afgelegde afstand;
- Simulatiestudie zonder validatiestudie;
- Literatuur is niet in Engels, Nederlands, Duits of Italiaans gepubliceerd;
- Studie monitort alleen symptomen bij geïnfecteerde personen.



Figuur 22. Overzicht gevonden literatuur.

Tabel 7. Overzicht gebruikte zoektermen en -strings voor databases.

Theme	#	Searchstring
ALL	1	("Droplet size distribution" OR "Infective particles" OR "Droplet trajectory" OR "Droplet size" OR "Droplet range" OR "Particle trajectory" OR "Particle range" OR "Particle size" OR "Droplet nuclei" OR "Infective droplets" OR "Saliva" OR "Particle size distribution" OR "Mucus" OR "Aerosol" OR "Respiratory particles" OR "Respiratory droplets") AND ("Particle speed" OR "Particle production " OR "Semiballistic emission" OR "Speech super emitters" OR "Particle generation" OR "Distance") AND ("Breathing" OR "Whispering" OR "Speech" OR "Talking" OR "Shouting" OR "Singing" OR "Exhalation" OR "Coughing" OR "Sneezing" OR "Concentration" OR "Distribution") AND ("Building geometry" OR "Density" OR "Obstacles" OR "Surface") AND ("Air change rate" OR "Recirculation" OR "Air speed" OR "Flow rate " OR "Ventilation rate" OR "Mechanical ventilation" OR "Natural ventilation") AND ("Wind speed") AND ("Lying" OR "Standing" OR "Sitting" OR "Expiratory activities" OR "Walking" OR "Sports" OR "Workout") AND ("Precipitating particles" OR "Precipitation" OR "Depositing particles" OR "Deposit" OR "Distance") AND ("Aerosols" OR "Indirect transmission" OR "Surface transmission" OR "Inhalation" OR "Evaporation" OR "Dispersion" OR "Airborne")
Particles	2	"Droplet size distribution" OR "Infective particles" OR "Droplet trajectory" OR "Droplet size" OR "Droplet range" OR "Particle trajectory" OR "Particle range" OR "Particle size" OR "Droplet nuclei" OR "Infective droplets" OR "Saliva" OR "Particle size distribution" OR "Mucus" OR "Aerosol" OR "Respiratory particles" OR "Respiratory droplets"

Transmission route	3	"Aerosols" OR "Indirect transmission" OR "Surface transmission"
Source	4	OR "Inhalation" OR "Evaporation" OR "Dispersion" OR "Airborne"
		"Breathing" OR "Whispering" OR "Speech" OR "Talking" OR
		"Shouting" OR "Singing" OR "Exhalation" OR "Coughing" OR
		"Sneezing" OR "Concentration" OR "Distribution"
Indoor environment	5	"Particle speed" OR "Particle production " OR "Semiballistic emission" OR "Speech super emitters" OR "Particle generation" OR "Distance"
Indoor environment	6	"Building geometry" OR "Density" OR "Obstacles" OR "Surface"
Ventilation	7	"Air change rate" OR "Recirculation" OR "Air speed" OR "Flow rate " OR "Ventilation rate" OR "Mechanical ventilation" OR "Natural ventilation"
Outdoor environment	8	"Wind speed"
Activity	9	"Lying" OR "Standing" OR "Sitting" OR "Expiratory activities" OR "Walking" OR "Sports" OR "Workout"
Miscellaneous	10	"Precipitating particles" OR "Precipitation" OR "Depositing particles" OR "Deposit" OR "Distance" OR "Emission"
	11	#2+#3+#4
	12	#11+#5+#9
	13	#11+#9+#10

B Overzicht karakteristieken van deeltjes gevonden in de literatuur

Tabel 8. Overzicht van de karakteristieken snelheid, concentratie en diameter van deeltjes gevonden in de literatuur en verdeeld per respiratoire activiteit.

	ademen	fluisteren	praten	luid praten/ schreeuwen	zingen	kuchen/ hoesten	niezen	gemeten range ⁶	range apparatuur ⁷	referentie
snelheid (m/s)	1					10	20-50			(Xie et al., 2007)
	0,61-1,6									(Ai et al., 2019)
	0,64-1,5									
	0,58									(Y. Xu et al., 2020)
	0,81									
	1,03									
	1-5									
						2-7				(Gupta et al., 2009)
										(Somsen et al., 2020)
			3,9 (3,6 – 4,6)			6-22				(Chen et al., 2020)
concentratie (cm-3)			3,1			11,7				(Chao et al., 2009)
							10-30			(Bourouiba, 2020)
	0,098	0,130	0,322		1,01	0,68				(L. Morawska et al., 2009)
	0,03	0,07	0,19	0,32						(Asadi et al., 2019)
			0,61			0,22				(Johnson et al., 2011)

⁶ Bereik waarin daadwerkelijk deeltjes zijn gemeten

⁷ Bereik waarin de meetinstrumenten kunnen meten

	ademen	fluisteren	praten	luid praten/ schreeuwen	zingen	kuchen/ hoesten	niezen	gemeten range ⁶	range apparatuur ⁷	referentie
			0,004- 0,223			2,4-5,2				(Chao et al., 2009)
diameter (µm) ^a						8,35		0,62-15,9	0,62-15,9	(Yang et al., 2007)
	<1		<1			<1		0,3-1	0,3 - 2,5	(Papineni & Rosenthal, 1997)
	0,3 - 0,499**							0,3-0,499	0 - ≥5	(Fabian et al., 2008)
			16			13,5		1-2000	2-2000	(Chao et al., 2009)
			8-16**			8-16**	4-8	1-1000	0-2000	(Duguid, 1946)
			8			8, 400*		1-10, 100-1000	1-1000	(Somsen et al., 2020)
	0,8	0,95	1	1,05				0,3-20	0-20	(Asadi et al., 2019)
			2, 150*			2, 100*		0,9-800	1-1000	(Johnson et al., 2011)
	≤0,8	≤0,8	≤0,8		≤0,8	≤0,8		0,35-9	0,4-20	(L. Morawska et al., 2009)
						0,37, 0,6*		gevonden range	0,35-10	(Lindsley et al., 2012)

* Bimodale verdeling waarbij twee pieken zijn gevonden in de deeltjesverdeling.

** Meest voorkomende waarde zit in een stapsgewijze verdeling.

^a Indien de meest voorkomende waarde niet in de tekst expliciet genoemd is, is deze vanuit de desbetreffende figuur met verdeling afgeleid.