

Anniina Hoilijoki

KORONAVIRUSTA KULJETTAVAN HENGITYSAEROSOLIN LEVIÄMINEN SISÄTILASSA

Tartuntariskin tarkastelu

Kandidaatintyö
Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Tarkastajat: Prof. Miikka Dal Maso
Toukokuu 2022

TIIVISTELMÄ

Anniina Hoilijoki: Koronavirusta kuljettavan hengitysaerosolin leviäminen sisätilassa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Teknis-luonnontieteellinen tutkinto-ohjelma
Toukokuu 2022

Loppuvuodesta 2019 alkunsa saanut COVID-19-pandemia on runsaan levinneisyytensä vuoksi herättänyt mielenkiintoa tutkia viruksen leviämistä aerosolivälitteisesti. Leviäminen aerosolivälitteisesti tarkoittaa viruksen kulkemista ilmateitse sellaisten pienhiukkasten välityksellä, jotka ovat peräisin tartuttajan hengityselimistöstä. Tässä työssä on tarkasteltu virusta kantavien pienhiukkasten leviämistä sisätilassa turbulenttina diffuusiona. Diffuusiota on kuvattu Gaussisella mallilla, jonka avulla arvioitiin pienhiukkasen pitoisuutta ajan ja paikan funktiona.

Työn teoriaosassa on keskitytty tarkastelemaan Gaussiseen malliin liittyviä termejä. Mallinuosassa on arvioitu riskejä COVID-19-tartunnan saamiselle Gaussisen mallin mukaisten pitoisuuksien ja Wells-Riley-yhtälön avulla. Tartuntariskejä on laskettu erilaisissa skenaarioissa, joiden tarkoituksena on havainnollistaa tiettyjen parametrien muuttamisen vaikutusta. Gaussisen mallin antamia riskejä on verrattu tasaisesti sekoittuneen mallin antamiin riskeihin. Tasaisesti sekoituneessa mallissa nimensä mukaan oletetaan, että viruspitoisuus huoneessa on tasaista, eikä se siten riipu tarkasteltavasta kohdasta.

Mallinnuksesta huomataan, että esimerkiksi etäisyys tartuttajaan, tilassa vietetty aika ja ilmanvaihtuvuus ovat tartuntariskiä oleellisesti vaikuttavia tekijöitä. Mallinnuksessa haasteena on tartuttajan tuottaman virusmäärän suuri variaatio, sillä esimerkiksi puhuessa virustuotto voi olla moninkertainen verrattuna pelkän hengityksen tuottamaan viruskuormaan. Myös tarkasteltavan tilan dimensioilla on vaikutus siihen, kuinka paljon viruspitoisuus ilmassa laimenee. Virusta kantavan hiukkasen koolla puolestaan on vaikutus hiukkasen depositioon, eli siihen kauanko hiukkanen pysyy tilan ilmassa ja sitä kautta voi toimia tartuttajana.

Avainsanat: Diffuusio, Gaussinen malli, Aerosolivälitteinen tartunta, Tartuntariski

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Haluaisin esittää kiitokset aiheen pariin ohjaamisesta Prof. Jyrki Mäkelälle ja työn kanssa opastamisesta ja kannustamisesta ohjaajalleni Prof. Miikka Dal Masolle.

Tampereella, 10. toukokuuta 2022

Anniina Hoilijoki

SISÄLLYSLUETTELO

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Johdanto | 1 |
| 2. | Teoria | 3 |
| 2.1 | Koronaviruksen leviäminen aerosolien kautta | 3 |
| 2.2 | Ilmanvaihdon ja deposition vaikutus pitoisuuteen | 3 |
| 2.3 | Tasaisesti sekoittunut tila | 4 |
| 2.4 | Hengityspilven leviäminen ympäristöön | 5 |
| 2.4.1 | Diffuusio | 6 |
| 2.4.2 | Gaussinen malli | 7 |
| 2.5 | Tartuntariski | 8 |
| 3. | Mallinnus | 11 |
| 3.1 | Mallinnettavat tilanteet | 11 |
| 3.2 | Riski Gaussisen mallin mukaan | 13 |
| 4. | Hiukkasten koon vaikutus | 25 |
| 5. | Yhteenveto | 27 |
| | Lähteet | 29 |

MERKINNÄT

| | |
|-----------|----------------------------|
| λ | Keskimääräinen vapaa matka |
| ν | Ilman viskositeetti |
| ρ | Pienhiukkasen tiheys |
| A | Deposioala |
| a | Ilmanvaihtokerroin |
| c | Pitoisuus |
| C_c | Cunninghamin korjaustermi |
| d | Hiukkasen halkaisija |
| g | Putomaiskiihtyvyys |
| K | Diffuusiokerroin |
| k_B | Boltzmannin vakio |
| N | Hiukasmäärä |
| Q | Hiukkastuotto |
| r | Etäisyys hiukkaslähteeseen |
| R_x | Heijastustermi |
| T | Lämpötila |
| t | Aika |
| V | Tilavuus |
| w_d | Depositionopeus |

1. JOHDANTO

SARS-CoV-2-viruksen aiheuttama COVID-19-pandemia on levinnyt ympäri maailman nopeasti. Maailmanlaajuisesti tartuntoja on vuoden 2022 helmikuuhun mennessä todettu 376 miljoonaa ja viruksen aiheuttamaan tautiin on menehtynyt yli 5,6 miljoonaa ihmistä (ECDC 2022). Pandemian myötä viruksen leviämismekanismien ja tartuntariskien tutkiminen on noussut ajankohtaiseksi. Arvioituihin riskeihin pohjautuen voidaan laatia suosituksia muun muassa turvaväleistä, maskien käytöstä ja yleisörajoituksista. Tällaisilla keinoilla pystytään torjumaan nykyisen koronapandemian leviäminen sekä hallitsemaan tulevia epidemioita.

SARS-CoV-2-viruksen leviämistavat voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin:

1. Pisaratartunta
2. Aerosolitartunta
3. Kosketustartunta

Pisaratartuntaa pidetään koronaviruksen pääasiallisena leviämistapana. (Wang et al. 2021; WHO 2020) Virusta sisältäviä pisaroita syntyy, kun tartunnan saanut henkilö yskii tai aivastaa. Pisarat ovat halkaisijaltaan suurempia kuin 5–10 μm eli sen verran isoja, että ne voidaan havaita silmin (vrt. hius noin 80 μm). Suuren kokonsa vuoksi hiukkasten laskeutuminen alas maahan tai ympäröiville pinnoille on melko nopeaa, jolloin vaikutusmatka jää lyhyeksi, usein alle 2 m. (Zuo et al. 2020)

Vaikka pisarat laskeutuvat ilmasta pinnoille, ne voivat sisältää elinkykyisiä viruksia useita tunteja tai jopa päiviä, olosuhteista riippuen. Koskemalla tällaista pintaa on mahdollista kuljettaa virusta käsien kautta suuhun. SARS-CoV-2:n oletetaan muiden koronavirusten tavoin pystyvän leviämään myös pinnoilta, vaikka kosketustartunnasta ei ole suoranaista näyttöä. (WHO 2020)

Aerosolivälitteisessä tartunnassa virus leviää pienten, perinteisen määritelmän mukaan alle $5 \mu\text{m}$:n kokoisten hiukkasten välityksellä. Toisin kuin isot pisarat, aerosolit pysyvät ilmassa pidempiä aikoja ja leviävät usein laajemmalle. (Zuo et al. 2020)

Koronapandemian alussa aerosolitartuntaa ei pidetty todennäköisenä. On kuitenkin raportoitu tapauksia, joissa joukko ihmisiä on saanut tartunnan, vaikka samassa tilassa ei ole ollut oirehtivaa, pisaroita levittävää henkilöä. Esimerkiksi Hong Kongissa 2003 SARS-CoV levisi kerrostaloasuntojen välillä viemäriputkistoja pitkin (Stein 2003). Tuoreemmassa tapauksessa vuonna 2020 Washingtonissa 45 kuorolaulajaa 60:stä sai COVID-19-tartunnan harjoituksissa, vaikka joukossa ei tietävästi ollut oirehtivia ihmisiä (Read 2020). Tämän kaltaiset tapaukset lisäävät kiinnostusta tutkia aerosolien roolia koronaviruksen leviittäjinä.

Tässä työssä keskitytään tarkastelemaan viruksen leviämistä hengitysaerosolien kautta huonetilassa, jossa on oleillut COVID-19-tartunnan saanut henkilö. Henkilö tuottaa ilmaan virusta kantavia pienhiukkasia, jotka vähitellen deponoituvat tai poistuvat ilmanvaihdon kautta. Virusaerosolille lasketaan pitoisuuksia erilaisissa tilanteissa ja pitoisuuden perusteella lasketaan riski tartunnan saamiselle tilasta.

Luvussa 3 riskiä lasketaan kahdella erilaisella mallilla. Ensimmäisessä mallissa tilassa oleva ilma oletetaan täysin sekoittuneeksi, toisessa käytetään Gaussista mallia, johon on olemassa valmis MATLAB-funktio. Gaussisella mallilla pyritään ottamaan huomioon uloshengityksen pilvimäinen muoto, jossa viruksen tiheys on aluksi suurinta tartuttajan kohdalla. Tästä hengityspilvi levittäytyy ajan funktiona kauemmas tilaan, jossa sen sisältämät pienhiukkaset lopulta poistuvat ilmanvaihdon kautta tai laskeutuvat jollekin pinnalle. Luvussa 4 tarkastellaan vielä hiukkasen koon vaikutusta tartuntariskiin.

2. TEORIA

2.1 Koronaviruksen leviäminen aerosolien kautta

Aerosolin muodostaa jokin kaasu, yleensä ilma, ja siinä leijuvat nestemäiset tai kiinteät hiukkaset. Nämä pienhiukkaset, eli aerosoliytimet, ovat mikroskooppisia, kooltaan muutamasta nanometristä aina 100 μm :iin asti. (Zuo et al. 2020) Koko vaihtelee sen mukaan, paljonko ytimen ympärille on tiivistynyt vettä. Veden lisäksi aerosolihiukkanen voi kuljettaa mukanaan erilaisia yhdisteitä, kuten vaikka virioneja. Ne ovat virusta kuljettavia partikkeleita, jotka koostuvat proteiini-kuoresta ja sen sisällä olevasta RNA:sta tai DNA:sta (Britannica 2017).

Aerosolihiukkasia syntyy sekä luonnollisista lähteistä että ihmisen toiminnasta. Esimerkiksi palamisesta tai liikenteen päästöistä syntyvät pienhiukkaset ovat haitallisia terveydelle, sillä ne voivat aiheuttaa keuhkosityöpää, keuhko- ja sydänsairauksia sekä astman pahenemista (Lelieveld et al. 2015; Naeher et al. 2007). Myös bioperäiset aineet, kuten tässä työssä tarkasteltavat SAR-CoV-2-virukset, voivat levitä pienhiukkasten muodossa. Tällöin emittoija on toinen ihminen, joka tuottaa virioneita sisältävää aerosolia ympärilleen uloshengityksen, puhumisen, laulamisen, yskimisen tai aivastamisen kautta (Zuo et al. 2020).

2.2 Ilmanvaihdon ja deposition vaikutus pitoisuuteen

Tässä työssä tarkastellaan leviämistä sisätilassa, jossa virusaerosoleja tuotetaan ilmaan jollakin tuottonopeudella Q . Tällöin viruspitoisuutta tilassa pystytään kontrolloimaan ensisijaisesti ilmanvaihdon avulla: mitä suurempi ilman vaihtuvuus on, sitä enemmän viruspitoisuus laimenee.

Pitoisuuden muutosta jossakin tilassa voidaan kuvata lähde- ja nielutermeillä yksinkertaisen laatikkomallin avulla (Jacob 1999)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \sum \text{lähteet} - \sum \text{nielut} = N_i + E + P - N_o - L - D, \quad (2.1)$$

missä N_i on sisäänvirtaus, E emission tuottamat hiukkaset, P kemiallisten reaktioiden tuottamat hiukkaset, N_o ulosvirtaus, L kemiallisiin reaktioihin kuluvat hiukkaset ja D depositio. Tämän työn mallinnuksessa kemiallisten reaktioiden osuus voidaan olettaa mitättömäksi. Tilaan tulee hiukkasia vain emission kautta, kun tartunnan saanut henkilö tuottaa niitä. Hiukkasia poistuu ilmasta ilmanvaihdon ja deposition kautta.

Ilmanvaihdon vaikutus pitoisuuteen voidaan kirjoittaa osittaisdifferentiaaliyhtälönä

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -ac, \quad (2.2)$$

missä a on ilmanvaihtokerroin. Integroimalla puolittain yhtälön ratkaisuksi saadaan

$$c = c_0 \exp(-at), \quad (2.3)$$

missä c_0 on pitoisuus tarkastelun alussa hetkellä $t = 0$.

Depositioilla tarkoitetaan aerosolihiukkasten laskeutumista ilmasta pinnoille. Sitä kuvaa yhtälö

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -\frac{Aw_d}{V}c, \quad (2.4)$$

missä A on depositioala, V on tilan tilavuus ja w_d on depositionopeus. Tämän ratkaisuksi saadaan

$$c = c_0 \exp\left(-\frac{Aw_d}{V}t\right). \quad (2.5)$$

Depositioitermiä voidaan käyttää kuvaamaan sekä hiukkasten kiinnittymistä pinnoille että niiden maahan putoamista gravitaation vaikutuksesta. (Drivas et al. 1996)

2.3 Tasaisesti sekoittunut tila

Monissa tutkimuksissa, kuten Gammaitoni ja Nucci (1997) ja Vernez et al. (2021), virusaerosolin pitoisuutta kuvataan tasaisena. Tällöin oletetaan, että hiukkasia tulee huoneeseen tasaisesti joka kohtaan ja niitä yhtä lailla poistuu tasaisesti joka puolelta tilaa. Tasainen pitoisuus tilassa on hyvä approksimaatio silloin, kun hengityspilvi on jo jonkin aikaa ehtinyt levitä tilassa eikä aerosoleja emittoidu jatkuvasti lisää.

Pitoisuuden muutos tasaisesti sekoittuneessa tilassa voidaan kirjoittaa tuotto-, ilmanvaihto- ja depositioitermeien avulla

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{N}{V} - ac - \frac{Aw_d}{V}c, \quad (2.6)$$

missä N on tuotettujen virushiukkasten määrä (q). Pitoisuus tilassa muuttuu siis ai-noastaan ajan suhteen, ei paikan. Pitoisuuden ratkaiseminen analyttisesti yhtälöstä 2.6 on haastavaa, joten yksinkertaistuksen vuoksi tämän työn mallinnusosassa käytetään MATLAB-ohjelmistolla laskettuja numeerisia arvoja.

2.4 Hengityspilven leviäminen ympäristöön

Yksittäisen aerosolihiukkasen liikkumiseen vaikuttaa oleellisesti Stokesin lain mukainen rajanopeus

$$u_p = \frac{d_p^2 g \rho_p C_c}{18\eta} \quad (2.7)$$

eli nopeus, jolla hiukkanen putoaa maahan. Se saadaan laskettua ilmanvastuksen ja painovoiman yhteisvaikutuksesta. Kaavassa d_p on aerosolihiukkasen halkaisija, g putoamiskiintyvyys, ρ_p aerosolihiukkasen tiheys, C_c on Cunninghamin korjaustermi ja η on ilman viskositeetti. (Wang et al. 2021) Mitä pienempi hiukkanen on, sitä lähempänä se on ilman molekyylien kokoluokkaa, jolloin törmätessään hiukkaseen ilmamolekyylit ikään kuin luisuvat hiukkasen pintaa pitkin. Cunninghamin korjaustermi ottaa huomioon tästä johtuvan muutoksen ilmanvastuksessa. Ilmiö on erityisen merkittävää alle $1\mu\text{m}$ kokoisilla hiukkasilla. Cunninghamin korjaustermiä voidaan arvoida kaavalla

$$C_c = 1 + \frac{\lambda}{d} \left(2,34 + 1,05 \exp \left(-0,39 \frac{d}{\lambda} \right) \right), \quad (2.8)$$

missä d on hiukkasen halkaisija ja λ keskimääräinen vapaa matka. (Hinds 1999) Jälkimmäinen saadaan

$$\lambda = \frac{k_B T}{\sqrt{2} \pi p d^2}, \quad (2.9)$$

missä k_B on Boltzmannin vakio, T lämpötila ja p paine (S. Blundell ja K. Blundell 2009). Yhtälöstä (2.7) nähdään, että rajanopeus on verrannollinen hiukkasen halkaisijan neliöön, eli suurille hiukkasille putoaminen on merkittävästi nopeampaa kuin pienille hiukkasille.

Yskimisestä tai aivastamisesta syntyvät pisarat ovat usein sen verran suuria, että niiden putoamista voidaan kuvata täysin ballistisena, eli niillä on kaarimainen liikerata maahan. Gravitaation vaikutuksesta pisarat putoavat nopeasti maahan ja niiden tartuttavuus on suurinta lyhyillä etäisyyksillä. Aerosolytimet puolestaan ovat pisaroita pienempiä, eikä niihin vaikuta yhtä suuri gravitaatio ilmanvastukseen verrattuna. Tällöin niiden laskeutumis aika on huomattavasti pidempi, eli ne jäävät leijaillemaan ilmaan pidemmäksi aikaa. Uloshengityksessä emittoituneita aerosoleja voidaan siten kuvata paremmin laajenevana kaasupilvenä.

Hengityspilven leviämisen nopeuteen ja muotoon vaikuttaa muun muassa ympäristön ilmavirta, ilmankosteus, ilmanvaihto ja lämpötila (Wang et al. 2021). Tässä työssä aerosolipilven kaasumaista laajenemista kuvataan turbulenttina diffuusiona, jossa aerosoli pyrkii levittäytymään tasaisesti ympäröivään tilaan. Pilven mukana virus leviää sisätilan ilmaan, jolloin pienhiukkaset voivat toimia tartunnan välittäjinä.

2.4.1 Diffuusio

Yleisesti diffuusiota voidaan kuvata Fickin laeilla. Yksiulotteisessa tapauksessa Fickin ensimmäinen laki voidaan kirjoittaa

$$\Phi = -K \frac{\partial c}{\partial x}, \quad (2.10)$$

jossa Φ on diffuusion aiheuttama aerosolivuo, K on diffuusiokerroin, c aerosolihiukkasten konsentraatio ja x paikkakoordinaatti (S. Blundell ja K. Blundell 2009). Yhtälöstä nähdään, että vuo suuntautuu konsentraation gradienttia vastaan eli suuntaan, jossa konsentraatio on pienempi. Vuo pyrkii siis tasoittamaan pitoisuuseroja.

Fickin ensimmäisen lain (2.10) ja aineen säilymislain avulla saadaan johdettua Fickin toinen laki, joka kuvaa ajasta riippuvaa pitoisuuden muutosta

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}, \quad (2.11)$$

missä siis t on aika (S. Blundell ja K. Blundell 2009). Sama yhtälö voidaan kirjoittaa kolmiulotteisessa tilanteessa, jolloin saadaan niin kutsuttu ilmakehän diffuusioyhtälö

$$\frac{\partial c}{\partial t} = K \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right). \quad (2.12)$$

Ilmakehän diffuusioyhtälöä voidaan käyttää kuvaamaan aerosolin diffuusiota sisätilassa, kun advektio, eli ilman kulkeutuminen, oletetaan hyvin vähäiseksi. (Drivas et al. 1996)

Jos diffuusiokerroin K oletetaan vakioksi, pistemäisestä lähteestä äkillisesti emittoituvien hiukkasten konsentraatioksi ajanhetkellä t saadaan

$$c = \frac{Q}{8(\pi K t)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-r^2}{4Kt}\right), \quad (2.13)$$

missä Q on hiukkasmäärä ja r on etäisyys hiukkaslähteestä (Crank 1975). Yksinkertai-

nessa mallinnuksessa esimerkiksi aivastuksen tai yskäisyyn voidaan ajatella olevan äkillinen aerosolilähde. Myös yksittäinen uloshengitys voidaan kuvata äkillisenä lähteenä, mutta pidempää aikaväliä tarkasteltaessa on mielekkäämpää kuvata hengitystä jatkuvana lähteenä. Jatkuvan lähteen tuottama aerosolipitoisuus jollakin ajanhetkellä saadaan

$$c = \int_0^t \frac{Q}{8(\pi Kt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(\frac{-r^2}{4Kt}\right) dt, \quad (2.14)$$

eli integroimalla äkillisen lähteen tuottama pitoisuus ajan t yli.

2.4.2 Gaussinen malli

Gaussinen leviämismalli kuvaa pistemäisestä lähteestä emittoituvan aerosolin kulkua, jossa aerosoli leviää laajenevan pilven tapaan. Turbulentin diffuusion myötä pitoisuus vaihtelee ajan ja paikan mukaan. Malli on gaussinen, koska hengityspilven poikkileikkausprofiilissa pitoisuus oletetaan normaalijakautuneeksi.

Gaussisessa mallissa pitoisuus voidaan laskea kaavan (2.14) avulla lisäämällä siihen ilmanvaihtotermi (2.3) ja depositiotermi (2.5) sekä heijastustermit R_x , R_y ja R_z

$$c(x, y, z, t) = \frac{Q}{8(\pi Kt)^{\frac{3}{2}}} \exp\left(-at - \frac{Aw_d}{V}t\right) R_x R_y R_z. \quad (2.15)$$

Heijastustermit kuvaavat aerosolin kimpoamista pinnoista takaisin tulosuuntaan. Yhden ulottuvuuden heijastustermi on

$$R_x = \sum_{i=-\infty}^{\infty} \left[\exp\left(-\frac{(x + 2iL - x_0)^2}{4Kt}\right) + \exp\left(-\frac{(x + 2iL + x_0)^2}{4Kt}\right) \right], \quad (2.16)$$

missä L on huoneen koko kyseisessä dimensiossa, x_0 lähteen sijainti ja x paikkakoordinaatti. (Drivas et al. 1996)

Tämän työn mallinnusosiossa hyödynnetään Niko Leskisen (2016) kandidaatintyössään tekemiä MATLAB-funktioita, jotka laskevat emittoitujen pienhiukkasten pitoisuutta ajan ja paikan funktiona. Funktio perustuvat edellä kuvattuun Gaussiseen malliin. Parametreiksi funktiolle syötetään halutun tilan dimensiot ja tarkasteltava aikaväli, pienhiukkaslähteen ja tarkasteltavan pisteen koordinaatit, hiukkasten tuottonopeus, diffuusiokerroin, ilmanvaihtokerroin, depositionopeus ja emission kesto. Myös työn muu mallinnus on tehty MATLAB-ohjelmistolla.

Kuvissa 2.1 ja 2.2 on esimerkki leviämisestä huoneessa, jonka koko on 35 m^3 ja jossa lähde tuottaa hiukkasia huoneen reunalla 2 min ajan. Jälkimmäisessä kuvassa on poikki-leikkaus pitoisuudesta ylhäältä katsottuna. Kuvista nähdään leviävän pilven muoto Gaussisen mallin mukaan.

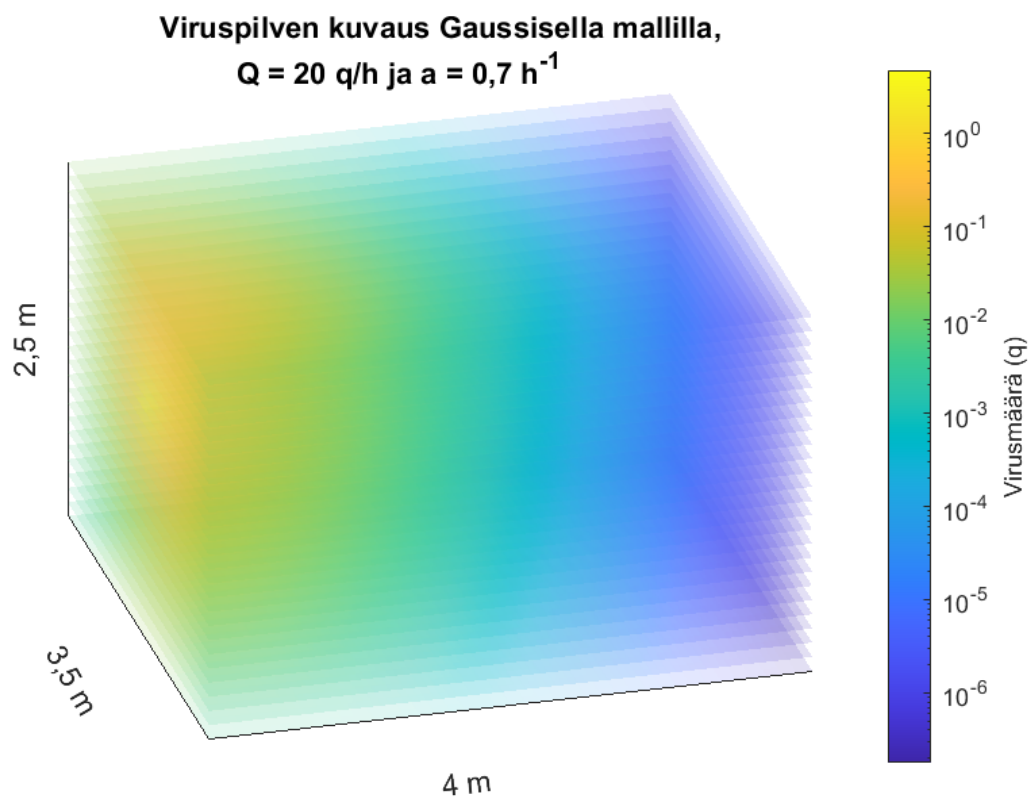
2.5 Tartuntariski

Viruksen määrän yksiköksi tässä työssä on määritetty viruskvantti (q). Yksi viruskvantti tarkoittaa sellaista määrää virusta, joka ilmateitse aiheuttaa tartunnan 63 % todennäköisyydellä (Buonanno et al. 2020). Kuvissa 2.1 ja 2.2 siis arvo $Q = 20 \text{ q/h}$ tarkoittaa, että tilassa oleva tartuttaja tuottaa hengityksensä kautta tunnissa yhteensä 20 tämän kokoista virusannosta ilmaan.

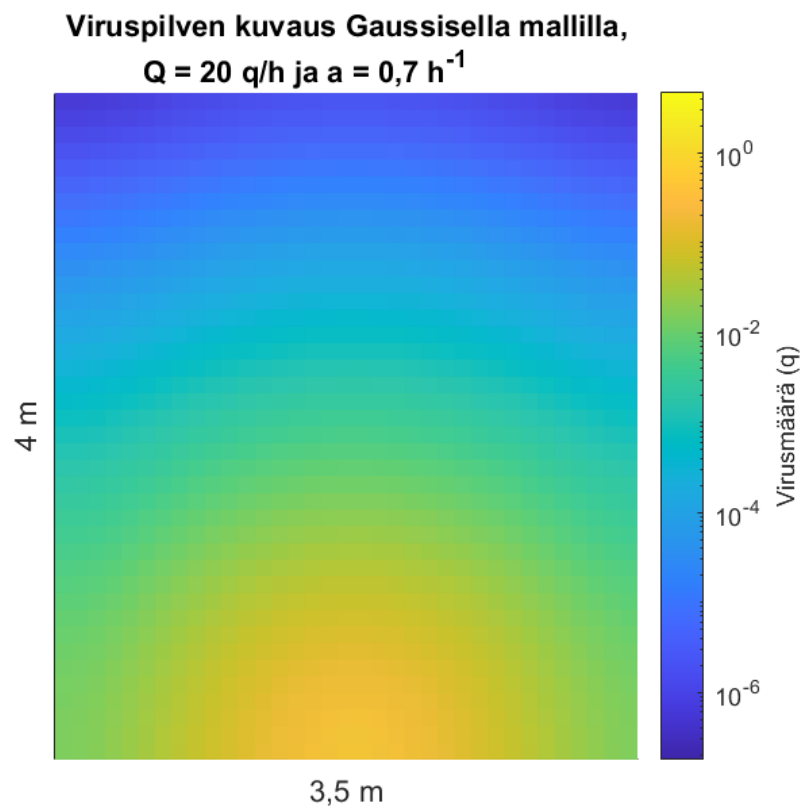
Tartuttajan tuottama virusannos leviää hengityspilvenä, jolloin virusta kulkeutuu ympäri tilaa. Tartunnan saamisen todennäköisyyttä jossakin kohtaa huonetta arvioidaan tässä työssä Wells-Riley-yhtälöllä

$$R = 1 - \exp(-N), \quad (2.17)$$

missä N on sisään hengitetty virusmäärä kvantteina (Riley et al. 1978). N saadaan laskettua Gaussisen mallin antaman pitoisuuden c ja tarkasteltavan henkilön hengityksen minuuttitilavuuden B_h avulla. Virusmäärä on kumulatiivinen, eli siihen pitää lisätä kaikki tarkasteltavaan ajanhetkeen t asti sisään hengitetty viruskvantit.



Kuva 2.1. Hengityspilven muoto Gaussisen mallin mukaan. Lähde on kuvassa vasemmassa reunassa. Tartuttaja hengittänyt huoneessa 2 min.



Kuva 2.2. Pilven leviäminen ylhäältä päin katsottuna. Lähde keskellä kuvan alareunassa

3. MALLINNUS

3.1 Mallinnettavat tilanteet

Mallinnettavissa tilanteissa jossakin tilassa on viruksen tuottaja, eli COVID-19-tartunnan saanut henkilö, jonka uloshengityksestä emittoituu virusta kantavia pienhiukkasia. Laskeetaan riskejä sille, että toinen henkilö saa samassa tilassa oleskellessaan tartunnan aerosolivälitteisesti. Oletetaan virusta emittoivia ihmisiä olevan tilassa vain yksi ja että emittoija on aivan huoneen reunalla, 1,6 m korkeudella. Tarkastellaan, miten riski muuttuu etäisyyden ja huoneessa vietetyn ajan suhteen, sekä miten viruksen tuottonopeus ja ilmanvaihto muuttavat riskiä.

Huone toimii perusmallina, jolla voidaan havainnollistaa eri parametrien muutosten vaikutusta riskiin. Voidaan tutkia, mikä vaikutus emittoijan ja mitattavan kohdan välisellä etäisyydellä on riskiin tai miten ilman vaihtuvuus vaikuttaa riskiin. Myös viruksen tuottonopeutta Q voidaan muuttaa emittoijan fyysisen aktiivisuuden mukaan: tarkastellaan tuottoa levossa, kevyesti liikuessa ja raskaasti liikuessa. Näitä vastaavat arvot saadaan lähteessä Buonanno et al. (2020) esitetystä mallista, jonka mukaan viruskvanttien tuotto on verrannollinen tartunnan saaneen henkilön sylkinäytteestä mitattuun COVID-19-pitoisuuteen (RNA/ml).

Ravintolaskenaariossa tila on huomattavasti huonetta suurempi ja ilma vaihtuu useammin, joten hengityspilvi sekä levittäytyy laajemmalle että laimenee nopeammin. Pitoisuus samalla ajanhetkellä mitattuna on siis pienempi, vaikka tarkasteltaisiin vastaavalla etäisyydellä. Kuntosalin tilavuus ja ilmanvaihtuvuus ovat samat kuin ravintolan, mutta virusta hengitetään enemmän sisään. Henkilön, jolle riskiä lasketaan, oletetaan siis olevan fyysisesti aktiivinen, jolloin tämän hengitysnopeus Bh on tavanomaista suurempi. Myös tartuttajan oletetaan liikkuvan, joten myös hiukkastuotto on suurempaa, jotakin kevyen ja raskaan liikunnan väliltä.

Taulukoidut ilmanvaihtokertoimet huoneelle, ravintolalle ja kuntosalille on laskettu lähteen Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto (2012) mukaisten suositeltujen ulkoilmavirtojen

| Skenaariot | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------|
| Suure | Huone | Ravintola | Kuntosali | Bussi |
| Tilan dimensiot | | | | |
| - pituus | 4 m | 20 m | 20 m | 13 m |
| - leveys | 3,5 m | 25 m | 25 m | 2,5 m |
| - korkeus | 2,5 m | 3,5 m | 3,5 m | 3,5 m |
| | = 35 m ³ | = 1750 m ³ | = 1750 m ³ | = 113,75 m ³ |
| Etäisyys viruksentuottajaan | 0,2 - 4 m | 0,5 - 4 m | 0,5 - 4 m | 2 m |
| Virustuotto | 20, 50, 105 q/h | 20 q/h | 105 q/h | 20 q/h |
| Ilmanvaihtokerroin | 0,7 h ⁻¹ | 6 h ⁻¹ | 6 h ⁻¹ | 7 h ⁻¹ |
| Hengitysnopeus | 0,006 m ³ /min | 0,006 m ³ /min | 0,006-0,018 m ³ /min | 0,006 m ³ /min |

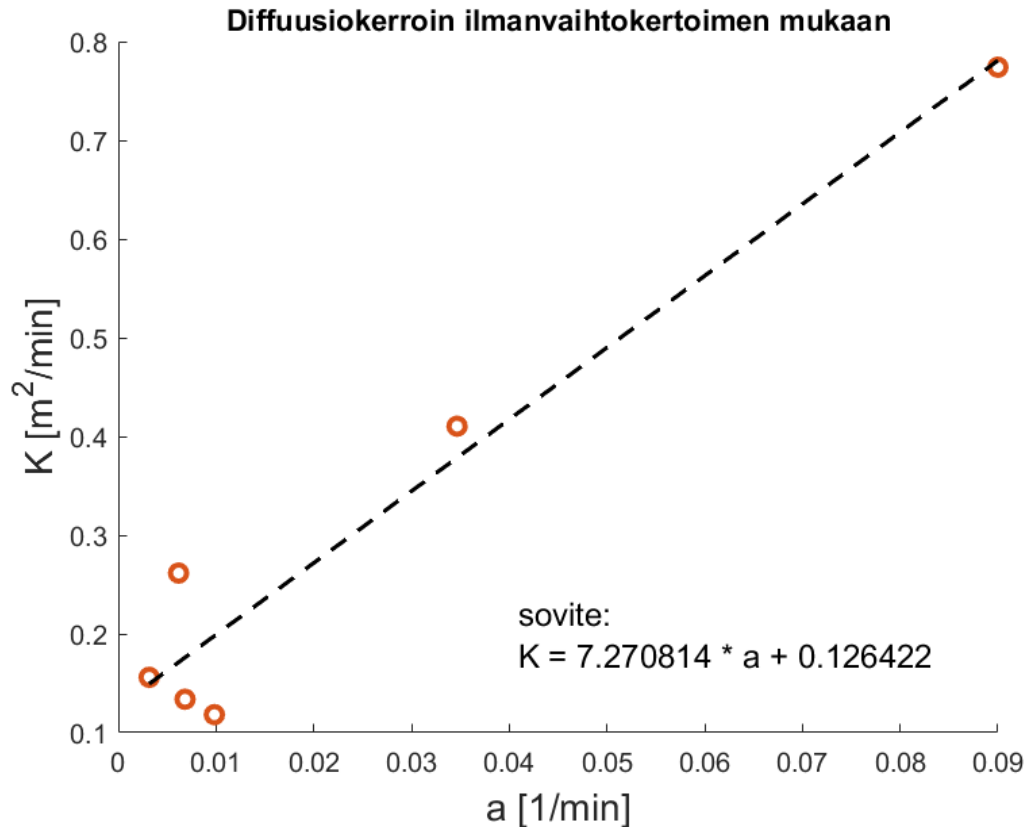
Taulukko 3.1. Skenaariot ja niihin liittyvät parametrit

mukaan. Tavalliselle asuinhuoneelle suositeltu virta on $0,5 (l/s)/m^2$ ja lounasravintolalle ja kuntosalille $6 (l/s)/m^2$. Taulukon 3.1 mukaisille tiloille nämä vastaavat ilmanvaihtokertoimia $0,7 h^{-1}$ ja $6 h^{-1}$. Bussi-skenaariossa puolestaan ilmanvaihtoa ei oleteta ajan suhteen vakioksi kuten aiemmissa, vaan se on askelmainen. Kun bussi on liikkeellä, arvioidaan ilmanvaihtuvuuden olevan $7 h^{-1}$ (Ott et al. 2008). Kun ovet avautuvat, ilmanvaihtuvuus moninkertaistuu. Mallinnetaan tilannetta, jossa terve henkilö istuu tartuttajan kanssa samassa bussissa ja bussin ovet avautuvat aina 5 minuutin välein 12 sekunnin ajaksi.

Luvussa 2.4.1 kaavan 2.13 johtamisessa oli oletuksena, että diffuusiokerroin K on vakio. Diffuusiokerroin kuvaa sitä, kuinka nopeasti pilvi leviää ja pitoisuus laimenee. Turbulentien diffuusion nopeuteen vaikuttaa tilan ilmanvaihtokerroin (Cheng et al. 2011). Käytetään edellä mainitussa lähteessä esitettyjä mittaustuloksia diffuusiokertoimen arviointiin. Diffuusiokertoimet on määritetty mittaamalla hiilidioksidipitoisuutta noin $60 m^2$ kokoisessa tilassa, jossa on jatkuva lähde emittoimassa kaasua. Mittaustulosten perusteella diffuusiokertoimen K ja ilmanvaihtokertoimen a välille saadaan lineaarinen sovite

$$K = 7,270814a + 0,126422, \quad (3.1)$$

joka näkyy kuvassa 3.1.

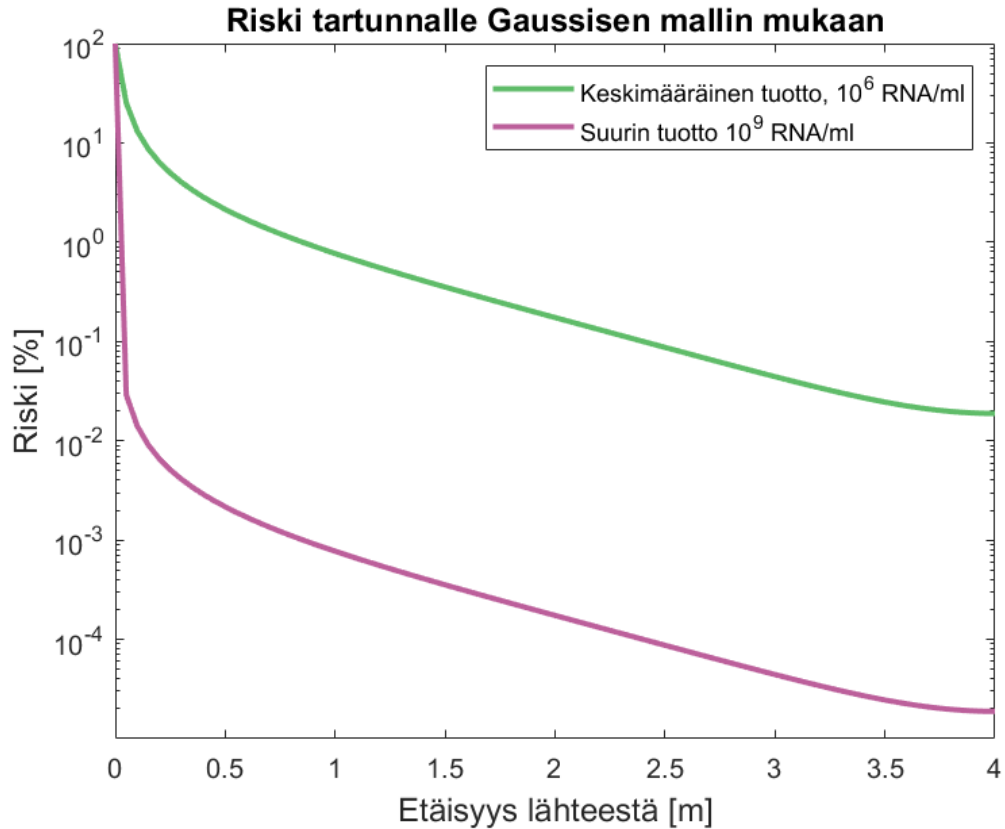


Kuva 3.1. Cheng et al. (2011) mittaamat diffuusiokerroimet ilmanvaihtokertoimien mukaan. Dataan on sovitettu suora, jonka avulla diffuusiokerrointa arvioidaan tämän työn mallinuksessa.

3.2 Riski Gaussisen mallin mukaan

Lasketaan Gaussisella mallilla emittoijan tuottaman virusaerosolin pitoisuutta (q/m^3) huoneessa. Approksimoidaan depositionopeutta siten, että sijoitetaan sen tilalle rajanopeus w_d , joka saadaan kaavan 2.7 mukaisesti. COVID-19-virusta kuljettavien aerosolihiukkasten mitattu mediaanikoko uloshengityksessä on väliltä 0,7-1,0 μm . (Bake et al. 2019) Yksinkertaistuksen vuoksi oletetaan kaikkien hiukkasten olevan 1 μm kokoisia, jolloin Cunninghamin korjaustermi on lähes 1 ja depositionopeudeksi saadaan noin 30,1 $\mu\text{m/s}$.

To et al. (2020) ja Guo et al. (2020) ovat mitanneet tutkimuksissaan COVID-19-potilaiden syljen viruspitoisuutta (RNA copies/ml). Suurin havaittu pitoisuus molempien lähteiden mukaan on kokoluokkaa 10^9 RNA/ml, mutta yksittäisiä suurempiakin arvoja on havaittu aina 10^{11} RNA/ml:aan asti (Pan et al. 2020). Viruspitoisuutta mitattiin potilailta kuukauden ajan. Pitoisuuden trendi on laskeva, eli näytteistä mitattu viruspitoisuus oli suurinta taudin alkuvaiheessa. Keskiarvo ensimmäiseltä viikolta oli noin 10^6 RNA/ml. Lähteen (Buonanno et al. 2020) mallin mukaan virusaerosolin tuotto on tällöin 0,002 q/h, kun oletetaan viruksen tuottajan olevan levossa. Kuvassa 3.2 alempi käyrä kertoo tartuntariskin tämän



Kuva 3.2. Gaussisen mallin antamat riskit keskimääräisen virustuoton ja maksimituoton mukaan. Huoneessa on oltu 10 min. Virustuotto voi vaihdella paljon yksilön ja taudin vaiheen mukaan, joten se on suuresti riskiin vaikuttava parametri.

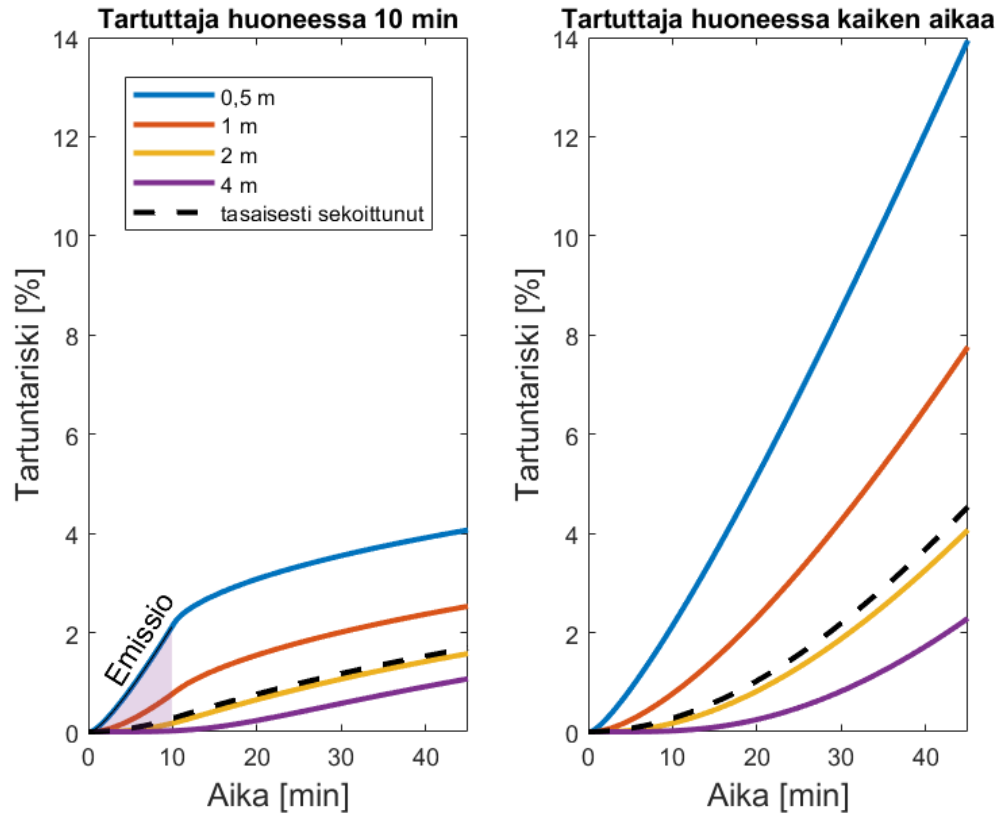
| Aktiivisuustaso | Keskimääräinen tuotto (10^6 q/h) | Suurin tuotto (10^9 q/h) |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Lepo | 0,002 q/h | 20 q/h |
| Kevyt liikunta | 0,006 q/h | 50 q/h |
| Raskas liikunta | 0,01 q/h | 105 q/h |

Taulukko 3.2. Virustuotot fyysisen aktiivisuuden mukaan

tuoton mukaan, kun tartuttajan seurassa on oltu 10 minuuttia. Ylemmässä käyrässä ja työn muissa kuvaajissa käytetään pitoisuuden 10^9 RNA/ml mukaista tuottoa 20 q/h. Tämä oli yllä mainituissa tutkimuksissa suurin mitattu pitoisuus, joten sen avulla voidaan arvioida ylärajaa riskille saada tartunta aerosolivälitteisesti.

Kuvassa 3.3 viruslähde on huoneen reunalla ja pitoisuus on laskettu etäisyyksillä 0,2m, 0,5m, 1m, 2m, 4m. Riski on kumulatiivinen, eli se on laskettu ajanhetkeen t mennessä sisäänhengitettyjen viruskvanttien mukaan. Vasemman puoleisessa kuvaajassa tartuttaja on ollut huoneessa ajanhetkestä 0 min ajanhetkeen 10 min, jonka aikana riskit kasvavat jyrkästi, ja tämän jälkeen uusia viruskvantteja ei emitoidu huoneeseen. Riski yhä kasvaa

tämän jälkeen, koska aiemmin emittoidut kvantit jäävät ilmaan leijumaan, josta ne voivat äätyä sisäänhengitetyiksi. Oikeanpuoleisessa kuvassa tartuttaja on samassa huoneessa kaiken aikaa, jolloin riskit jokaisella etäisyydellä jatkavat kasvamista jyrkästi.



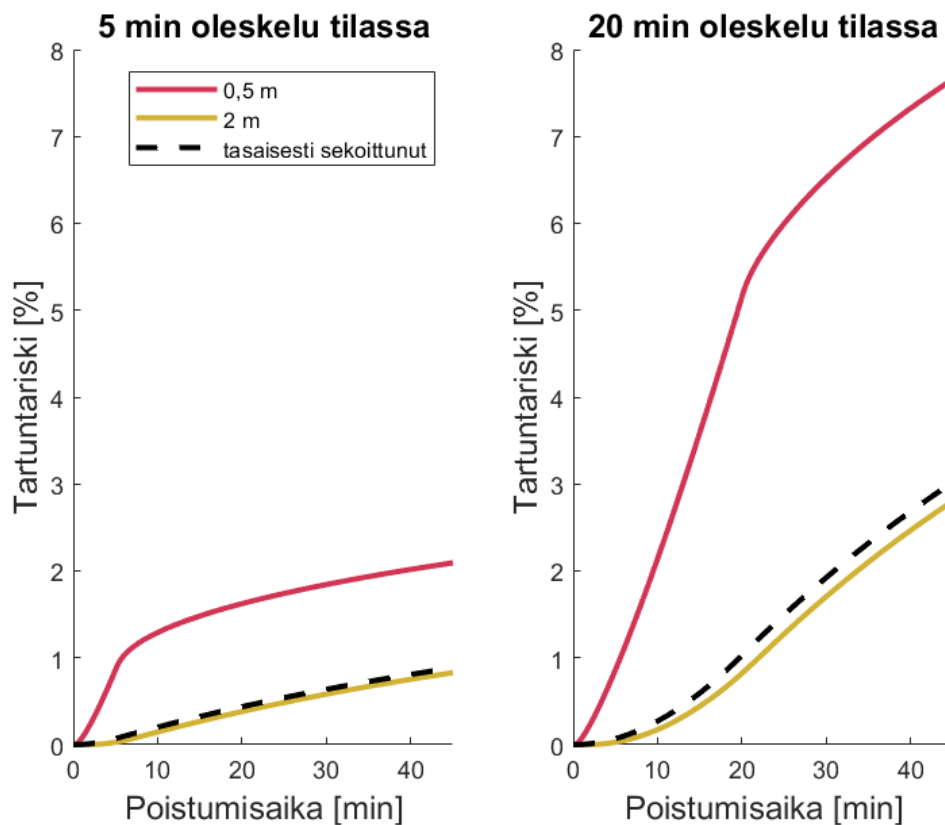
Kuva 3.3. Riski huonetilassa oleskeluajan funktiona. Vasemmanpuoleisessa kuvaajassa tartuttaja on huoneessa ensimmäisen 10 minuuttia, kun taas oikeanpuoleisessa tartuttajan on oletettu olevan huoneessa kaiken aikaa.

Vasemman puoleisen kuvaajan perusteella oleskelu samassa tilassa, jossa sairas henkilö on viettänyt lyhyen ajan, tuottaa Gaussisen mallin mukaan melko pienet riskit. Suurin arvo 45 minuutin kohdalla on vain hieman yli 4 prosenttia, eli edes lähellä emittoijaa tartunnan saaminen ei vaikuta kovin todennäköiseltä. Jos huoneessa sen sijaan on tartuttajan kanssa kaiken aikaa, riskit jatkavat eksponentiaalista kasvua ajan edetessä, ja 45 minuutin kohdalla suurin riski on jo 14 prosenttia, mikä näkyy oikean puolisesta kuvaajasta.

Alussa riski kasvaa nopeiten pienillä etäisyyksillä, joissa viruspitoisuus on suurinta. Hyvin lyhyillä etäisyyksillä, kuten 0,5 m päässä myös pisaratartunnan riski on olennainen, joten todellisuudessa riski olisi paljon suurempi kuin kuvassa 3.3 esitetty. Viruspitoisuus tasoittuu tilassa ajan edetessä, jolloin myös kauempana lähteestä riski alkaa kasvaa. Malli ei huomioi ilmanvaihdon sijaintia huoneessa, vaan olettaa ilmanvaihdon tasaiseksi. Myös deposition oletetaan olevan tasaista, joten 10 min jälkeen, kun emissio loppuu ja pitoi-

suuten vaikuttaa vain poistavat termit, riskit kasvavat samalla nopeudella paikasta riippumatta. Riski kasvaa aina sen mukaan, kuinka paljon virusta on hengitetty sisään, ja sisään hengitetty virusmäärä on verrannollinen huoneessa vietettyyn aikaan. Tällöin esimerkiksi 0,5 metrin kohdalla 5 min jälkeen riski on noin 1 prosentti, mutta 4 m etäisyydellä sama riski saavutetaan vasta 44 minuutin jälkeen.

Jos terve henkilö ei olekaan huoneessa tartuttajan kanssa ajanhetkestä $t = 0$ lähtien, vaan jonkin lyhyemmän ajan, riski on pienempää. Kuvassa 3.4 on laskettu riskit kahdella eri oleskeluajalla. Kuvaajat kertovat siis riskit tartunnalle, jotka kertyy 5 min ja 20 min oleskelusta virushiukkasia sisältävässä huoneessa, kun henkilö poistuu huoneesta ajanhetkellä t .

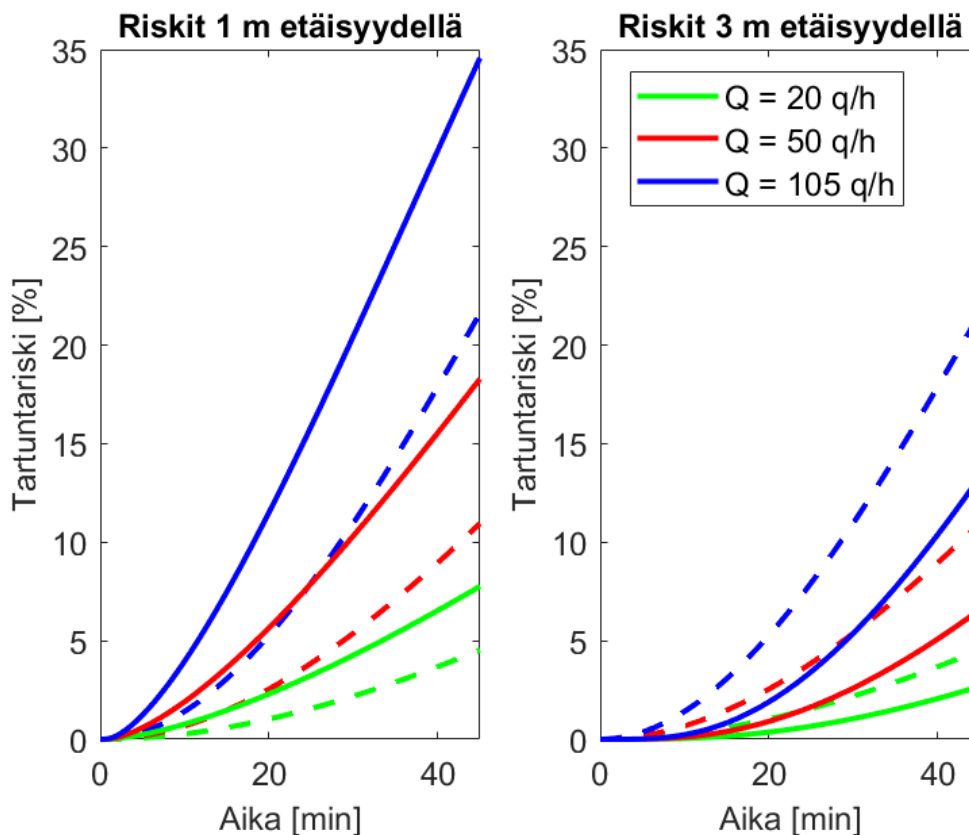


Kuva 3.4. Riski tartunnalle, kun huonetilassa tartuttajan kanssa ollaan vain lyhyt aika. Vasemmanpuoleisen kuvaajan perusteella esimerkiksi huoneessa käyminen aikavälillä 20-25 min tuottaa noin 0,5 % riskin, jos tartuttajasta ollaan 2 m etäisyydellä.

Sekä kuvasta 3.3 että kuvasta 3.4 nähdään, että etäisyyttä kasvattamalla riskiä voi pienentää Gaussisen mallin mukaan. Riski kasvaa melko jyrkästi ajan suhteen, joten riskin pienentämisessä aika on myös oleellinen parametri. Myös kuvasta 3.4 nähdään oleskeluajan vaikutus: ajan nelinkertaistuu riskikin lähes nelinkertaistuu. Riskin minimoimiseksi parasta olisi siis viettää virusta sisältävässä huoneessa mahdollisimman lyhyt aika

ja pysytellä etäällä emittoijasta.

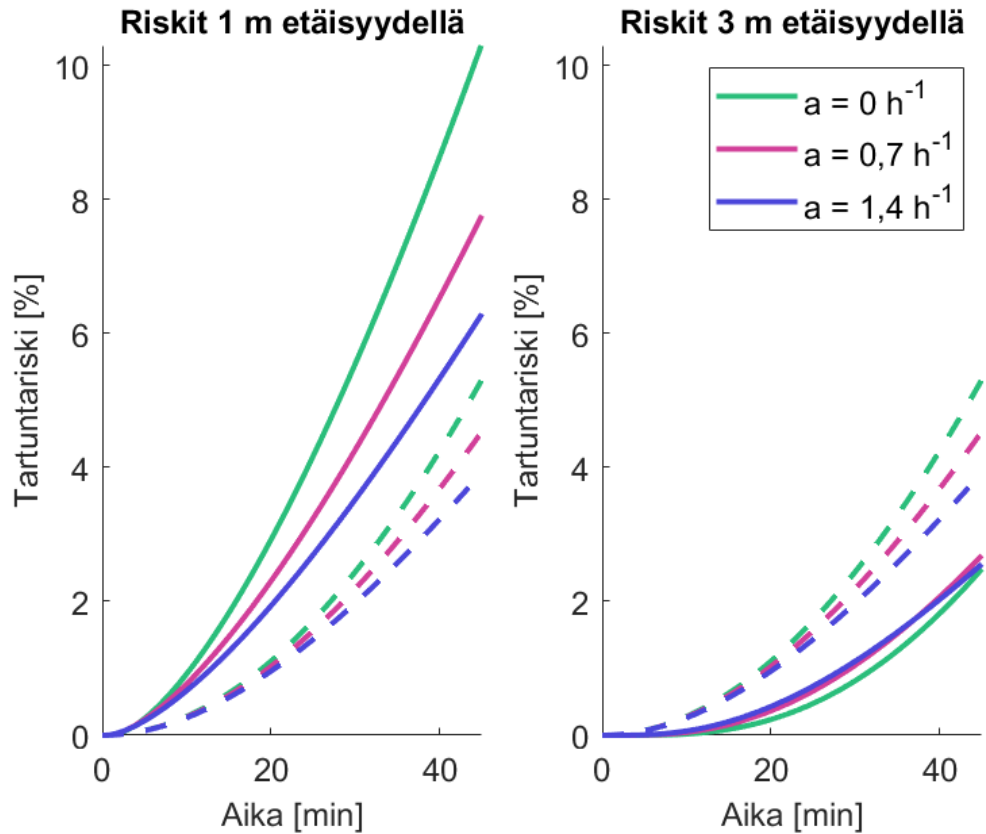
Molempiin kuviin on lisäksi piirretty katkoviivalla tasaisesti sekoittuneen mallin antama riski. Se ei riipu paikasta vaan ainoastaan ajasta, jonka vuoksi käyriä on vain yksi. Kuvaajien perusteella tasaisesti sekoittunut malli näyttäisi kuvaajavan melko hyvin Gaussisen mallin antamaa riskiä noin 2 metrin etäisyydellä. Tämä pätee vain tässä määritetyssä skenaariossa, eli huoneessa, jolla on melko pieni tilavuus.



Kuva 3.5. Riskit eri virustuottojen mukaisesti. 20 q/h vastaa tartuttajan tuottamaa virusmäärää levossa, 50 q/h kevyesti liikkeessä ja 105 q/h raskaasti liikkeessä. Katkoviivoilla piirretyt kuvaavat riskiä vastaavilla tuotoilla tasaisesti sekoittuneen mallin mukaan.

Kuten luvussa 3 todettiin, viruksen tuottonopeus voi vaihdella sen mukaan, mikä emittoijan aktiivisuustaso on. Kuvassa 3.5 tarkastellaan riskiä tietyllä etäisyydellä lähteestä ja riskejä on laskettu eri tuottonopeuksilla. Tästä nähdään, että Gaussisen mallin mukaan 45 min raska liikunta tuottaa tilaan sellaisen viruspitoisuuden, että 3 metrin päässä tartuntariski on yli 10 %. Kevytkin liikunta voi pienessä huoneessa aiheuttaa mallin mukaan 5 % riskin. 1 metrin päässä riski voi raskaasti liikkeessä nousta jopa 35 %:iin, vaikkakin tällaisella etäisyydellä pisaratartunta lienee todennäköisempi taudin aiheuttaja. 45 min kevyt liikunta aiheuttaisi sekin jo noin 18 % riskin.

Näin suuret virustuoto ovat toki harvinaisia, ja kuten taulukosta 3.2 nähdään, keskimääräisen viruspitoisuuden mukaiset tuoton ovat paljon pienempiä. Datan puuttellisuuden vuoksi virustuoton arviointiin on käytetty sairaalassa olevilta potilailta mitattuja viruspitoisuuksia. Tämä voi myös osaltaan nostaa arvioituja riskejä, sillä sairaalaan hakeutuvilla henkilöillä todennäköisesti on keskimääräistä vaikeampia oireita, jolloin heiltä mitatut viruskuormat ovat keskimääräistä sairastajaa suuremmat (Guo et al. 2020; To et al. 2020).



Kuva 3.6. Riski huoneessa ajan funktiona eri ilmanvaihtokerroimilla. Kerroin $0,7 \text{ h}^{-1}$ vastaa normaalia ilmanvaihtoa asuinhuoneessa.

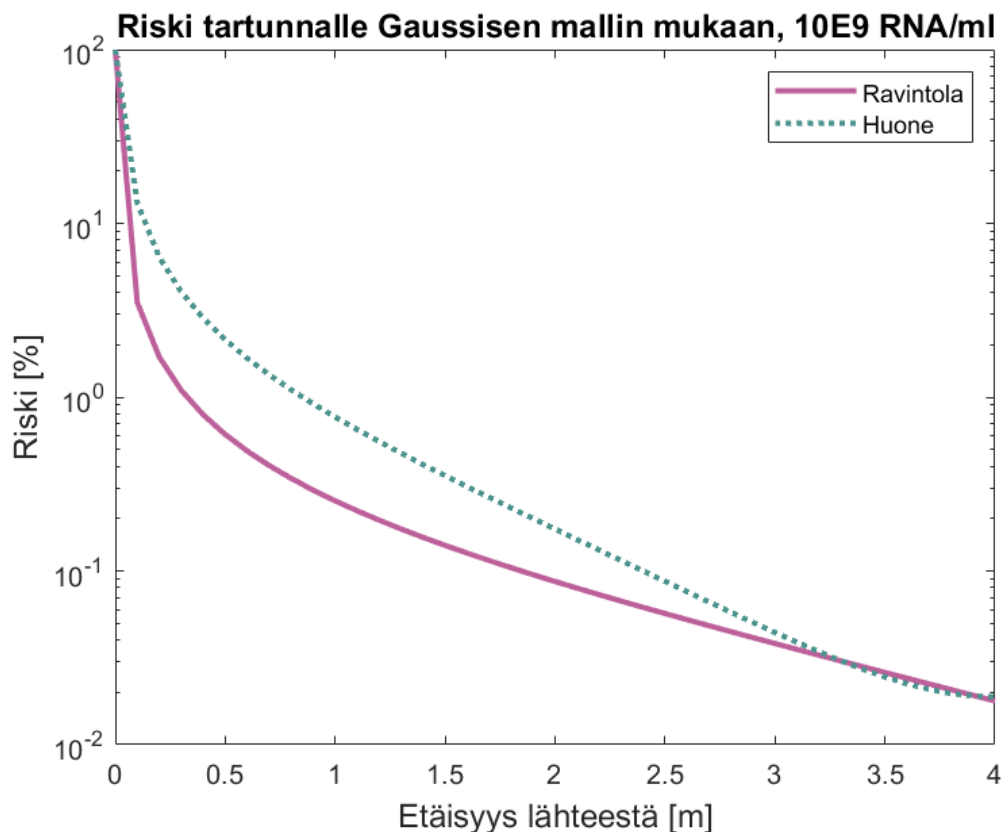
| Ilmanvaihtokerroin a | Diffuusiokerroin K |
|------------------------|-----------------------------|
| 0 h^{-1} | $0,13 \text{ m}^2/\text{h}$ |
| $0,7 \text{ h}^{-1}$ | $0,21 \text{ m}^2/\text{h}$ |
| $1,4 \text{ h}^{-1}$ | $0,30 \text{ m}^2/\text{h}$ |
| $6,0 \text{ h}^{-1}$ | $0,85 \text{ m}^2/\text{h}$ |
| $7,0 \text{ h}^{-1}$ | $0,97 \text{ m}^2/\text{h}$ |

Taulukko 3.3. Ilmanvaihtokerroimet ja niitä vastaavat diffuusiokerroimet

Kuvassa 3.6 riskejä on verrattu ilmanvaihtokerroimen a mukaan. Ilmanvaihtokerroin 0 h^{-1} tarkoittaisi tilannetta, jossa ilmanvaihtoa ei ole ollenkaan, vaan hiukkaset poistuvat ilmasta

ainoastaan deposition kautta. 40 minuutin kohdalla ilman ilmanvaihtoa riski kohoaa mallin mukaan yli 10 %:iin. Normaalin ilmanvaihdon $0,7h^{-1}$ mukaan riski on noin 8 % ja kaksinkertaisella ilmanvaihtuvuudella riski laskee noin 6 %:iin. Pudotus riskissä ei vaikuta kovin suurelta, mutta tehokkaamman ilman vaihtuvuuden merkitys korostuisi, jos huoneessa vietettäisiin useita tunteja. Samoin riskit 3 m:in kohdalla alkaisivat erottua enemmän toisistaan, jos kuvaaja olisi piirretty pidemmällä aikavälillä.

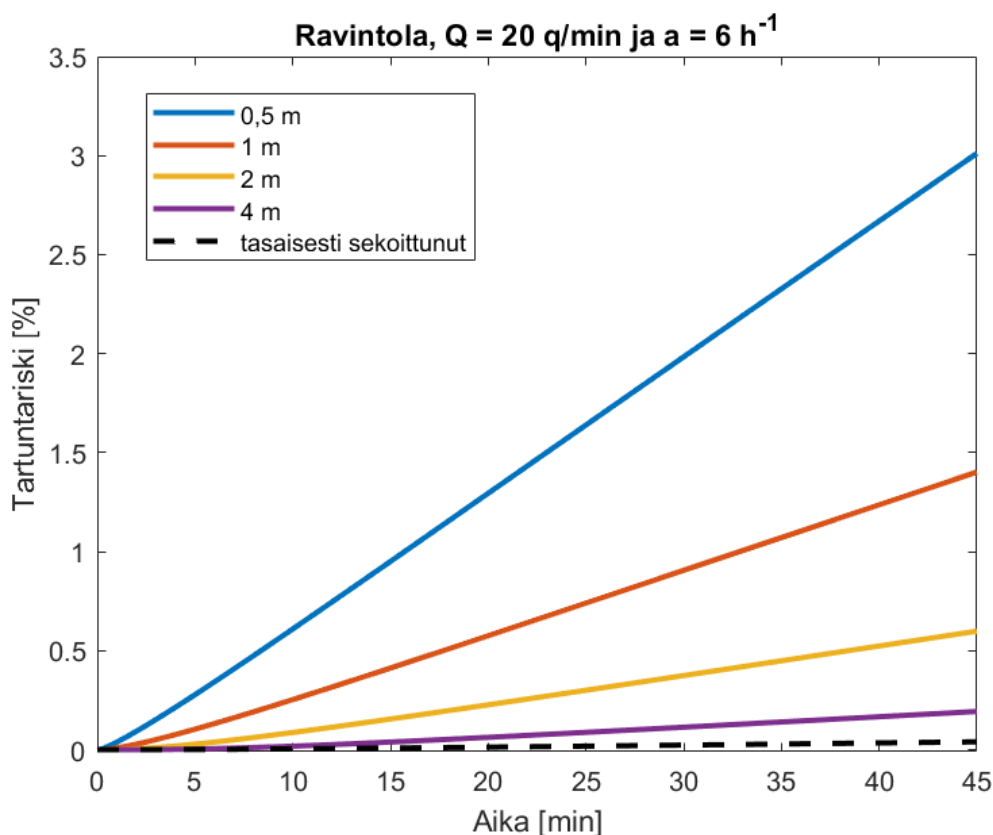
Taulukoon 3.3 on listattu kuvassa 3.6 käytettyjä ilmanvaihtokerroimia vastaavat diffuusio-kerroimet K . Ilmanvaihtokerrointa $6 h^{-1}$ käytetään ravintola- ja kuntosalisekenaarioiden yhteydessä ja bussille käytetään ilmanvaihtokerrointa $7 h^{-1}$. Diffuusio-kerroimet on laskettu kaavalla 3.1.



Kuva 3.7. Riski etäisyyden mukaan huonetilassa ja ravintolassa. Riski on pienempää ravintolassa, koska tilan koko on huoneeseen verrattuna 50-kertainen sekä ilmanvaihtuvuus siellä on suurempaa.

Huoneen tilavuus on melko pieni, jolloin hengityspilvi saavuttavaa nopeasti seinät ja osa tästä ilmapirrasta kimpoaa takaisin tulosuuntaa kohti. Ravintolassa puolestaan hengityspilvellä on paljon suurempi tila, johon levitä. Myös ilmanvaihtuvuus on suurempaa. Samalla etäisyydellä tarkasteltuna riski tartunnalle on siis selkeästi pienempi, mikä näkyy kuvasta 3.7. Erityisesti lähellä lähdeä ero on merkittävä. Kauempana, noin 3,5 m koh-

dalla ja sen jälkeen riskit ovat lähes samat. Huoneen kohdalla näkyy pieni nousu 4 m kohdalla, koska huone oli määritetty 4 m pitkäksi, eli hengityspilvi törmää tässä kohtaa seinään ja kimpoaa jonkin verran takaisin.

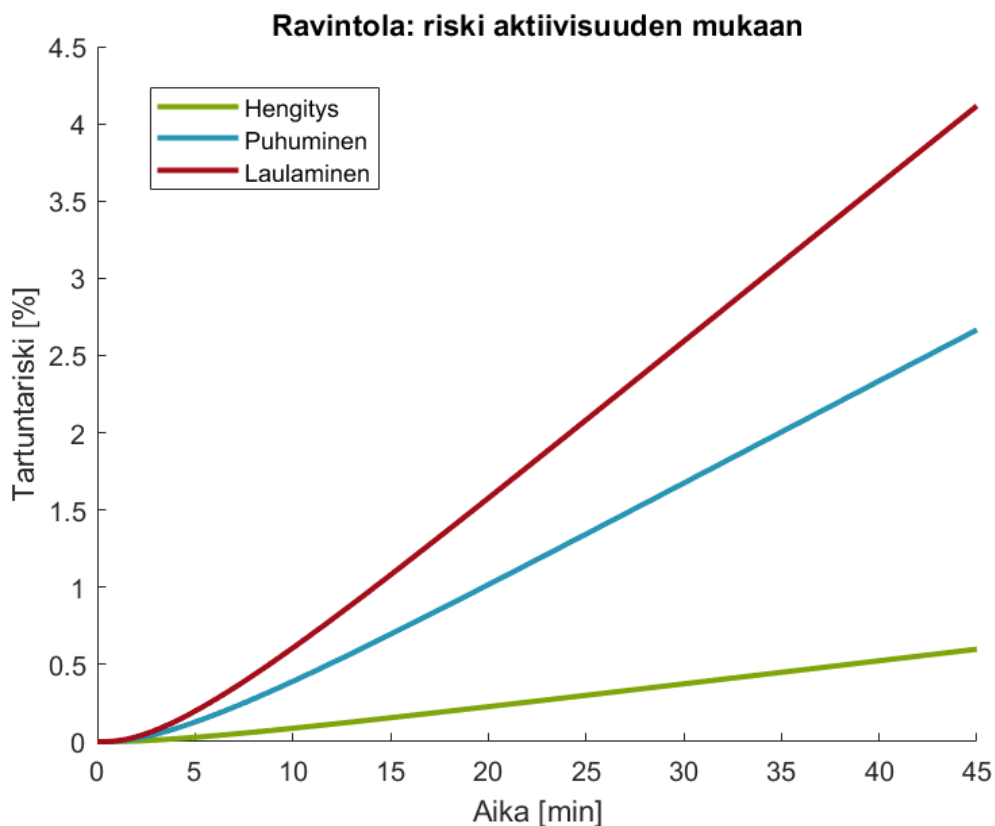


Kuva 3.8. Riski ravintolaskenaariossa Gaussisen mallin mukaan.

Kuvassa 3.8 näkyy Gaussisen mallin antama riski ravintolassa eri etäisyyksillä ajan suhteen. Vertaamalla tätä kuvan 3.3 oikeanpuoleiseen kuvaajaan, eli huoneskenaarioon, nähdään riskien putoavat noin viidesosaan siitä mitä ne ovat huoneessa. Suuremmassa tilassa viruspitoisuus pääsee laimenemaan enemmän, jolloin riski on pienempää. Aikaisemmin kuvien 3.3 ja 3.4 kohdalla mainittiin, että tasaisesti sekoittunut malli kuvasi hyvin riskiä 2 m etäisyydellä. Ravintolan tapauksessa näin ei ole, vaan tasaisesti sekoittuneen mallin kuvaaja on suuremmasta tilasta johtuen lähes nollassa, eli se kuvaa riskiä paljon kauempana lähteestä.

Tähän asti riskiä tartunnalle on tarkasteltu vain sellaisissa tilanteissa, joissa tartuttaja tuottaa viruspilveä pelkästään hengittämällä. Henkilö olisi siis täysin hiljaa tilassa toisen ihmisen kanssa, mikä on hieman epärealistinen tilanne. Virusaerosolin tuottoon ja sitä kautta tartuntariskiä vaikuttaa oleellisesti se, pitääkö tartuttaja suutaan koko ajan kiinni vai esimerkiksi puhuuko hän (Buonanno et al. 2020). Kuvassa 3.9 riski on piirretty sekä tartuttajan hengittäessä, puhuessa että laulaessa ravintolassa. Kuvan mukaiset virustuotot on listattu taulukkoon 3.4. Tartuttajan ja tarkasteltavan pisteen väliseksi etäisyydeksi

on oletettu 2 m.

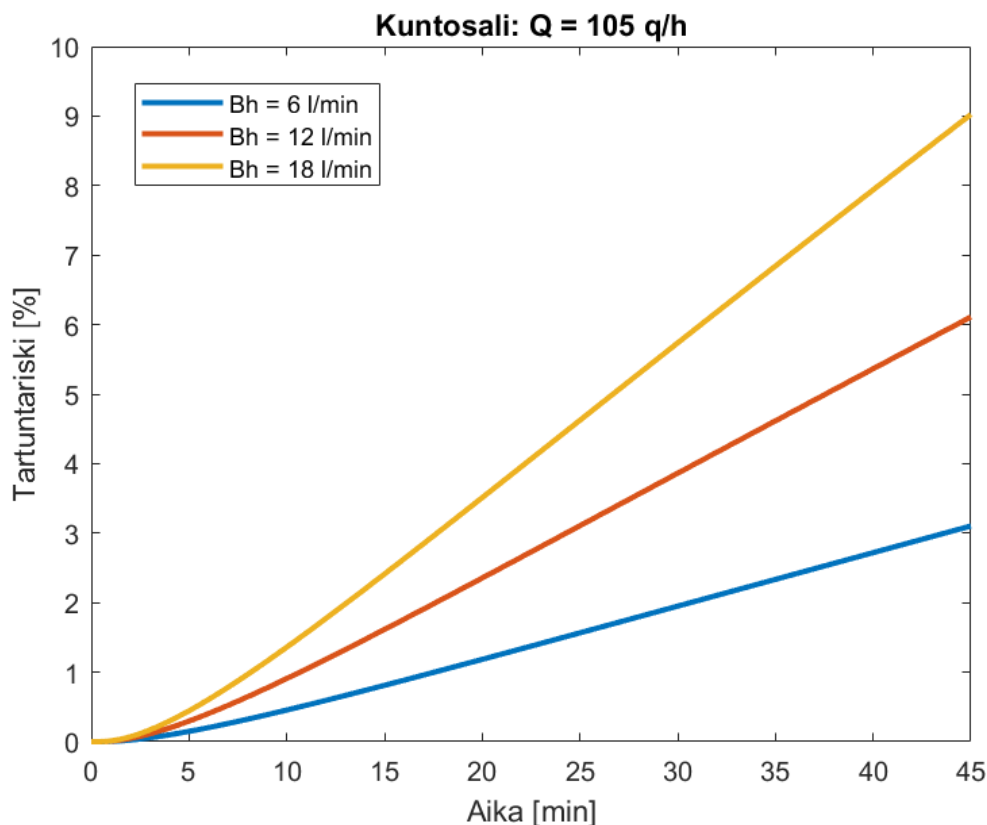


Kuva 3.9. Tartuttajan aktiviteetillä on selvä vaikutus riskiin. Aktiviteetillä tässä yhteydessä tarkoitetaan sitä, onko tartuttaja vain hiljaa ja hengittää vai puhuuko tai laulaako hän.

| Tartuttajan aktiviteetti | Virustuotto Q |
|--------------------------|---------------|
| Hengitys | 20 q/h |
| Puhuminen | 90 q/h |
| Laulaminen | 140 q/h |

Taulukko 3.4. Virustuotot tartuttajan aktiviteetin mukaan. Tuotot lähteen Buonanno et al. 2020 mallin mukaan, kun tartuttaja on levossa.

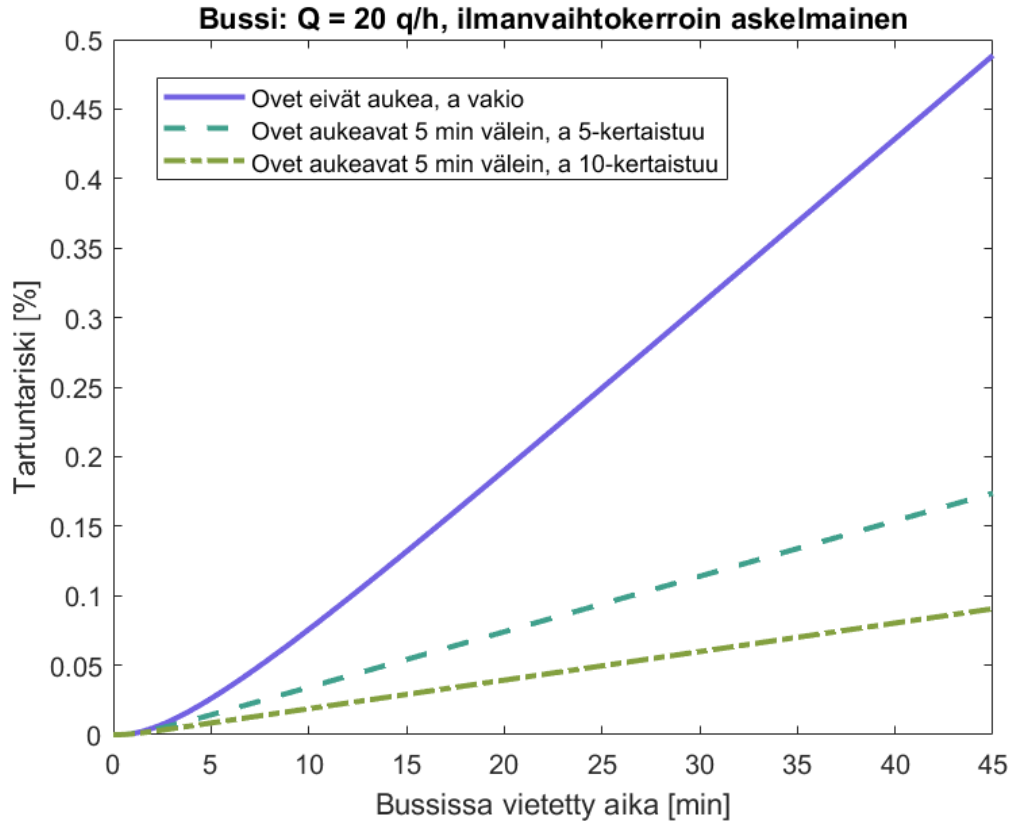
Kuvasta 3.9 nähdään, että pelkkä hengittäminen ravintolassa tai vastaavan kokoisessa tilassa luo Gaussisen mallin mukaan noin 0,5 % riskin 45 minuutin aikana. Puhuesssa riski kasvaa jyrkemmin ja on saman ajan kuluttua kasvanut yli 2,5 %:iin, eli se on noin viisinkertaistunut. Laulaessa riski kasvaa vielä puhumistakin jyrkemmin ja se tuottaisi mallin mukaan jo 4 % riskin. Todellisuudessa laulamista ei kuitenkaan todennäköisesti jatku 45 minuuttia yhtäjaksoisesti, jolloin laulamisen aiheuttaman riskin kuvaajassa olisi enemmän nousevia kohtia, joiden välissä kuvaaja laskisi ja riski kasvaisi hengityksen tuottaman virusmäärän mukaisesti.



Kuva 3.10. Liikkuessa hengitys on tiheämpää, joten sisäänhengitettyjen viruskvanttien määrä on suurempaa. Jos myös tartuttaja liikkuu, hän tuottaa viruskvantteja tavallista enemmän.

Hengityksen minuuttitilavuus B_h levossa on keskimäärin 6 l/min (Carroll 2006). Hengityksen tiheydessä eli B_h :n kasvaessa esimerkiksi liikunnan yhteydessä virusta kulkeutuu hengityselimistöön enemmän kuin levossa hengittäessä. Tämän vaikutusta riskiin voidaan tarkastella kuntosaliskenaarion avulla, jossa tilavuus ja ilmanvaihtokerroin ovat samat kuin ravintolassa. Erona on tarkasteltavan, terveen henkilön hengityksen minuuttitilavuus ja tartuttajan virustuotto, koska tartuttajan oletetaan myös liikuvan. Virustuotoksi Q on valittu taulukon 3.2 mukaisesti 105 q/h, joka vastaa raskasta liikuntaa.

Kuvassa 3.10 on tartuntariski Gaussisen mallin mukaan normaalilla lepominuuttitilavuudella sekä kaksinkertaistuneella ja kolminkertaistuneella hengityksellä. Riskit ovat 2 metrin etäisyydellä. Kuvaajasta nähdään suora yhteys hengityksen minuuttitilavuuden ja riskin välillä: Kun B_h kaksinkertaistuu, niin riski kaksinkertaistuu. Samoin B_h :n kolminkertaistuksessa riski kolminkertaistuu. Vertaamalla normaalin minuuttitilavuuden käyrää kuvassa 3.9 esitettyyn lepo hengityksen käyrään nähdään, että liikunta kasvattaa riskiä noin kuusinkertaiseksi. Tästä ja kuvasta 3.5 voidaankin päätellä, että paikat ja tilanteet, joissa ollaan fyysisesti aktiivisia, tarjoavat suuremman riskin COVID-19-tartunnan saamiselle.



Kuva 3.11. Riski bussiskenaariossa Gaussisen mallin mukaan. Bussin ovien aukaiseminen kasvattaa ilmanvaihtuvuutta, mikä pienentää viruspitoisuutta.

Viimeisessä mallinnettavassa skenaariossa kuvassa 3.11 tarkastellaan tartuntariskiä samassa bussissa tartuttajan kanssa. Jos bussin ovet pysyvät kiinni kaiken aikaa, riski arvioidun ilmanvaihtokertoimen $0,7 \text{ h}^{-1}$ perusteella olisi 45 min matkan jälkeen 0,5 %. Mikäli ajoneuvossa on näin hyvä ilmanvaihto, Gaussisen mallin mukaan riski olisi siis samaa luokkaa kuin vastaavalla etäisyydellä ravintolassa.

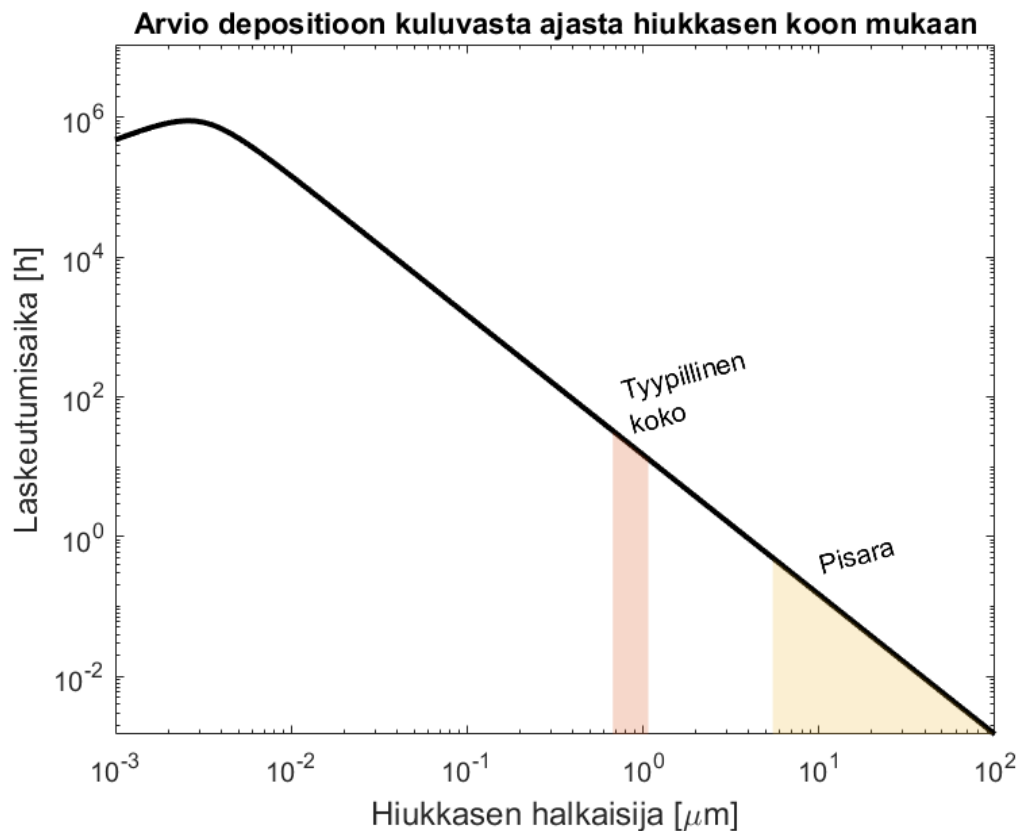
Jos bussi ajaa esimerkiksi kaupungissa, jossa se pysähtyy pysäkeille 5 minuutin välein, ilma pääsee vaihtumaan ovien kautta ja ulkoa tuleva ilmavirta pääsee laimentamaan hengityspilveä bussissa sisällä. Tämä ovien avaamisen vaikutus on olettu huomioon ilmanvaihtokertoimen a kasvamisena. Jos ilmanvaihto viisinkertaistuu ovien auetessa, kuvasta 3.11 nähdään, että riski jäisi alle 0,2 %:iin. Samoin ilmanvaihdon kymmenkertaistuessa riski laskisi alle 0,1 %:iin, eli se olisi noin viidesosa siitä, mitä se olisi ovien ollessa kaiken aikaa kiinni.

Tässä skenaariossa riski oli alunperinkin hyvin pieni, mutta sen avulla voidaan havainnollistaa tuulettamisen vaikutusta riskiin. Esimerkiksi ahtaassa tilassa, jossa on monta ihmistä ja huono ilmanvaihtuvuus, voisi ikkunan avaamisella vaikuttaa tartuntariskin las-

kemiseen tehokkaasti.

4. HIUKKASTEN KOON VAIKUTUS

Mallinnusta varten kappaleessa 3.2 tehtiin oletus, että hiukkaset ovat kaikki $1\ \mu\text{m}$ kokoisia. Tällöin kaikilla uloshengitetyillä pienhiukkasilla olisi sama depositionopeus. Todellisuudessa hiukkaset voivat olla tätä pienempiä, jolloin niiden deponoituminen on hitaampaa ja ne jäävät tilan ilmaan leijaillemaan pidemmäksi aikaa. Toisaalta suurempikokoiset hiukkaset laskeutuvat ilmasta keskimääräistä nopeammin.



Kuva 4.1. Arvioitu deponoitumisaika. Punaisella väritetty alue kuvaa uloshengitettyjen pienhiukkasten mediaanikokoa (Bake et al. 2019). Hiukkaset keltaisen alueen kohdalla, eli halkaisijaltaan $5\ \mu\text{m}$ kokoiset tai suuremmat hiukkaset ovat joidenkin lähteiden mukaan lueteltavissa jo pisaroiksi (Zuo et al. 2020), joille Gaussisen mallin ennustavuus heikenee.

Deponoitumista approksimoitiin kaavan 2.7 mukaan. Depositionopeuden avulla hiukkasille voidaan laskea aika, joka niillä kuluu laskeutumiseen. Kuvassa 4.1 on esitetty tämä las-

keutumisaika hiukkasen halkaisijan mukaan. Siitä nähdään, että 1 μm kokoisella hiukkasella laskeutumisaika on noin 13 tuntia. 5 μm kokoinen hiukkanen puolestaan laskeutuisi jo alle puolessa tunnissa. Tätä suurempia hiukkasia todennäköisesti ei synny hengityksestä, vaan ne voidaan luokitella jo pisaroiksi (Zuo et al. 2020). Niitä syntyy yskimissä tai aivastaessa, jolloin niillä on alunperinkin suurempi nopeus ja niiden liikkuminen on enemmän ballistista kuin turbulenttia diffuusiota.

Kuvasta 4.1 nähdään, että laskeutumisaika on kaikista pisin noin 3 nm kokoisille hiukkasille. Tämän jälkeen kuvaaja lähtee laskuun. Laskeutumisajan pienenemiseen vaikuttaa se, että nanometrien kokoluokassa Brownin liike alkaa olla jo merkittävää, mikä kasvattaa hiukkasen neliöllistä keskinopeutta (Ounis ja Ahmadi 1990). Tästä johtuen raskaiden hiukkasten lisäksi myös erittäin pienet hiukkaset laskeutuvat nopeasti.

Hengityspilven pienhiukkasten koko voi muuttua niiden leviämisen aikana. Kulkiessa hengityselimistöä huoneilmaan pienhiukkaset tulevat kuivempaan ympäristöön, jolloin niiden ympäriltä haihtuu vettä. Tämä saa hiukkaset kutistumaan ja siten ne pysyvät kauemmin ilmassa. Ilman kosteus on täten yksi vaikuttava tekijä tartunnan riskiä tarkasteltaessa.

Tilassa tapahtuvan deponion lisäksi hiukkasen koolla on yhteys siihen, mihin kohtaa hengityselimistöä sisään hengitetty pienihiukkanen kulkeutuu. Raskaat, yli 5 μm kokoiset hiukkaset laskeutuvat tyypillisesti nenänielun alueelle, kun taas pienemmät hiukkaset pystyvät kulkeutumaan syvemmälle keuhkoihin, aina keuhkorakkulohin saakka. On mahdollista, että sama määrä virusta tartuttaa herkemmin hengitysteiden alaosista, kuten influenssavirus (Lindsley et al. 2015). Influenssaviruksen kohdalla on myös havaittu, että alle 5 μm hiukkaset sisältävät virusta suuria hiukkasia enemmän (Milton et al. 2013). COVID-19-viruksen kohdalla tästä ei toistaiseksi ole dataa, mutta on mahdollista, että se käyttäytyy influenssan tapaan. (Wang et al. 2021)

5. YHTEENVETO

Tässä työssä tarkasteltiin COVID-19-viruksen leviämistä pienhiukkasten välityksellä neliskanttisessa tilassa. Pienhiukkaset diffusoituvat tilaan turbulenttina pilvenä, jonka pitoisuus saatiin laskettua Gaussisella mallilla. Gaussinen malli ei ottanut huomioon ilman virtauksia huoneessa. Samoin se ei huomioinut ilmanvaihdon sijaintia, vaan oletti hiukkasten vähenevän huoneesta tasaisesti. Hiukkaspitoisuuden ja Wells-Riley-yhtälön avulla saatiin arvioitua riskiä tartunnan saamiselle erilaisissa skenaarioissa.

Tartuttajan emittoima virusmäärä perustui Buonanno et al. (2020) esittämään malliin, jossa virusta kantavien pienhiukkasten määrä on verrannollinen syljesetä mitattuun viruspitoisuuteen. Tarkasteltavaksi syljen viruspitoisuudeksi valittiin sekä To et al. (2020) että Guo et al. (2020) mitattaama suurin arvo. Näin mallinnetut riskit voivat toimia ylärajana todellisille riskeille. Toisaalta tämän työn kirjoitushetkellä COVID-19-viruksesta on liikkellä helpommin tartuttavia variantteja kuin näiden mittausten aikaan (THL 2022), joten riskit tämän hetkisen maksimituoton mukaan saattavat olla jopa tässä työssä arvioituja suurempia.

Huoneessa, jonka tilavuus oli melko pieni ja jossa ilmanvaihto oli matalaa, mallin antamat riskit olivat suurimpia. Hengitys tuotti etäisyydestä riippuen 2-14 % riskin. Jos tartuttajan aktiivisuustaso muuttui, esimerkiksi levosta raskaaksi liikunnaksi, riski nelinkertaistui 45 min aikana. Ilmanvaihdon avulla riskin kasvua saatiin hillittyä, mutta sen vaikutus olisi korostunut vasta pidemmällä aikavälillä.

Tarkasteltaessa huonetta 50 kertaa isompaa ravintolaa, jossa myös ilmanvaihtokerroin oli suurempi, huomattiin riskien pienentyneen noin viidesosaan 45 minuutin kohdalla. Lisäksi riskin kasvu oli muuttunut lähes lineaariseksi, kun huoneen kohdalla kasvu oli selkeämmin eksponentiaalista.

Ravintolaskenaarion yhteydessä todettiin, että tartuttajan aktiivisuustasolla on vaikutus viruksen tuottoon. Mallin mukaan esimerkiksi 45 min kohdalla puhumisen tuottama riski oli noin 2,5-kertainen pelkän hengittämisen tuottamaan riskiin verrattuna. Myös fyysinen

aktiivisuus, esmierkiksi raskas liikunta voi nostaa Gaussisen mallin mukaan riskiä jopa kuusinkertaiseksi. Riski voi kasvaa vielä suuremmaksi, jos myös henkilö, jolle riskiä tarkastellaan, on fyysisesti aktiivinen, jolloin tämän hengityksen minuuttitilavuus on tavallista suurempi.

Bussiskenaariossa ilmanvaihto oli askelmainen. Siitä nähtiin, että jo ilmanvaihtuvuuden viisinkertaistuminen 5 minuutin välein voi laskea riskiä noin kolmannekseen. Tuulettaminen voi siis olla helppo yksittäinen keino pienentää tartunnan riskiä.

Tasaisesti sekoittuneen mallin havaittiin kuvaavan pitoisuutta melko hyvin kaukana tartuttajaasta. Gaussisen mallin mukaan riski laski melko nopeasti etäisyyden funktiona. Hyvin lähellä lähdettä tartunnan tarkastelu aerosolivälitteisesti ei kuitenkaan ole välttämättä järkevää, koska tällöin pisaratartunta on dominoiva leviämismekanismi. Etäisyyden pitämällä voidaan kuitenkin jonkin verran vaikuttaa riskiin kauempanakin lähteestä: huoneessa esimerkiksi 2 m etäisyydellä riski kasvoi noin 4 %:iin 45 minuutissa, kun 4 m päässä se kasvoi vain 2 %:iin. Kuitenkin kaikista merkittävin riskiin vaikuttava tekijä on aika. Pitoisuus kasvoi mallinnettavissa tilanteissa tasaisesti ajan edetessä, ja siten myös riski kasvoi, joko eksponentiaalisesti tai lähes lineaarisesti. Tehokkain tapa pienentää tartutusriskiä on siis viettää samassa tilassa tartuttajan kanssa mahdollisimman vähän aikaa.

LÄHTEET

- Bake, B., Larsson, P., Ljungkvist, G., Ljungström, E. ja Olin, A.-C. (2019). Exhaled particles and small airways. *Respiratory research* 20.1, s. 8–14.
- Blundell, S. ja Blundell, K. (2009). *Concepts in Thermal Physics*. Oxford University Press, s. 83–84.
- Britannica (2017). *Virion. Viral structure*. URL: <https://www.britannica.com/science/virion>. Viitattu 8.3.2022.
- Buonanno, G., Stabile, L. ja Morawska, L. (2020). Estimation of airborne viral emission: Quanta emission rate of SARS-CoV-2 for infection risk assessment. *Environment International* 141, s. 141105794–105794. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412020312800>.
- Carroll, R. (2006). *Elsevier's Integrated Physiology*. St Louis: Mosby, s. 106.
- Cheng, K., Acevedo-Bolton, V., Jiang, R., Klepeis, N., Ott, W., Fringer, O. ja Hildemann, L. (2011). Modeling Exposure Close to Air Pollution Sources in Naturally Ventilated Residences: Association of Turbulent Diffusion Coefficient with Air Change Rate. *Environmental science technology*. 45.9, s. 4016–4022.
- Crank, J. (1975). *The Mathematics of Diffusion. 2nd ed.* Oxford: Clarendon, s. 29.
- Drivas, P., Valberg, P., Murphy, B. ja Wilson, R. (1996). Modeling Indoor Air Exposure from Short-Term Point Source Releases. *Indoor Air* 6.4, s. 271–277. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1600-0668.1996.00006.x>.
- ECDC (2022). *COVID-19 situation update worldwide, as of week 4, updated 3 February 2022*. URL: <https://www.ecdc.europa.eu/en/geographical-distribution-2019-ncov-cases>. Viitattu 8.2.2022.
- Gammaitoni, L. ja Nucci, M. (1997). Using a Mathematical Model to Evaluate the Efficacy of TB Control Measures. *Emerging Infectious Diseases* 3.3, s. 335–342.

- Guo, J., Xu, Y. ja Chen, X. (2020). Viral dynamics of SARS-CoV-2 in saliva from infected patients. *The Journal of Infection* 81.3, s. 48–50. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32593658/>.
- Hinds, W. (1999). *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*. 2nd ed. New York: Wiley, s. 49.
- Jacob, D. (1999). *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, s. 27.
- Lelieveld, J., Evans, J., Fnais, M., Giannadaki, D. ja Pozzer, A. (2015). The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature (London)* 525.7569, s. 367–371.
- Leskinen, N. (2016). Turbulentin diffuusion kuvays sisäilman epäpuhtauksien leviämismallinnuksessa. *Tampereen Teknillinen Yliopisto*.
- Lindsley, W., Noti, J., Blachere, F., Thewlis, R., Martin, S., Othumpangat, S., Noorbakhsh, B., Goldsmith, W., Vishnu, A., Palmer, J., Clark, K. ja Beezhold, D. (2015). Viable Influenza A Virus in Airborne Particles from Human Coughs. *Journal of occupational and environmental hygiene* 12.2, s. 107–113.
- Milton, D., Fabian, P., Cowling, B., Grantham, M., McDevitt, J. ja Fouchier, R. (2013). Influenza virus aerosols in human exhaled breath: particle size, culturability, and effect of surgical masks. *PLoS pathogens* 9.3.
- Naeher, L., Brauer, M., Lipsett, M., Zelikoff, J., Simpson, C., Koenig, J. ja Smith, K. (2007). Woodsmoke Health Effects: A Review. *Inhalation Toxicology* 19.1, s. 67–106. URL: <https://www.latimes.com/world-nation/story/2020-03-29/coronavirus-choir-outbreak>.
- Ott, W., Klepeis, N. ja Switzer, P. (2008). Air change rates of motor vehicles and in-vehicle pollutant concentrations from secondhand smoke. *Journal of exposure science environmental epidemiology* 18.3, s. 312–325. URL: <https://www.nature.com/articles/7500601>.
- Ounis, H. ja Ahmadi, G. (1990). A Comparison of Brownian and Turbulent Diffusion. *Aerosol science and technology* 13.1, s. 47–53.

- Pan, Y., Chen, D., Xia, Y., Wu, X., Li, T., Ou, X., Zhou, L. ja Liu, J. (2020). Viral load of SARS-CoV-2 in clinical samples. *The Lancet infectious diseases* 20.4, s. 411–412.
- Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto (2012). Määräykset ja ohjeet 2012. *Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto, D2 Suomen rakentamismääräyskokoelma*.
- Read, R. (2020). A choir decided to go ahead with rehearsal. Now dozens of members have COVID-19 and two are dead. *Los Angeles Times*. URL: <https://www.latimes.com/world-nation/story/2020-03-29/coronavirus-choir-outbreak>.
- Riley, E., Murphy, G. ja Riley, R. (1978). Airborne spread of measles in a suburban elementary school. *American journal of epidemiology* 107.5, s. 421–432.
- Stein, R. (2003). In Hong Kong Apartment Tower, SARS Virus Spread Through Plumbing. *The Washington Post*. URL: <https://www.washingtonpost.com/archive/politics/2003/04/18/in-hong-kong-apartment-tower-sars-virus-spread-through-plumbing/99bcd25f-de85-472a-b084-4f847e0dac9a/>.
- THL (2022). *Muuntuneet koronavirukset*. Terveystieteiden tutkimuskeskus. URL: https://thl.fi/fi/web/infektiotaudit-ja-rokotukset/ajankohtaista/ajankohtaista-koronaviruksesta-covid-19/tarttuminen-ja-suojautuminen-koronavirus/muuntuneet-koronavirukset#Koronavirusmuunnosten_seuranta. Viitattu 6.5.2022.
- To, K., Tsang, O. ja Leung, W. (2020). Temporal profiles of viral load in posterior oropharyngeal saliva samples and serum antibody responses during infection by SARS-CoV-2: an observational cohort study. *The Lancet infectious diseases* 20.5, s. 565–574. URL: [https://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099\(20\)30196-1/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/laninf/article/PIIS1473-3099(20)30196-1/fulltext).
- Vernez, D., Schwarz, S., Sauvain, J., Petignat, C. ja Suarez, G. (2021). Probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated courtroom. *Indoor Air* 31.6, s. 1776–1785.
- Wang, C., Prather, K., Sznitman, J., Jimenez, J., Lakdawala, S., Tufekci, Z. ja Marr, L. (2021). Airborne transmission of respiratory viruses. *Science (American Association for the Advancement of Science)* 373.6558. URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abd9149>.
- WHO (9. heinäkuuta 2020). *Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions*. *Scientific Brief*. URL: <https://www.who.int/news-room/>

commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions. Viitattu 8.2.2022.

Zuo, Y., Uspal, W. ja Wei, T. (2020). Airborne Transmission of COVID-19: Aerosol Dispersion, Lung Deposition, and Virus-Receptor Interactions. *ACS Nano* 14.12.