



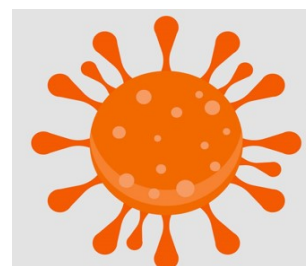
Læge



Arkitekt



Ventilationsspecialist



danvak

Fremtidens håndtering af smittespredning i bygninger

Danvak Covid-19 projekt

maj 2020—september 2021

Støttet af Realdania og alle projektdeltagere



Forord:

Denne rapport er kommet til, ved et stærkt samarbejde mellem ildsjæle indenfor medicin, ventilation og arkitektur. Inden projektet fik den fornødne økonomiske støtte og blev igangsat, er der udført et stort forarbejde. Dette forarbejde blev opstartet umiddelbart efter vores Statsminister lukkede Danmark ned den 11. marts 2020. Hen over foråret og sommeren 2020 blev projektopgaven defineret og sent efterår 2020 kunne projektarbejdet opstartes, da den nødvendige finansiering blev tilvejebragt. Rapporten er opdelt i 5 tekniske dele, som alle kan læses individuelt. De omhandler medicinske-, arkitekt-, ventilations- og drift og vedligeholdsperspektiverne for begrænsning af smittespredning i bygninger samt en rapport der omhandler målemetoder.

Rapporten er til sidst samlet et mere populistisk skrevet Resumé, som tager udgangspunkt i de vigtigste punkter fra de tekniske dele af rapporten. Sluttelig er der udarbejdet en konklusion. Resumé og konklusion findes i Del 6 og 7.

Inden rapporten blev færdigskrevet, blev der afholdt en konsensuskonference med udvalgte deltagere, rapporten fra denne konference findes i Del 8 – bilag 1.

Deltagerne, nævnt i alfabetisk orden, som har medvirket i udarbejdelsen af rapporten, har været:

- * Alireza Afshari, Professor AAU/SBi. (Danish Building Research Institute)
- * Arsen Krikor Melikov, Professor DTU. (Fluid mechanics, ventilation & indoor climate)
- * Claus Andreasson, Generalsekretær Danvak (HVAC, energi og indeklima)
- * Chen Zhang, Associate Professor, AAU-Build, (Architectural Eng. Ventilation, Airflow and Energy in Buildings)
- * Elsebeth Tvenstrup Jensen, Overlæge, SSI. (Infektionsepidemiologi og Forebyggelse)
- * Göran Hultmark, Adjungeret Professor, AAU-SBi. (Forskning i Bygningers Klimasystemer)
- * Kiril Georgiev Naydenov, Ph.D. DTU, Chief Specialist Rambøll. (Cleanroom ventilation & indoor climate)
- * Lars Emil Kragh, Danske Arkitektvirksomheder. (Forretningsudviklings- & projektchef)
- * Mette Dan-Weibel, LINK Arkitektur A/S. (Director Healthcare)
- * Pawel Wargocki, Associate Professor, DTU. (Indoor environment and ventilation)
- * Peter V. Nielsen, Professor AAU. (Byggeri, by og miljø, Ventilation og strømnings teknik)
- * Søren Overgaard, Professor dr. med. Bispebjerg Hospital (ventilation operationsstuer)
- * Tara Ballav Adhikari, Aarhus Universitet.
- * Tom Dynnes Hansen, LINK Arkitektur A/S.
- * Torben Sigsgaard, PhD, Professor AU. (Sygdomme og deres årsag: Allergi, Astma, Indeklima, Lungesygdomme)

Rapporten er økonomisk støtte af Realdania og af alle de ovenstående deltagers respektive organisationer. Realdania og alle deltagernes respektive organisationer, skal have en stor tak for den økonomiske støtte. Projektdeltagerne skal have tak for den fantastiske indsats der er lagt for dagen igennem det 1½ år projektet har varet.

I håbet om, at dette projekt fremadrettet vil danne grundlag for videre forskning og indsatser, for at vores bygninger og fremtidige byggerier bliver sundere, bedre og med væsentlig reduceret smitterisiko imellem mennesker, siger jeg tusinde tak for samarbejdet.

Claus Andreasson
Generalsekretær og Danvak Covid-19 projektleder

Indholdsfortegnelse:

Del 1 - Luftvejsinfektioner – smittemåder, erfaringer og forebyggelse, med fokus på endemisk og sæsonbetinget forekomst, mindre udbrud/epidemier og fremtidige epidemier/pandemier:

Luftvejsinfektioner og smitte – det medicinske perspektiv	1
Smittemåder – transport fra kilde til smittetager – det aerobiologiske perspektiv	8
Smitte gennem luft – forskellige benævnelser afhængig af sektor	14

Del 2 - Bygninger og Byers indretning og påvirkning af COVID-19:

Arkitektur og adfærdsdesign	18
COVID-19's påvirkning af det moderne byggeri	19

Del 3 - Ventilation og indeklima – teknisk del:

Ventilationsanlægs typer og luftfordelingssystemer	24
Luftfordelingsprincipper	34
Luftfordelingssystemer og luftbåren smittespredning	37
Storrumskontor og rumopdeling	41
Filtrering og dekontaminering	52
Drift og vedligeholdelse	64
Nomenklaturer	73

Del 4 - Luftbåren infektionsrisiko og strategier til ventilationskontrol:

Risikovurdering af luftbårne transmissioner	75
Luftmængder	77
Differenstryk	80

Del 5 – Målemetoder:

Opsamlingsmetoder af luftbåren virus	83
Ventilationstekniske målemetoder	90

Del 6 – Resumé

Del 7 – Konklusion

Del 8 – Bilag 1: Konsensuskonference, Referat

Del 1 Afsnit 1.

Luftvejsinfektioner – smittemåder, erfaringer og forebyggelse, med fokus på endemisk og sæsonbetinget forekomst, mindre udbrud/epidemier og fremtidige epidemier/pandemier

1a. Luftvejsinfektioner og smitte – det medicinske perspektiv

Vi lever i dagligdagen omgivet af mikroorganismer. Og ikke alene er der mikroorganismer i omgivelserne, vi har også mikroorganismer på vores hud, på slimhinderne og i tarmens hulrum i stort tal. Der er som oftest tale om fredelig sameksistens, hvor vi har glæde af, at vores såkaldte normalflora i balance beskytter os mod mere aggressive og skadevoldende mikroorganismer. Normalfloraen består især af forskellige bakterier, der er tilpasset de specifikke forhold på kroppens ydre og indre overflader.

Infektioner kan skyldes værtens egne mikroorganismer (endogen smitte), når normalfloraen kommer på afveje, fx når tarmbakterierne kommer ind i blæren og giver urinvejsinfektion, eller når der går hul på en betændt blindtarm, som kan resultere i tarmbakterier i bughulen og bughindebetændelse.

Men i mange tilfælde skyldes infektioner udefra kommende mikroorganismer (eksogen smitte), som kan skyldes bakterier, virus, svampe eller parasitter, og disse infektioner kan optræde overalt i kroppen, lokaliseret til et organ eller en specifik del af slimhinderne eller mere udbredt i hele kroppen.(1)

Smittemåder

I forbindelse med smitte eller smitteoverførsel (transmission) skelner man mellem forskellige smittemåder eller smitteveje. Denne viden bruges både i forbindelse med planlægning og håndtering i stor skala (public health og smitteberedskab) og i forbindelse med håndtering af den enkelte borger/patient med infektion.

I traditionel infektionshygiejnisk sammenhæng anvender vi i Danmark nedenstående kategorier, som principielt er baseret på nogle fysiske kriterier (hvordan kommer smitten/mikroorganismen fra A til B), men som også er baseret på mange års erfaring med praktisk smitteforebyggelse og desuden baseret på internationale retningslinjer.(2)(3)

Man skal være opmærksom på, at forskellige smitteveje kan være kategoriseret lidt forskelligt i forskellige guidelines. I nedenstående er refereret til de retningslinjer, som er gældende og har fungeret i det danske sundhedsvæsen.

Smittemåder aktuelt anvendt i den danske sundhedssektor

1. Kontaktsmitte: Inddeles i direkte og indirekte kontaktsmitte. Direkte kontaktsmitte sker mellem to personers hud eller slimhinder, fx gennem kys, sex eller fødsel (smitte fra mor til barn). Indirekte kontaktsmitte sker, hvor overflader, kontaktpunkter og/eller hænder er mellemlid mellem den, der bærer smitten og smittemodtageren. Smitten vil typisk med hænderne blive ført til øjne, næse eller mund med risiko for at give infektion i øjne, øvre/nedre luftveje eller mave-tarmkanal.
2. Dråbesmitte: Her er der tale om store dråber (størrelsesorden $\geq 100 \mu\text{m}$), som transporteres til smittemodtageren ved afstande på $\leq 1 \text{ m}$.
3. Luftbåren smitte:
 - Dråbekernesmitte: Smitte hvor mikroorganismen transporteres gennem luft i form af partikler, som er indtørrede (evaporated) dråber (størrelsesorden $< 10 \mu\text{m}$)
4. Støvbåren smitte: Smitte hvor mikroorganismen kan sedimentere på overflader og/eller transporteres gennem luft på støvpartikler (størrelsesorden $10\text{-}100 \mu\text{m}$)
5. Smitte via vehikler ("transportmidler") - fækooral smitte, insektbåren, fødevarebåren, vandbåren, inokulationssmitte (blod, medicin).

I forbindelse med denne kategorisering er der viden om, at der ved host, nys, tale, sang, råb, fysisk aktivitet, vejtrækning osv. udskilles et spektrum af dråber i forskellig størrelse.(4)(5)

I praksis, når det gælder specifikke infektioner, inddrages erfaringer med netop de sygdomme og fx kategoriseres smittevejen for en given infektion/mikroorganisme baseret på viden om væsentligste (hyppigste) smittevej, reproduktionstal R_0 (det antal personer som én person kan smitte i en ikke-immun befolkning) og hvilke forholdsregler, som har effekt.

I klinikken og i infektionshygiejnisk sammenhæng kaldes specifikt nogle ganske få infektioner, hvor smitten menes at ske væsentligst via dråbekerner, for luftbårne infektioner.

Aerosoler i klinikken, i forbindelse med instrumentering/behandling i øvre og nedre luftveje

Ud over de ovennævnte smitteveje har man i den medicinske verden også en kategori, der har sammenhæng med instrumentering eller anden behandling i øvre og nedre luftveje. En række konkrete medicinske procedurer har en høj eller lav risiko for at danne aerosoler bestående af luftvejssekret (aerosolgenererende procedurer). Desuden er der erfaring med at nogle procedurer med anvendelse af vand under tryk kan danne aerosoler, fx nogle tandlægeprocedurer.

Aerosoler ved kontakt med forskellige vandtyper og -installationer

Der er også viden om aerosoldannelse i andre sammenhænge, når vand af forskellig renhedsgrad bevæges med høj hastighed/tryk, som i nogle situationer kan udgøre en risiko for borger/patient/medarbejder – fx brusebad og risiko for Legionella, toiletskyl med aerosoldannelse til omgivelserne, aerosoldannelse fra afløb, højtryksspuling samt nogle typer spildevandsbehandling.

I forbindelse med covid-19 er der fremkommet en række publikationer, som ud fra viden om aerobiologi, rapporter fra covid-19-udbrud, herunder specielt supersprednings-events samt påvisning af virus i luften har afstedkommet, at det kan give mening at tale om endnu en smitemåde, når der er tale om smitte gennem luft. Da der i litteraturen anvendes forskellige betegnelser, som overlapper hinanden, og da specielt benævnelsen "luftbåren" anvendes i en ganske særlig kontekst i den danske sundheds- og plejesektor med omfattende konsekvenser for håndtering af en patient med luftvejsinfektion, kunne man anvende følgende opdeling af smitemåder og definitioner for at skabe øget forståelse mellem forskellige sektorer:

Smitte gennem luft – definitioner og begreber anvendt i det følgende

- Dråbesmitte: Smitte fra person til person inden for 1-2 m afstand. Ikke afhængig af ventilation.
- Aerosolsmitte: Smitte fra person til person inden for rummet, specielt i forbindelse med aktiviteter som sang, råben, høj tale, fysisk aktivitet.
- Dråbekernesmitte: Smitte hvor mikroorganismen transporteres mellem rum over længere afstande, eventuelt via ventilationssystemet. Omfatter særlige infektioner som mæslinger og skoldkopper samt i visse situationer tuberkulose, men vil på basis af nuværende erfaringer ikke være aktuelt for andre mikroorganismer.
- Støvsmitte: Støv kan transporteres gennem luft, sedimentere på overflader og igen hvirvles op (resuspenderes) fra disse.

Situationer betinget af instrumentering i luftvejene hos en inficeret person eller forårsaget af forskellige procedurer med involvering af vandvil oftest kunne rubriceres og håndteres som dråbesmitte eller mikrodråbesmitte.

Det er velovervejende, at der ikke i listen ovenfor angives specifikke partikelstørrelser, idet smitterisikoen vil være betinget af en kombination af både de aerobiologiske forhold (partikelstørrelser, luftstrømme) og en række faktorer, som har at gøre med karakteristika vedr. mikroorganismen, infektionen, immunforsvaret og adfærden hos personen, der bærer smitten (smittebæreren, den inficerede) og den, der er i risiko for at modtage smitten (smittemodtageren). Desuden er der skabt tvivl om netop partikelstørrelser og fortolkning af disses betydning i internationale retningslinjer.(6)

I sundhedssektoren anvender man for nye alvorlige infektioner med ukendt smitemåde som regel de mest omfattende forholdsregler (mod dråbekernesmitte), indtil infektion og smitemåde er nærmere karakteriseret. Når det er tilfældet, vil man i nogle situationer kunne nedskalere til mindre omfattende forholdsregler uden at det betyder risiko for sundhedsvæsen eller samfund. For nye alvorlige influenzatyper med pandemisk potentiale gælder samme overvejelser, indtil det tidspunkt, hvor infektionen er udbredt i samfundet.

I tabel 1 nedenfor er nævnt de gældende danske forholdsregler, som kan være relevante ved luftvejsinfektioner/smitte til/fra luftveje og håndtering på hospitaler og i nogen udstrækning plejehjem (borgere på plejehjem må formelt ikke isoleres). Hvilke konkrete forholdsregler, der anvendes ved en specifik infektion/mikroorganisme er forskelligt og afhænger bl.a. af erfaringer med succesfuld smitteafbrydelse og konsensus-/evidensbaserede nationale og internationale retningslinjer.(1)(2)

I forbindelse med nye (emerging) og genopståede udbrud på tværs af landegrænser er der ofte udarbejdet særskilte retningslinjer nationalt og internationalt, fx i forbindelse med SARS (2003), svineinfluenza (2009), MERS (2012), ebola (2014) samt pest (2018).

I forbindelse med covid-19 er der siden januar 2020, i takt med udvikling af pandemien og øget viden, udarbejdet en række specifikke anbefalinger, som løbende er justeret. Således er Sundhedsstyrelsens gældende vejledning om håndtering af covid-19 i sundhedsvæsenet nr. 26 i rækken (primo september 2021)(7) Tilsvarende justeringer gælder for internationale retningslinjer.

En lang række principper er derudover taget i anvendelse i samfundet i forbindelse med bl.a. covid-19, såkaldte non-pharmaceutical interventions. (8)(9)

Smittemåde er belyst – opstår der infektion og vil den spredes yderligere?

I praksis og når fokus er på smitte *mellem* mennesker, har virus stor betydning. Fokus er derfor i det følgende på virus som årsag til luftvejsinfektioner, hvad enten disse virus giver anledning til lokale mindre udbrud, til landsdækkende udbrud/epidemier eller til verdensomspændende pandemier.

Ud over transportvejene (smittemåden) har følgende betydning for, om der reelt opstår en infektion hos modtageren:

Egenskaber hos virus

Virus har i modsætning til de fleste bakterier og svampe et krav til tilstedeværelse af levende celler, som de kan trænge ind i og udnytte til formering. Virus kan i forskellig grad overleve i omgivelserne, men ikke formere sig uden for levende celler. Virus vil via specifikke overfladekomponenter koble sig til receptorer på modtager-cellen, trænge ind i cellen og overtage dens produktionsapparat. Overfladekomponenten kan fx være det spike-protein, som findes hos SARS-CoV-2, som kan koble sig til særlige receptorer på menneskets celler. Virus' arvemateriale kan bestå af DNA eller RNA. RNA-virus vil ofte mutere meget hyppigt, hvilket kan føre til ændringer i overfladekomponenten, som kan øge eller mindske tilpasningsevnen til receptorerne, som en nøgle der passer bedre eller dårligere i en lås. Her er SARS-CoV-2 et eksempel på, at virus under epidemien har udviklet nye varianter, herunder den mere "aggressive" deltavariant.(10) DNA-virus er derimod mere stabile, dvs. vil ikke ændre overfladekomponenter i samme takt.

Virus' arvemateriale er omgrænset af en proteinmembran og kan yderligere være forsynet med en lipid-holdig kappe (kappebærende). Virus uden kappe er såkaldte nøgne virus, som tåler udtørring, kan overleve i miljøet i længere tid og er mere modstandsdygtige over for fx desinfektionsmidler. Kappebærende virus tåler dårligt udtørring, overlever relativt dårligt i miljøet og er følsomme for detergenter og desinfektionsmidler.

Virus' størrelse i sig selv (ca. 35-350 nm) har ikke betydning for, om de kan trænge ned i de dybe luftveje ($\leq 5 \mu\text{m}$); det har derimod størrelsen af den partikel, som virus transporteres på.

Egenskaber i miljøet

Forskellige virus har forskellig tolerans over for fysiske faktorer som luftfugtighed, temperatur og UV-bestråling. (11)(12) Dertil kommer faktorer som tilstedeværelse af (beskyttende) organisk materiale, fx luftvejssekret. Er overflader på fx håndtag og inventar ujævne med riller, sprækker og sammenføjninger, vanskeliggøres effektiv rengøring, og virus vil kunne beskyttes mod udtørring, desinfektion og UV-bestråling.(13) For de fleste luftvejsvirus er den typiske overlevelsestid timer-dage. For SARS-Cov-2 regnes med en praktisk overlevelsestid på 48-72 timer, selv om laboratorieforsøg med variation af virusmængde, luftfugtighed, temperatur og belysning har vist længere overlevelsestider.(14)(15) For nogle virusinfektioners vedkommende er der sæsonvariation, for andre ikke.(16) Der kan desuden være forskel for typisk forekomst afhængigt af hvilken klimatiske region, man befinder sig i (tempereret eller tropisk klima).

Egenskaber ved infektionen (smittepotentiale)

Der er særlige karakteristika ved hver enkelt infektion/mikroorganisme.(17) Infektion kan optræde subklinisk,

dvs. uden symptomer overhovedet (også kaldet asymptomatisk), eller med lette, middelsvære eller svære symptomer. Inkubationstiden (tiden fra udsættelse for smitte til optræden af symptomer) kan være fra få dage til uger. Smitteperioden kan være fra før symptomstart, tidligt under symptomerne eller først længere henne i sygdomsforløbet. Smitterisikoen kan aftage, når/hvis der dannes neutraliserende antistoffer hos den smittede. Antallet af virus nødvendige for at fremkalde infektion (inokulum) kan være kendt, eller som det er tilfældet for SARS-covid-19, endnu ukendt. Antallet af virus som den modtagelige udsættes for (dvs. graden af eksposition) kan måske påvirke infektionens sværhedsgrad, hvilket er velkendt fra observationer af mæslinger.(18) En særlig udfordring ved covid-19 har været en stor andel af smittede uden symptomer (asymptomatiske) og at de, som har symptomer, kan smitte flere dage før symptomerne starter (præsymptomatisk).(19)

Symptomer og sygdommens spredning i kroppen kan afhænge af, hvor de receptorer er lokaliseret, som virus skal hæfte sig til.

Egenskaber hos den inficerede (smittekilden)

Det er dels karakteristika ved selve infektionen, som afgør, om vedkommende kan smitte andre (se ovenfor), dels den smittede persons adfærd og kontakt med omgivelserne. Det er blevet tydeligt under coronaepidemien, at non-pharmaceutical interventions har haft effekt (overholdelse af retningslinjer om afstand, håndhygiejne – herunder den ultimative afstand: hjemmeisolation, hjemmearbejde/nedlukning –som har betydet begrænset kontakt mellem personer (meget stor afstand). Med til afstand hører fravær af fysisk kontakt (håndtryk, kram), og supplerende til afstand eller når afstand ikke kan overholdes/trafik mellem andre ikke kan undgås, håndhygiejne, rengøring, brug af mundbind/maske samt evt. fokus på ventilation.(20)(9) Desuden har adfærd i form af evt. hoste og nys samt i hvilken udstrækning stemmen bruges (sagte tale, råben, sang) og grad af fysisk aktivitet med øget vejrtrækning betydning for evt. spredning af partikler fra luftvejene.(5)(21) En anden væsentlig faktor er tiden, som den inficerede opholder sig et givet sted: Jo længere tid, jo større sandsynlighed for spredning af virus fra luftveje og evt. hænder til omgivelserne. Endvidere er der endnu ikke fuldt afklarede individuelle forskelle mellem personer med hensyn til i hvilken grad, de kan være årsag til superspredning.(22)

Egenskaber hos smittemodtageren

Smittemodtageren kan beskytte sig ved efterlevelse af samme faktorer som nævnt ovenfor. Afstand (herunder hjemmearbejde), undgåelse af fysisk kontakt, begrænset opholdstid hvis nødvendigt, håndhygiejne, rengøring, brug af mundbind/maske samt evt. fokus på ventilation.

Dertil kommer immunforsvaret: det uspecifikke bestående af barrierer, cellulære og kemiske komponenter, samt fysiske faktorer som hosterefleks og ciliefunktion i luftvejene. Det specifikke immunforsvar bestående af bl.a. antistoffer og lymfocytter kan øges af mødet med smitteagens, som kan resultere i livsvarig immunitet (mæslinger) eller midlertidig, evt. delvis immunitet (influenza), eller kan induceres ved vaccination, som ligeledes kan være livsvarig eller med behov for gentagelse med kortere eller længere mellemrum, fx årlig influenzavaccination til udvalgte grupper. Er tilstrækkelig mange i en befolkning immune tales om flokimmunitet, som kan opnås enten ved naturlig spredning af en infektion eller ved tilstrækkelig vaccinationsdækning.

Immunforsvaret hos den enkelte kan være påvirket af almentilstand (søvn, ernæringstilstand), af sygdomme og/eller behandling, der påvirker immunforsvaret (sukkersyge, kemoterapi).(1) Det er også rapporteret, at fx lav luftfugtighed kan påvirke barriereegenskaberne, og kulde kan påvirke luftvejene, så materiale (sekret) ikke effektivt bevæges opad og ud.(23)(24)

Erfaringer i forbindelse med konkrete luftvejsinfektioner med fokus på virus

Tabel 1. Danske retningslinjer anvendt med succes i forbindelse med specifikke infektioner i sundhedssektoren (se næste side)

Smittemåde	Hvordan sker smitte	Forholdsregler med effekt
Indirekte kontaktsmitte	Via hænder eller overflader	Isolation (enestue) Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Evt. overtrækskittel/handsker
Dråbesmitte	Dråber som rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**) inden for 1 m afstand (armslængde)	Isolation (enestue) Maske (kirurgisk)*** Øjenbeskyttelse*** Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Overtrækskittel/handsker
Luftbåren (dråbekernesmitte)	Dråbekerner som inhaleres og/eller rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation (slusestue) med undertryksventilation Åndedrætsværn FFP2/3 Øjenbeskyttelse Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Overtrækskittel/handsker
Smitte ved høj-risiko AGP*	Risiko for spektrum inkl. mikrodråber, som inhaleres og/eller rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation Åndedrætsværn FFP2/3 Øjenbeskyttelse Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Overtrækskittel/handsker
Smitte ved lav-risiko AGP*	Risiko for dråber, som rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation Maske (kirurgisk)*** Øjenbeskyttelse*** Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Overtrækskittel/handsker
Støvbåren smitte	Partikler bestående af støv, sedimenterede dråber, dråbekerner eller aerosoler, afstødte hudceller m.m. Kan resuspenderes i luft og sedimentere	Isolation (enestue) Håndhygiejne Rengøring/desinfektion Evt. overtrækskittel/handsker

Baseret på (1) samt (25)

*AGP aerosolgenererende procedurer(25)

** Når sedimentation er sket på overflader, er der risiko for indirekte kontaktsmitte(26)

***Inden for 1 m afstand

Delkonklusion

I klinikken er der en veletableret tradition for at betragte kun få virusbetingede luftvejsinfektioner som forårsaget af dråbekernesmitte – mæslinger, skoldkopper samt i de initiale faser, pandemisk influenza, hvor forholdsregler mod dråbekernesmitte skønnes nødvendige. At virus kan påvises i luften, som arvemateriale eller evt. som levende virus, berettiger ikke nødvendigvis til forholdsregler mod dråbekernesmitte i sundhedsvæsenet. Samtidig bør proportionalitet mellem sundhedssektor-forholdsregler (hvor de mest syge behandles) og forholdsregler i samfundet have vægt, dog med skyldig hensyntagen til generel smitteforebyggelse i samfundet.(27)

Dette udelukker dog ikke, at man med erfaringer fra covid-19 vil revurdere, hvilken rolle smitte gennem luft kan have for andre luftvejsinfektioner, specielt i samfundet, hvor der ikke er samme praksis eller mulighed for smitteforebyggelse og anvendelse af værnemidler.

Samlet er det således et felt, hvor der både internationalt og nationalt, fx i dette projekt, er behov for yderligere arbejde for at skabe en fælles forståelse med det formål at forebygge virusbetingede luftvejsinfektioner så effektivt og rationelt som muligt.

Eksempler på andre mikroorganismer end virus, hvor smitte gennem luften har særlig betydning

Supplerende kan nævnes, at også nogle bakterier og svampe kan transporteres gennem luften og give anledning til luftvejsinfektioner eller alvorlige infektioner med luftvejene som indgangsport. Det vil dog oftest dreje sig om mindre, lokale ophobninger af infektioner, som kan være forårsaget af problemer i forbindelse med bygningens konstruktion og indretning, vand- og ventilationsinstallationer eller vedligehold, eller med renovering/nybyggeri tæt på bygninger med immunsvækkede personer (hospitaller).

Det kan således dreje sig om legionærsygdom (bakterien *Legionella*, via aerosoler fra fejlkonstruerede eller dårligt vedligeholdte luftkonditioneringsanlæg, forstøvningsanlæg, fontæner og brusebade), Q-feber (bakterien *Coxiella burnetii*) transporteret i form af indtørrede bakterier i støv fra døde inficerede dyr over større eller mindre afstande), Cryptokokkose (gærsvampen *Cryptococcus neoformans* fra fugleafføring, fx pga. duer tæt på bygningers luftindtag) og aspergillose (sporer fra skimmelsvampen *Aspergillus* kan frigives i forbindelse med nedrivning og bygningskonstruktion i tilslutning til eksisterende hospitalsbygninger og transporteres gennem luften ind til immunsvækkede patienter).(28)(29)(30). Det skal understreges, at disse infektioner i det store billede er relativt sjældent forekommende.

Referencer

1. Statens Serum Institut. Nationale Infektionshygiejniske Retningslinjer om supplerende forholdsregler ved infektioner og bærertilstand i sundhedssektoren. 2019.
2. CDC. 2007 Guideline for isolation precautions: Preventing transmission of infectious agents in healthcare settings (update 2019) [Internet]. 2007. Tilgængelig hos: <https://www.cdc.gov/infectioncontrol/guidelines/isolation/index.html%0A2007>
3. Kutter JS, Spronken MI, Fraaij PL, Fouchier RA, Herfst S. Transmission routes of respiratory viruses among humans. *Curr Opin Virol* [Internet]. 2018;28:142–51. Tilgængelig hos: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coviro.2018.01.001>
4. Bourouiba L. A Sneeze. *N Engl J Med*. 2016;375(8):e15.
5. Asadi S, Wexler AS, Cappa CD, Barreda S, Bouvier NM, Ristenpart WD. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep* [Internet]. 2019;9(1):1–10. Tilgængelig hos: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
6. Randall K, Ewing ET, Marr LC, Jimenez JL, Bourouiba L. How did we get here: What are droplets and aerosols and how far do they go? A historical perspective on the transmission of infectious diseases. *Ssrn* [Internet]. 2021;1–17. Tilgængelig hos: <https://ssrn.com/abstract=3829873>
7. Sundhedsstyrelsen. Retningslinjer for håndtering af COVID-19 i sundhedsvæsenet [Internet]. 2021. Tilgængelig hos: <https://www.sst.dk/da/Udgivelser/2021/Retningslinjer-for-haandtering-af-COVID-19>
8. Sundhedsstyrelsen. COVID-19: Forebyggelse af smittespredning. Sundhedsstyrelsen. 2021.
9. ECDC. Guidelines for the implementation of non-pharmaceutical interventions against COVID-19. 2020;
10. ECDC. Assessing SARS-CoV-2 circulation, variants of concern, non-pharmaceutical interventions and

- vaccine rollout in the EU/EAA, 15th update [Internet]. 2021. Tilgængelig hos: <https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/RRA-15th-update-June 2021.pdf>
11. Marr LC, Tang JW, Van Mullekom J, Lakdawala SS. Mechanistic insights into the effect of humidity on airborne influenza virus survival, transmission and incidence. *J R Soc Interface*. 2019;16(150).
12. Tang JW. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *J R Soc Interface*. 2009;6(SUPPL. 6).
13. Wojgani H, Kehsa C, Cloutman-Green E, Gray C, Gant V, Klein N. Hospital door handle design and their contamination with bacteria: A real life observational study. Are we pulling against closed doors? *PLoS One*. 2012;7(10):1–6.
14. Riddell S, Goldie S, Hill A, Eagles D, Drew TW. The effect of temperature on persistence of SARS-CoV-2 on common surfaces. *Virology* [Internet]. 2020;17(1):1–7. Tilgængelig hos: <https://doi.org/10.1186/s12985-020-01418-7>
15. Goldman E. Exaggerated risk of transmission of COVID-19 by fomites. *Lancet Infect Dis* [Internet]. 2020;20(8):892–3. Tilgængelig hos: [http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099\(20\)30561-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1473-3099(20)30561-2)
16. Moriyama M, Hugentobler WJ, Iwasaki A. Seasonality of respiratory viral infections: Will COVID-19 follow suit? *Annu Rev Virol*. 2020;7:83–101.
17. Musher DM. How Contagious Are Common Respiratory Tract Infections? *N Engl J Med*. 2003;348(13):1256–66.
18. Aaby P. Malnutrition and overcrowding/intensive exposure in severe measles infection: Review of community studies. *Rev Infect Dis*. 1988;10(2):478–91.
19. Johansson MA, Quandelacy TM, Kada S, Prasad PV, Steele M, Brooks JT, et al. SARS-CoV-2 transmission from people without COVID-19 symptoms. *JAMA Netw Open*. 2021;4(1):1–8.
20. Davies NG, Kucharski AJ, Eggo RM, Gimma A, Edmunds WJ, Jombart T, et al. Effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 cases, deaths, and demand for hospital services in the UK: a modelling study. *Lancet Public Heal*. 2020;5(7):e375–85.
21. Jang S, Han SH, Rhee J-Y. Cluster of coronavirus disease associated with fitness dance classes, South Korea. *Emerg Infect Dis*. 2020;26(8):27–37.
22. Stein RA. Super-spreaders in infectious diseases. *Int J Infect Dis* [Internet]. 2011;15(8):e510–3. Tilgængelig hos: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijid.2010.06.020>
23. Mourtzoukou EG, Falagas ME. Exposure to cold and respiratory tract infections. *Int J Tuberc Lung Dis*. 2007;11(9):938–43.
24. Kudo E, Song E, Yockey LJ, Rakib T, Wong PW, Homer RJ, et al. Low ambient humidity impairs barrier function and innate resistance against influenza infection. 2019;116(22):10905–10.
25. Statens Serum Institut. Infektionshygiejniske forholdsregler ved udførelse af aerosolgenerende procedurer i luftveje på patienter med mistænkt eller bekræftet covid-19 [Internet]. 2021. Tilgængelig hos: <https://covid19.ssi.dk/hygiejne/sundhedspersonale>
26. Zhou J, Otter JA, Price JR, Cimpeanu C, Meno Garcia D, Kinross J, et al. Investigating Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 (SARS-CoV-2) surface and air contamination in an acute healthcare setting during the peak of the coronavirus disease 2019 (COVID-19) pandemic in London. *Clin Infect Dis*. 2020;2(Xx):1–8.
27. Shiu EYC, Leung NHL, Cowling BJ. Controversy around airborne versus droplet transmission of respiratory viruses: Implication for infection prevention. *Curr Opin Infect Dis*. 2019;32(4):372–9.
28. Statens Serum Institut. Sygdomsleksikon [Internet]. 2021. Tilgængelig hos: <https://www.ssi.dk/sygdomme-beredskab-og-forskning/sygdomsleksikon>
29. Statens Serum Institut. Nationale Infektionshygiejniske Retningslinjer for nybygning og renovering i sundheds- og plejesektoren [Internet]. 2021. Tilgængelig hos: <https://hygiejne.ssi.dk/NIRnybygning>
30. Health Protection Surveillance Centre (Irland). National Guidelines for the Prevention of Nosocomial Aspergillosis. 2018.

1b. Smittemåder – transport fra kilde til smittemodtager – det aerobiologiske perspektiv

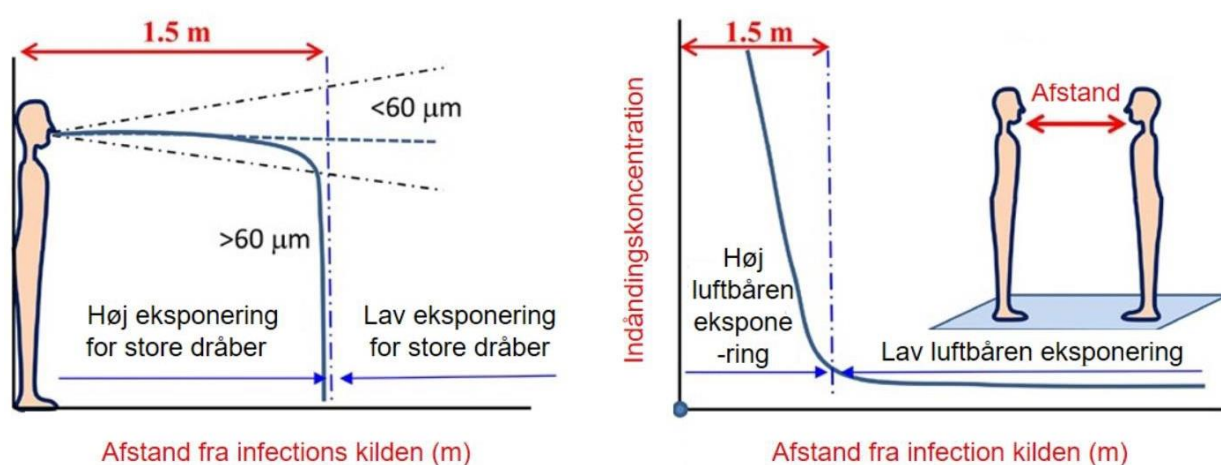
Normalt taler man om tre smitteveje for luftvejs sygdomme, nemlig dråbe spredning, luftbåren spredning og spredning ved kontakt. Dråbespredning og luftbåren spredning foregår igennem luften omkring os. De to former er delvis blevet defineret og adskilte som smitteformer fordi visse sygdomme kan relateres klart til en af de to former og delvis af historiske grunde. Foruden den nævnte opdeling kan det også være hensigtsmæssigt at opdele processerne i nærfelt imellem to personer, tilstede på samme tid og i et fjernfelt, hvor en person befinder sig i en luft med et niveau af aktive bakterier eller virus.

Dråbe spredning

Dråbeinfektion sker via store dråber, som direkte deponeres i øjne, næse, mund og luftveje på den modtagende person. De store udåndingsdråber ($>100\text{ }\mu\text{m}$) indeholder vand mm. samt eventuelle bakterier eller virus og de kan normalt kun bevæge sig i en afstand op til 1–2 m på grund af en relativ stor tyngde [1][2]. Liu et al. [3] indikerer, at dråber specielt vil falde på horisontale flader i en afstand på op til 1,5 m, som det er illustreret på Figur 1a. Xie et al. [4] har udviklet en simpel model baseret på Wells faldkurve over fordampning af dråber, der tager hensyn til relativ fugtighed og lufthastighed. De store udåndingsdråber ($60\text{--}100\text{ }\mu\text{m}$) kan transporteres i en afstand større end 6 m ved et nys, større ind 2 m ved hoste og mindre end 1 m ved ånding. Forsøg med partikler (ISO 12103-1 kalibrerede partikler i størrelsesområdet $1\text{--}200\text{ }\mu\text{m}$) viser at nogle dråber/partikler i størrelsesområdet $15\text{--}30\text{ }\mu\text{m}$ også spredes ud i rummet i stedet for at falde imod gulvet, [5]. Årsagen er sandsynligvis at dråber også udåndes ved meget lav horisontal retning i slutningen af en åndingsfunktion, tale eller host. Derfor kan de indfanges i det vertikale termiske grænselag omkring personen og føres op og ud i rummet.

Luftbåren spredning

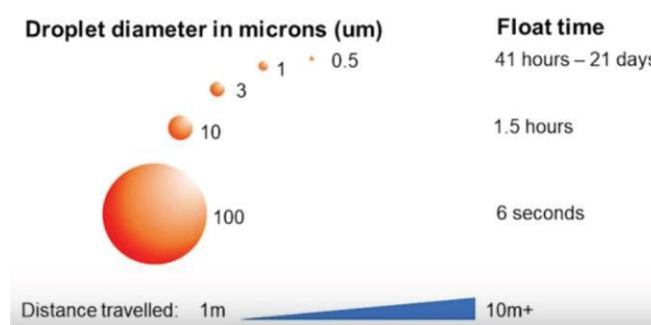
Luftbåren smittespredning kan foregå via mikrodråber der er mindre end $100\text{ }\mu\text{m}$ i diameter, [6]. Mikrodråber kan være luftbårne i timer og bevæge sig over store afstande på grund af deres lille størrelse og dermed lave faldhastighed. I et typisk indendørsmiljø kan en $5\text{ }\mu\text{m}$ mikrodråbe tilbagelægge langt mere end 10 m alt afhængig af luftstrømningsmønsteret i rummet hvis den udløses 1,5 m over gulvet. Bahl et al. [2] har i et litteraturstudium vedrørende den horisontale bevægelse af udåndingsdråber fastlagt, at mikrodråber kan observeres i en afstand af 6–8 m. Man skal imidlertid være opmærksom på, at selv om mikrodråber kan transporteres over lang afstand, så falder koncentrationen dramatisk inden for den første meter (Bjørn et al. [7] Nielsen et al [8] og Li et al. [3]) i et godt ventileret rum, jf. Figur 1b. Denne effekt skyldes aerodynamikken i udåndingsstrømningen fra en person i forbindelse med ånding, tale, sang, nys og hoste. Forsøg med mikrodråbe dynamik indikerer at luftbårne mikrodråber også kan være en smittevej i den korte afstand i forhold til den traditionelle betragtning hvor man anser dråbeinfektion til at være den eneste eller vigtigste smittevej i den korte afstand, Chen et al. [9].



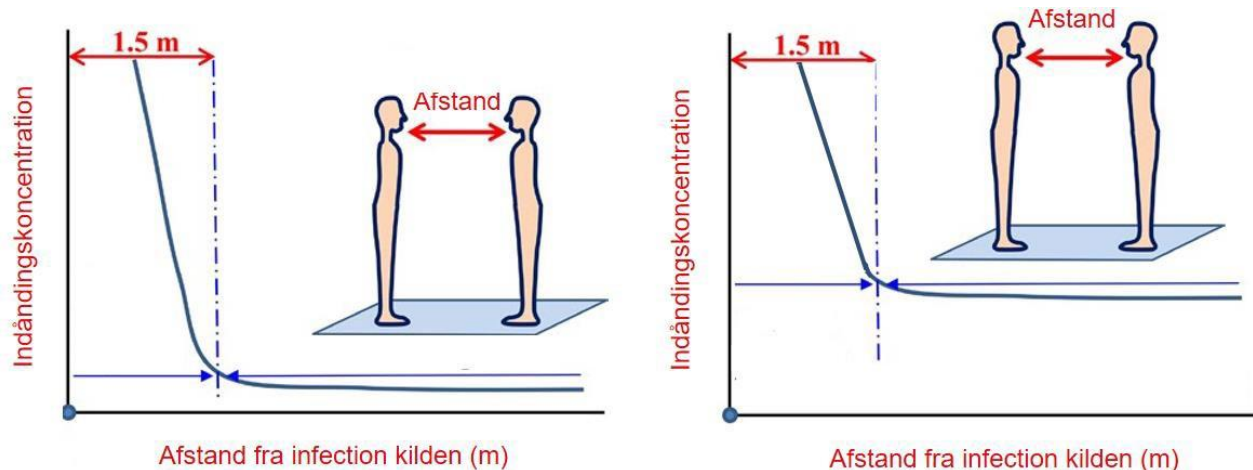
Figur 1. (a) Beskrivelse af luftbanen for en dråbe ved udånding. (b) Beskrivelse af indåndet sporgas koncentration (der simulerer mikrodråber) af en modsat placeret person som funktion af afstanden fra smittebærerne [3]

Der vil ikke være stor forskel på dråbetransmission og luftbåren smittespredning hvis lokalet er tilstrækkeligt ventileret. Der vil således være en 'høj risiko' for smitte når personer står tæt og en 'lav risiko' når der er nogen afstand imellem personerne. Derfor er det svært at skelne imellem dråbeinfektion og luftbåren infektion, og det vil i begge situationer være rigtigst at holde afstand og i sidste tilfælde at have et godt ventileret lokale. Hvis lokaler har en dårlig ventilation, for eksempel ved for lavt luftskifte eller på grund af en lav ventilationseffektivitet af luftfordelingssystemet, vil der være en 'høj risiko' overalt i lokalet, jf. figur 2a og 2b. Dette er ikke tilfældet ved dråbetransmission, som i princippet ikke er afhængig af luftskiftet [10].

Mikrodråber kan være luftbåren i størrelser op til 100 μm , alt afhængig af omgivende lufthastighed og turbulens. Figur 1C viser faldtid i stillestående luft [10a].



Figur 1C. Faldtid for mikrodråber i luft.



Figur 2. Luftbåren smittespredning i et lokale ved højt (a) og lavt (b) luftskifte [10].

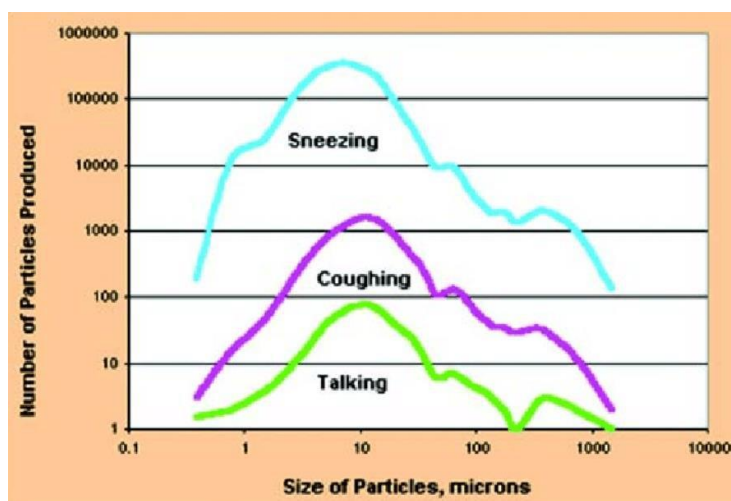
Nærfeltet (< 1,5 m) omkring personer

Transport af mikrodråber foregår i personens nærfelt og i rummets luftfordeling. Udåndingen består af en pulserende stråle der er afhængig af åndings frekvens og minutvolumen. Diameteren af udåndingens strømning vokser med afstanden fra munden og der sker en opblanding med den omgivende luft. Derfor vil koncentrationen af en eventuel virus falde med stigende afstand fra den person der udånder denne virus.

Enkeltstående hændelser som nys og hoste vil typisk generere en vortex strømning og koncentrationen vil også i dette tilfælde falde langs strømningen på grund af opblanding [11]. Tale og sang vil give en strømning som er sammensat pulserende stråler og markante vortex strømninger. Tale og sang kan være en stor kilde til dråber og mikrodråber og der kan argumenteres for at anvende mundbind for at stoppe dette lokale smitteniveau, ved at sprede dråberne i et større volumen. Abkarian et al. [12] beskriver en undersøgelse af

de forskellige sprogs/sætningers evne til at transportere mikrodråber.

Figur 2C viser hvorledes der udåndes dråber og mikrodråber ved (ånding), tale, (råb, sang), hoste og nys [12a].



Figur 2A. Udånding af partikler ved tale, hoste og nys

Tophastigheden (ved munden) for hoste/nys og for ånding er henholdsvis 6-22 m/s (>10m/s i middel) og 1-5 m/s. Hastighedsniveauet er afhængig af køn, alder, aktivitetsniveau mm. [13] [14] [15].

Udåndingen og det termiske grænselag omkring kroppen agerer sammen i mikro-miljøet. Når den varierende udånding er indledende og svag, vil grænselaget transportere dråber og mikrodråber lodret op og ud i rummet (25 cm/s), og når udåndingen er kraftig i en cyklus, vil dråber og mikrodråber blive transporteret vandret ud i rummet [5].

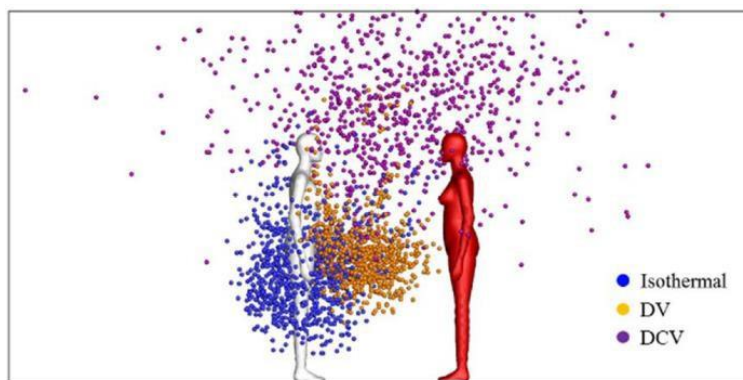
En persons indånding stammer fra det opadgående grænselag omkring personen og er derfor en integreret del af den luft der befinder sig under mund og næse [16] [17].

Fordelingen af virusbærende dråber og mikrodråber i nærfeltet afhænger af mange parametre som fx geometri af lokalet, fordeling af varme- og kuldebelastning, positionering af personer, retning og højdeniveau af ansigter [18], personernes bevægelse og aktivitetsniveau [19] [20] så vel som luftfordelingssystemet indflydelse på mikro-miljøet [21] [22].

Som det er beskrevet ovenfor indgår der partikler, dråber, mikroråber og støv i mange forskellige størrelser i luftens og tyngdekraftens bevægelsesfelt. Figur 2B viser størrelsesforholdene af disse elementer. Det er værd at bemærke at virus ikke betragtes som enkeltelementer i luften men de transporteres ofte som del af dråber, mikrodråber og støv [22a].



Figur 2B. Størrelser af partikler. Partikler op til 100 my kan i mange sammenhænge betragtes som luftbårne partikler.



Figur 3. Fordeling af dråber der udsættes for fordampning i et ventileret lokale. DV: Fortrængningsventilation. DCV: Diffus Loftventilation [23]. 'Rød' manikin er smittebærer.

Fjernfeltet (> 1,5 m), luftfordelingssystemer og luftskifte

Figur 3 viser eksempler på indflydelsen af et luftfordelingssystem, både i nærfelt og fjernfelt. Lokalet er ventileret med henholdsvis Fortrængningsventilation (DV), Diffus Loftventilation (DCV) eller det er uden ventilation. De udåndede dråber indleder en fordampning efter udånding og hvis der ikke er ventilation synker de (blå) imod gulvet. I tilfælde af Fortrængningsventilation samles de (gule) i en høj koncentration i den lodrette temperatur gradient, hvilket er meget typisk. Og hvis der anvendes Diffus Loftventilation vil mikrodråberne stige til vejrs i den strømning der dannes af personernes termiske grænselag og ånding.

Udendørs ophold

Man anser ofte smittespredningen for at være lavere udendørs end indendørs. En undersøgelse af ca. 300 smittespredningstilfælde i Kina først på året 2020 kunne kun påvise to tilfælde der involverede udendørs spredning [24]. Dette resultat bliver ofte citeret som en indikering af en rimelig sikker beskyttelse ved udendørs ophold.

Udendørs ophold hvor man deltager i festivaller, sportsbegivenheder mm, og hvor man er mange og står tæt, har naturligvis ikke denne sikkerhed. Det vil være naturligt at betragte den smittespredning der opstår i denne situation på samme niveau som en man har ved indendørs ophold i samme tæthed og tidsrum. Ved rolige vejsituationer i en temperatur tæt ved komforttemperatur vil der opstå en strømningssituation omkring en del af en gruppe, der vil være meget lig den situation gruppen vil have hvis den opholdt sig indendørs.

Der kan laves nogle beregninger på udendørs smittespredning som baserer sig på de fysiske modeller som også bruger ved ekstern forureningsberegninger [25]. Disse beregninger giver nogle detaljer om betydningen af parametre, som tæthed af personer (personer per m^2), vind (m/s) og luftens stabilitet (turbulensens længdeskala). De beregnede resultater udtrykkes ved forholdet imellem eksponering ude divideret med eksponering inde R. Ved en meget ustabil luft og en vindhastighed på 1 m/s er eksponeringsforholdet 0,01 ved en persontæthed på 0,25 person/ m^2 og 0,125 ved en persontæthed på 3 personer/ m^2 . Alt i alt ligger R fra **0,5** til **0,01** i de fleste tilfælde, altså en betydelig reduktion ved udeophold.

Der kan dog i visse tilfælde ved meget stabil luft være tale om eksponeringsforhold der er større end 1,0, altså større eksponering uden for end indenfor (med opblandingsventilation). Stabil luft betyder et meget dæmpet turbulensniveau og en positiv lodret temperaturgradient. Dette svarer meget til situationen indendørs med fortrængningsventilation, hvor der også kan være problemer i forhold til opblandingsventilation [8]. Samtidig har virus en længere overlevelse ved lave temperaturer omkring frysepunktet hvilket man bør have med i sine risikoovervejelser både ude og inde Biryukov et al. [26].

Referencer

- [1] W. F. WELLS, "ON AIR-BORNE INFECTION*," *Am. J. Epidemiol.*, vol. 20, no. 3, pp. 611–618, Nov. 1934.
- [2] P. Bahl, C. Doolan, C. de Silva, A. A. Chughtai, L. Bourouiba, and C. R. MacIntyre, "Airborne or Droplet Precautions for Health Workers Treating Coronavirus Disease 2019?," *J. Infect. Dis.*, no. Xx Xxxx, pp. 1–8, 2020.
- [3] L. Liu, Y. Li, P. V. Nielsen, J. Wei, and R. L. Jensen, "Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people," *Indoor Air*, vol. 27, no. 2, pp. 452–462, 2017.
- [4] X. Xie, Y. Li, A. T. Y. Chwang, P. L. Ho, and W. H. Seto, "How far droplets can move in indoor environments," *Indoor Air*, vol. 17, pp. 211–225, 2007.
- [5] Nielsen, PV, Li, Y, Khalegi, F, Møllerskov, A & Liu, L 2012, 'A Full-Scale Study of Exhaled Droplet Dispersion in the Microenvironment around one and two Persons', Paper presented at The International Conference on Building Energy and Environment, Boulder, United States, 01/08/2012 - 04/08/2012.
- [6] Prather KA, Marr LC, Schooley RT, McDiarmid MA, Wilson ME, Milton DK. Airborne transmission of SARS-CoV-2. *Science* 2020; 370(6514): 303-304.
- [7] E. Bjørn and P. V. Nielsen, "Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms," *Indoor Air*, vol. 12, no. 3, pp. 147–164, 2002, doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x.
- [8] P. V. Nielsen, F. V. Winther, M. Buus, and M. Thilageswaran, "Contaminant Flow in the Microenvironment between People under Different Ventilation Conditions," *ASHRAE Trans.*, pp. 632–640, 2008.
- [9] W. Chen et al. (2020) Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
- [10] P. V. Nielsen and L. Liu, "The influence of air distribution on droplet infection and airborne cross infection," Aalborg Universitet, 2020.
- [10a] Stephanie Taylor, Presenter, "Optimize Occupant Health, Building Energy Performance and Revenue through Indoor-Air Hydration," 19 November 2019, Atlanta: ASHRAE.
- [11] D. G. Akhmetov, *Vortex Rings*, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, Berlin, 2009
- [12] Abkarian et al., Puff trains in speaking produce long-range turbulent jet-like transport potentially relevant to asymptomatic spreading of virus, University of Montpellier, 2020
- [12a] https://www.researchgate.net/publication/234076687_Improved_Strategy_to_Control_Aerosol-Transmitted_Infections_in_a_Hospital_Suite
- [13] C. Xu, P. V. Nielsen, L. Liu, R. L. Jensen, and G. Gong, "Human exhalation characterization with the aid of schlieren imaging technique," *Build. Environ.*, vol. 112, pp. 190–199, 2017.
- [14] J. Wei and Y. Li, "Airborne spread of infectious agents in the indoor environment," *Am. J. Infect. Control*, vol. 44, no. 9, pp. S102–S108, Sep. 2016.
- [15] Z. T. Ai and A. K. Melikov, "Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review," *Indoor Air*, vol. 28, no. 4, pp. 500–524, 2018.
- [16] Murakami, S, Analysis and design of micro-climate around the human body with respiration by CFD, *Indoor Air* 2004; 14 (Suppl 7): 144–156 www.blackwellpublishing.com/ina
- [17] A. K. Melikov, "Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction," *Build. Environ.*, vol. 91, pp. 70–77, 2015.

- [18] P. V. Nielsen, I. Olmedo, M. R. De Adana, P. Grzelecki, and R. L. Jensen, "Airborne cross-infection risk between two people standing in surroundings with a vertical temperature gradient," *HVAC R Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 552–561, 2012.
- [19] B. A. Edge, E. G. Paterson, and G. S. Settles, "Computational study of the wake and contaminant transport of a walking human," in *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 2005, vol. 127, no. 5, pp. 967–977.
- [20] J. W. Tang *et al.*, "Door-opening motion can potentially lead to a transient breakdown in negative-pressure isolation conditions: The importance of vorticity and buoyancy airflows," *J. Hosp. Infect.*, vol. 61, no. 4, pp. 283–286, Dec. 2005.
- [21] Olmedo, I, Nielsen, PV, Adana, MRD & Jensen, RL 2013, 'The Risk of Airborne Cross-Infection in a Room with Vertical Low-Velocity Ventilation', *Indoor Air Online*, bind 23, nr. 1, s. 62-73. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00794.x>
- [22] Olmedo, I, Nielsen, PV, Adana, MRD, Jensen, RL & Grzelecki, P 2012, 'Distribution of Exhaled Contaminants and Personal Exposure in a Room using Three Different Air Distribution Strategies', *Indoor Air*, bind 22, nr. 1, s. 64–76. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x>
- [22a] "Size of Coronavirus Particle PM2.5 and Bacteria," [Online], 10th April 2020, <https://smartairfilters.com/wordpress/wpcontent/uploads/2020/02/Size-of-coronavirus-particle-pm2.5-and-bacteria-750x410.jpg>.
- [23] Liu, L, Nielsen, PV, Xu, C, Wei, J & Li, Y 2016, Impacts of Modelling Simplifications on Predicted Dispersion of Human Expiratory Droplets. i 14th International Conference on Indoor Air Quality and Climate (INDOOR AIR 2016). bind 3, International Society of Indoor Air Quality and Climate, s. 1484-1491, Indoor Air 2016, Ghent, Belgien, 03/07/2016.
- [24] Hua Qian, Te Miao, Li Liu, Xiaohong Zheng, Danting Luo, Yuguo Li (2020), Indoor transmission of SARS-CoV-2, *Indoor Air*, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ina.12766>
- [25] B.R. Rowea, A. Canosa, J.M. Drouffe and J.B.A. Mitchell (2020), Simple quantitative assessment of the outdoor versus indoor airborne transmission of viruses and covid-19, medRxiv preprint doi: <https://doi.org/10.1101/2020.12.30.20249058>
- [26] Jennifer Biryukov et al. SARS-CoV-2 is rapidly inactivated at high temperature, *Environmental Chemistry Letters* <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01187-x>

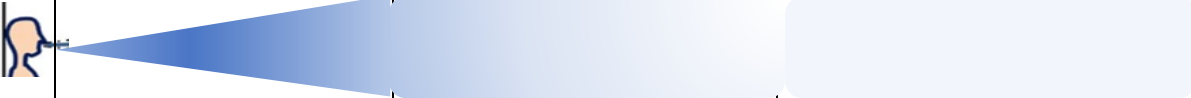
Smitte gennem luft – forskellige benævnelser afhængig af sektor

Baggrunden for nedenstående skema er

1) at der anvendes forskellige betegnelser, afhængigt af om man er forankret i

- Den ventilationstekniske/ indeklimaorienterede sektor (rådgivere, Ingeniører, miljømedicinere & forskere), hvor man er afhængig af viden om partikelstørrelser, partikelkoncentrationer, ventilationssystemer, vejrforhold, krav til indeklima, arbejdsmiljø og energiforhold samt evt. arbejdsopgaver, for at kunne projektere, drifte, vedligeholde og evt. udbedre ventilationssystemer eller supplere med ekstra tiltag. Tiltag, både for komfort og for at mindske spredning af forurening, herunder smittebærende partikler.
- Den kliniske sektor, hvor man er afhængig af få, let forståelige kategorier for at forebygge smitte, hvor følgende opholder sig: De (mest syge) inficerede personer (indlægges med infektion), de sårbare pga. anden sygdom eller behandling (udsat for infektion) samt personale (hensyn til arbejdsmiljø og til risikoen for at viderebringe smitte til patienter, kolleger og familie) og besøgende.

2) sammen med teksten i rapporten at skabe forståelse for betydningen af, at der for nogle virusbetingede luftvejsinfektioner er én eller to betydelige smittemåder, for andre er der mere end to (bl.a. gennem luften) – og praktisk viden og erfaring om konkrete infektioner har betydning for, hvilken vægt man skal tillægge nedenstående kategorier af smitte gennem luft.

Koncentration af potentielt infektiøse partikler			
Partikelstørrelse	Alle partikler > 0 µm En fordeling, der strækker sig fra dråber til mikrodråber. Afhængig af lufthastighed, luftfugtighed, temperatur og smittekilde (inkl. infektionens natur)	Partikler (overvejende < 100 µm)	Partikler (overvejende < 5 µm)
Afstand fra smittekilde i praksis	Nærfelt	Fjernfelt	
	Typisk op til 1.5-2 m	> 1.5-2 ≤ 8 m inden for det samme rum med personer, som smitter	> 8 m uden for det rum hvor en person, der smitter, befinder sig. Evt. gennem ventilationsanlæg og/eller i store rum.
Aktuelle benævnelser - ventilationssektor	Luftbåren smitte		
	Dråbesmitte	Mikrodråbesmitte	
Aktuelle benævnelser - sundhedssektor	Dråbesmitte	Aerosolsmitte*	Dråbekernesmitte eller luftbåren smitte
Fælles forslag, anvendt i denne rapport**	Kortdistance-smitte	Mellemdistance-smitte	Langdistance-smitte

*Ikke tidligere anvendt som smitemåde-kategori i denne kontekst (men i forbindelse med procedurer som instrumentering eller behandling i patientens luftveje eller inden for forskellige ikke-personrelaterede områder, hvor der dannes væskeformige aerosoler med potentiel smitterisiko).

**Anvendt i rapporten for at sikre fælles forståelse i forbindelse med læsningen.

Ud over ovenstående vil også støv med varierende partikelstørrelse kunne lægge sig på overflader, og hvis disse partikler kan frigøres fra overfladen pga. bl.a. luftstrømme (ventilation, personbevægelser i rummet mm.), kan de transporteres gennem luften, i afstande fra udgangspunktet, der igen afhænger af luftstrømme og partikelstørrelse.

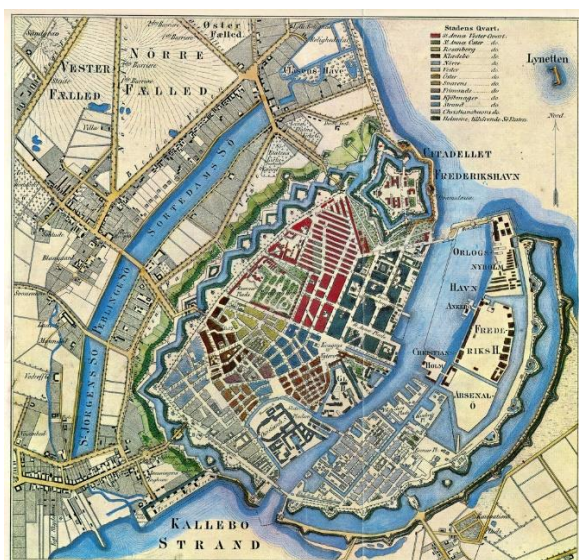
Bygninger og Byers indretning og påvirkning af COVID-19

Arkitektur og historisk udvikling i forhold til tidligere pandemier

Epidemier har igennem tiden påvirket samfundet ganske betragteligt. Både samfundsmæssigt og i fysisk sammenhæng. I det tidligt-moderne samfund blev sygdomsepidemier set som Guds svøbe over et syndigt folk, der kun kunne afhjælpes gennem en streng overholdelse af den religiøse ortodoksi. Gradvist ændrede dette sig til, at man fra myndighedernes side satte aktivt ind for at forbedre hygiejnen i byrummet.

Da der i 1710 brød en pestepidemi ud i Helsingør satte regeringen derfor konsekvent ind. Pesten spredte sig snart til København, hvor Frederik 4. efter italiensk forbillede nedsatte en sundhedskommission til at tage sig af den hastigt voksende epidemi. Dette kan betragtes som det moderne sundhedsvæsens første spæde barneskridt. Et af kommissionens tiltag var at indføre rejseforbud og oprettelse af en karantænestation på øen Saltholm. Indsatsen i det 18. århundrede kan således direkte sammenlignes med vor tids rejseforbud i 7 nordjyske kommuner og oprettelsen af COVID-19 isolationshoteller for borgere, der ikke har mulighed for at isolere sig i eget hjem.

Industrialiseringens gennembrud i 1800-tallet medførte en betydelig befolkningsforskydelse fra land til by. Industribyernes boligkvarterer var dog stadigvæk defineret af de rumlige begrænsninger, som de foregående århundreder havde pålagt dem. Mange byer var endnu stængt inde bag de gamle militærvolde. Den manglende ekspansionsmulighed og den stadigt stigende befolkningstilvækst medførte en fortættet boligmasse, hvor sanitære forhold var yderst begrænsede - man omtalte i samtiden disse forhold som præget af "... dårlig luft og råddenskab." I 1853 ramtes det overbefolkede København af en voldsom koleraepidemi, med ca. 5.000 dødsofre til følge.



Billede: KBH med volde



Humleby - Vesterbro

Koleraangrebet i 1853 satte gang i endnu en diskussion om samfundets rolle under epidemiudbrud. Arkitektonisk var dette skelsættende. Fokus rettedes nu mod at skabe sunde beboelser, på tværs af sammenfundsklasserne. Man tænkte således byudviklingen ind i en *sundhedshelhed*. Voldenes begrænsninger blev brudt og en gennemgribende kloakeringsproces blev søsat. På en mindre skala skete der også forrykninger. Nye bygningstypologier vandt frem, hvor gode sanitære forhold samt frisk lys og luft var selve omdrejningspunktet. Lægeforeningens boliger "Brumleby" fra 1854 af arkitekterne Bindesbøll og Klein og Arbejdernes Byggeforenings "Humbleby" fra 1886 af Frederik Bøttger, der var bygget til ansatte ved Burmeister & Wain, er begge gode eksempler herpå.

Billeder: Brumleby



Disse tanker blev i høj grad videreført i den tidlige funktionalisme under indflydelse af erfaringerne med den katastrofale spanske syge 1918-20. Betydningen af boliger med god udsigt, frisk luft, og god hygiejne kan tydelig ses i Le Corbusiers arbejder – både i store boligbebyggelser som *Unité d'Habitation* 1945 og i *Villa Savoye* fra 1928-31, hvor der er placeret en håndvask i entréen.

Billeder: Unité d'Habitation 1945



Villa Savoye fra 1928-31



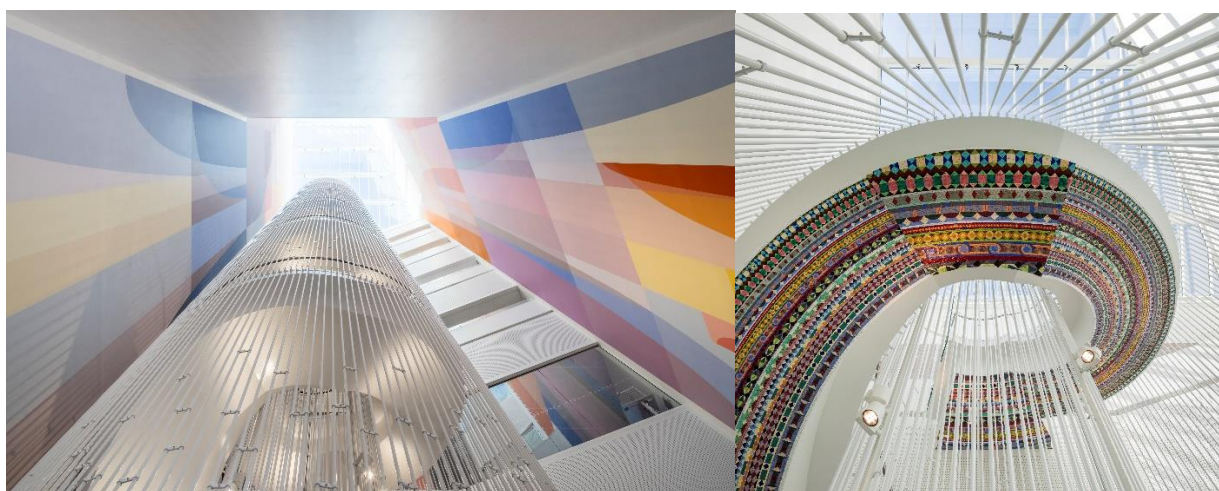
Arkitektur og adfærdsdesign

Det er ved at gennemtænke og bearbejde byggeriets formål, funktionalitet og æstetik, at rammerne for det moderne menneskes livsudfoldelse skabes: Hjemmet, institutioner, uddannelse, arbejdspladser, kultur- og idrætsfaciliteter - bygningsudformningens grundlæggende designparametre, kan koges ind til rum, rumforløb, flow gennem bygningen og ikke mindst lys.

Samfundsidealiser rundet af en demokratisk tankeforestilling baner vejen for nye urbane sammenhænge og nye bygningsværker. I denne sammenhæng benytter arkitekten sig i stor stil af det såkaldte *Nudging*-princip til at frembringe den optimale brug af et nyt bygningsværk. I samfundsvidenskaben taler man overordnet set om nudging som en metode til at ændre borgeres adfærdsmønstre, her i en mere hensigtsmæssig retning.

I arkitektonisk henseende benyttes nudging og adfærdsdesign i byggerier, hvor der blandt andet er behov for en bygningsintegreret *wayfinding-strategi*, der skal guide personer den rigtige vej i byggeriet eller hindre uvedkommende adgang f.eks. af sikkerhedsmæssige årsager til bestemte områder i byggeriet. Et godt eksempel er det moderne hospitalsbyggeri, hvor strategien anvendes til at skabe tryghed for patienter og pårørende, når de skal bevæge sig rundt mellem et hospitals mangeartede destinationer. I arkitektbranchen benyttes evidensbaseret design, hvor *Healing Architecture* som begreb understøtter funktionalitet og flow i komplekse byggerier. Ved bevidst at formgive med afsæt i f.eks. dagslys, udsigt til grønne områder og kunst kan arkitekten gennem subtil nudging dirigere bevægelsesmønstrene i et meget komplekst byggeri. Hermed lettes arbejdsgangen ikke blot for det sundhedsfaglige personel, men patienter stimuleres tilsvarende ved at befinde sig i rum karakteriseret af positive distraktionselementer. Dette kommer til udtryk i Rigshospitalets nybyggede Nordfløj, hvor udsigten mod Fælledparken og Højblokken benyttes til at understøtte patienternes bevægelsesmønstre, der intuitivt dirigeres af stedsansen. Stedsansen pirres og stimuleres ligeledes ved den markante brug af bygningsintegreret kunst.

På Rigshospitalet er to centrale trapper placeret meget synligt som to markante kunstværk, der opfordrer patienter og personale til at benytte trapperne fremfor elevatorerne.



Billeder: Trappe 1 (Malene Landgreen), Trappe 2 (Erik A. Frandsen) Foto: Adam Mørk

COVID-19's påvirkning af det moderne byggeri:

Arealudnyttelse:

Igennem de sidste årtier er de danske bysamfund blevet stadigt mere fortættet. Institutioner fra børnehaver til hospitaler centraliseres i store enheder, mens vandringen fra land til by fortsætter og fortsætter.

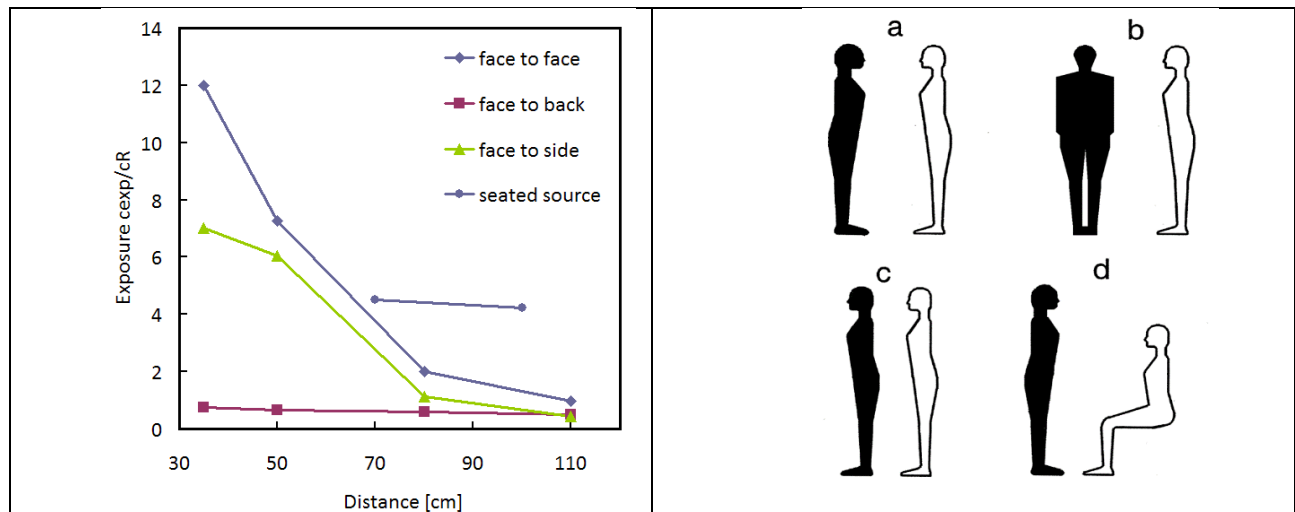


Urbanisering medfører naturligvis, at mange personer lever og opholder sig på ganske få arealer. Ligeledes har kvadratmeterudnyttelse været drivende for projektudviklingen af investeringsmæssige hensyn. Vi ser således mere og mere kompakt byggeri skyde op af jorden. Der er rift om de få kvadratmeter, der er til rådighed i de større byer.

Alt dette medfører en række udfordringer for byggebranchen i en pandemitid, særligt hvis vi holder os sundhedsmyndighedernes anbefalinger om **afstand, hygiejne og luftkvalitet** for øje.

Afstand:

Afstandsfigur fra XX.



Ovenstående figur fra xx beskriver hvorfor det er så vigtigt at overholde afstandskravet.

Afstandskraverne medfører en nødvendig gentænkning af den eksisterende bygningsmasses anvendelse, samtidig med, at man må analysere, hvorledes den nuværende og eventuelt kommende pandemier vil påvirke fremtidens nybyggerier.

Tiltag der skal begrænse COVID-19 smittespredning ses nu overalt i det eksisterende byggeri: Det være sig midlertidige og mere permanente. Man må antage, at muligheden for at tilvejebringe fleksible afstandskrav vil blive indarbejdet i de kommende nybyggerier, og evt. som ændringer i lov-værket.

Person-flow i bygninger:

For at opnå den bedst mulige arealudnyttelse, sideløbende med at gældende afstandskrav overholdes, er der en række hovedgreb, der kan anvendes.

På trapper kan personen selv skabe den nødvendige afstand, mens elevatorer ofte er dimensioneret efter vægt – her vil en synliggørelse af trapper jf. Rigshospitalets trappestrategi give god mening.

Det kan blive nødvendigt at udvide korridorbredder og evt. ensrette bevægelsesmønstrene. En sådan strategi anvendes både i nybyggerier og ved ombygningsarbejder. F.eks. er Jorn Museet i Silkeborg i gang med en større ombygning, hvor der etableres nye åbninger mellem udstillingssalene for at lette presset på de allerede tilstedeværende trafikårer. Dette betyder, at hidtidige forestillinger om god museumsarkitektur må tages op til genovervejelse.

Derudover kan de ændrede krav til bygningers anvendelse og indretning lede til, at eksisterende brandstrategi nødvendigvis må gentænkes. Hermed må der påregnes ikke ubetydelige økonomiske konsekvenser, ikke bare spatalt, men også tertiært. Midlertidige, bygningsintegrerede løsninger er et forsøg på at skabe større fysisk afstand mellem de tilstedeværende, som f.eks. markeringerne i gulvet og opsatte plexiglasskærme i forretninger og begrænsninger af antal personer pr. m².

Hjemmearbejdspladser og faste arbejdspladser:

Etableringen af hjemmearbejdspladser som et middel til at skabe afstand både på arbejdspladsen og i den kollektive trafik betyder, at mange har gentænkt indretningen af boligen samt at nye boligprojekter integrerer hjemmearbejdspladser i planløsningen.

I dagens kontorindretning har krav til afstanden mellem de enkelte arbejdspladser skabt udfordringer. I mange kontorlandskaber sidder man ofte med under 1-2 m afstand, mens enkeltmands- og 2-mandskontorer ofte er designet ud fra mindstekravet, som er 12 m³ pr. person. Mekanisk ventilation kan nedsætte dette krav til 8 m³. Storrumskontorer har den fordel at have stor fleksibilitet, da man ret simpelt kan gentænke møbleringen, mens de mindre kontorer er meget statiske i deres anvendelse.

Den udstrakte indførelse af hjemmearbejdspladser har betydet, at virksomheder har fået øje på det mulige besparelspotentiale, der ligger i at indskrænke antallet af faste arbejdspladser. Omvendt har mange medarbejdere ligeledes draget nytte af ikke at skulle bruge tid på transport. Dog berører disse økonomiske og tidsmæssige smågoder ikke de betydelige menneskelige og arbejdsmæssige omkostninger, der opstår ved isolation og Zoom-baseret hjemmearbejde.

Designmæssigt betyder dette at man må bygge så fleksibelt som muligt, hvilket peger på så store enheder som muligt, hvor en fleksibel indretning kan tilvejebringes med færrest mulige omkostninger. Med de

øgede afstandskrav mellem for eksempel faste arbejdspladser vil arealstandarden øges; dette vil have en afsmittende effekt på først anlægskostningerne og siden driftsomkostningerne. Møblering af offentlige rum både inde og ude skal planlægges, således at krav til afstand og luftcirkulation kan opfyldes.

Hygiejne:

Indretning

Ved planlægning af hospitalsprojekter udarbejdes der nu nye kravsspecifikationer i forhold til antallet af både kontakt- og luftsmitteisolater dvs. enestuer med sluser med håndvaske og mulighed for kittelskift og lufttryksdifferentiering.

Der er nye, generelle krav til byggerier med klare zoneplaceringer ved indgangsområder, hvor hygiejnestationer kan placeres synligt, - her tænkes både i håndvaske og i opsætning af spritdispensere.

Det synlige nye "gadeinventar" - spritdispenseren - har skabt et nyt marked for store og små producenter. Designmæssigt arbejder LINK Arkitektur pt. med at udvikle en spritdispenser for VOLA, der skal indgå i VOLAs højt præmierede designprogram.

Overflader

Generelt arbejdes der med så få kontaktpunkter som muligt. Her kan der indarbejdes berøringsfrie armaturer, automatik på døre og elevatorer, med sensorer og evt. ansigtsgenkendelse.

Indretningsmæssigt er der krav til rengøring af overflader. Her stilles ikke kun krav til materialer, men også til selve opstillingen af inventar, hvor alt enten skal have hulkehl med faste fuger, eller det skal friholdes 5 cm fra væggen.

Nogle overflader har antibakterielle egenskaber, men anvendelsen er ikke særligt udbredt, da evt. negative påvirkninger ikke er undersøgt.

Det er kendt at UV-lys har en antibakteriel effekt, og der er gjort forsøg med at indføre vinduesglas, der tillader UV-stråler at trænge igennem i forskellige hospitalsbyggerier. Dette har dog haft en så stor ekstraomkostning, at muligheden er blevet fravalgt.



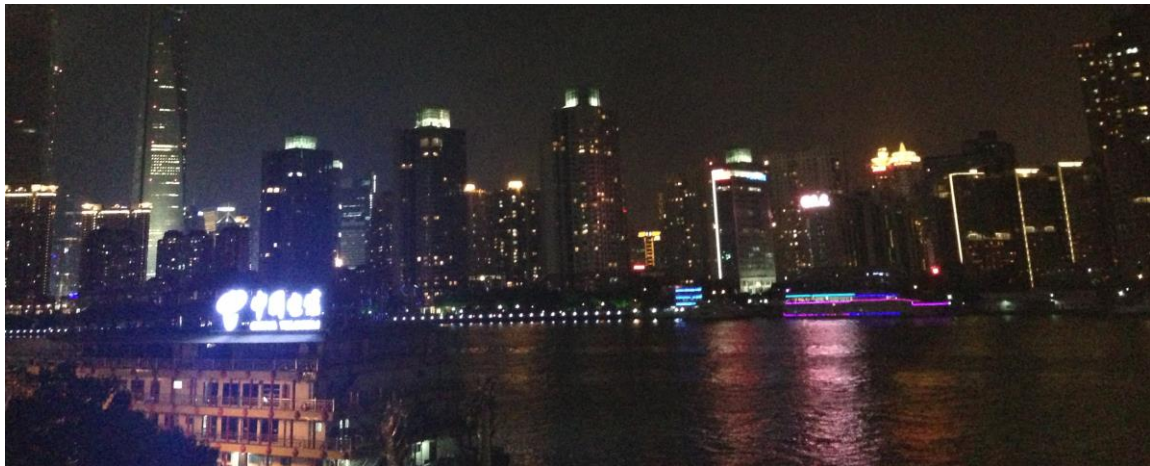
Luftkvalitet:

FN skønner at 70% af verdens befolkning vil bo i byer i år 2050. En fællesnævner for de største, danske byer er et politisk fokus på at skabe en samfundsstruktur, hvor både partikelforurening og CO2-udslip bekæmpes, mens der samtidigt tænkes i byfortætning.

I Aarhus Kommune er der således udarbejdet en højhuspolitik, hvis formål er *"... at sikre, dels at høje huse i visse områder er en mulighed, dels at den interesse, som er for høje huse i Århus, udmøntes i projekter der planlægningsmæssigt er velbegrundede og som i bred forstand kan tilføre byen noget positivt".*

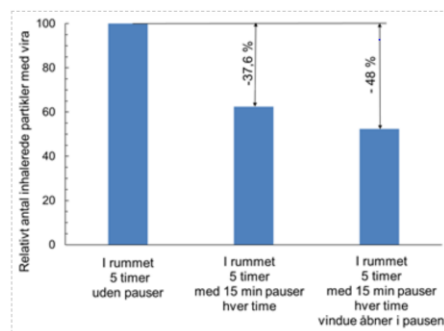
Tendensen er i diametral modsætning til byudviklingen i 1850'erne og i begyndelsen af funktionalismen, som var domineret af ønsket om lys, afstand og frisk luft.

Udfordringen for arkitekten vil således være at forene dette forhold med den post-pandemiske virkelighed under en æstetisk og formgivende kvalitet.



Naturlig udluftning og bygningers indretning

For at opnå gode muligheder for en styret, naturlig udluftning, må der etableres oplukkelige vindues- og døråbninger, der kan tilvejebringe et effektivt luftskifte i rummene. Placering og åbningsarealer må planlægges nøje med udluftningspotentialt for øje; samtidigt kravet til udluftning en gang i time af for eksempel undervisningsrum stille krav til opholdsarealer i disse pausesituationer, vil dette vil kunne få betydning for planlægning af fremtidens byggerier.



Mekanisk ventilation

De typologier, der kan anvendes, er velbeskrevet i de øvrige afsnit.

Et øget behov for mekanisk ventilation vil få stor betydning for bygningers indretning. Set i konteksten vil en vis fleksibilitet i anlæggenes ydeevne alt efter behov være væsentlig for at kunne håndtere fremtidens skiftende behov.

Anlægsudgifter

De markeds kræfter, der styrer nye boligbyggerier og nye kontorbyggerier, er baseret på udnyttelsespotentialer af en konkret byggegrund.

Indarbejdelsen af teknisk ventilation i nybyggerier, hvor der i dag ikke er krav, vil betyde, at der både skal sættes areal af til selve ventilationsaggregaterne og til skaktføring.

Begge byggerityper vil blive udfordret i forhold til faktisk arealudnyttelse og deraf afledte lejeindtægter og/eller salgspris.

Det vil kræve en dybere undersøgelse at komme med et mere eksakt estimat for omfanget.

De forskrifter, der i dag regulerer de forskellige rumtypers krav til luftskifte og renhed i hospitalsbyggeriet, betyder, at ca. 15% af et hospitals samlede areal er udnyttet til mekaniske ventilationsanlæg og til føringsskakte for ventilationsrør.

Drift og energiforbrug

Ventilationsanlæg har et stort energiforbrug, som skal indtænkes i de driftsøkonomiske overvejelser, der er forbundet med en bygnings generelle livscyklus.

I hospitalsbyggeri, hvor kravet til ventilation er veldefineret, drukner udgifterne der indgår i serviceomkostningerne i den store lønudgift, der udgør næsten 60% af hospitalets totale driftsbudget. Her er behov for en større udredning for at afdække de samfundsmæssige omkostninger.

Fleksibilitet og fremtidens behov

Retro perspektivisk set er det interessant at krav om afstand mellem mennesker (og selvisolering), krav til håndvaske/sprit og udluftning har været anvendt som effektive forebyggende tiltag. Set i forhold til krav i kommende byggerier må ønsket om fleksibilitet både i arealdisponering og i ventilationsstrategien mht. valg af typologi mekanisk, naturlig og personbåren være afgørende.

Samfundsøkonomi

Dette emne er ikke medtaget i denne rapport og vil kræve en ny undersøgelse.

Del. 3: Ventilation og indeklima – teknisk del

3.1 Ventilationsanlægs typer og luftfordelingssystemer

Der er næppe tvivl om, at effektiv ventilation af bygningers indemiljøer er afgørende både i forhold til indeklima og reducere af risikoen for luftbåren smittespredning. I forbindelse med COVID-19 pandemien har der rejst sig et spørgsmål om, hvorvidt forskellige ventilationssystemer kan være med til at nedsætte smitterisikoen eller i modsat fald øge smitterisikoen. Dette notat omhandler principperne for forskellige ventilationsmetoder og en undersøgelse af, hvilke ventilationssystemer, der anvendes i forskellige byningstyper som fx boliger, daginstitutioner og hospitaler. Notatet gennemgår principperne bag de forskellige ventilationstyper, da forståelsen af dem, er en forudsætning for at finde ud af, hvilke krav der bør stilles til ventilation, hvis smitte eller overførsel af sygdomme skal undgås i indemiljøet.

Baggrund

Siden fremkomsten af SARS-CoV-2/COVID-19 (Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus-2/Coronavirus Disease 2019) er risikoen for smitte i indemiljøer blevet diskuteret indgående [1–4]. Det er antaget – omend ikke bevist [4,5] – at hovedsmittevejene er (a) berøring af overflader eller tæt kontakt med personer med smitte og efterfølgende berøring af øje, næse eller mund og (b) luftvejsdråber ved hosten eller nysen. De råd, Verdenssundhedsorganisationen (WHO, World Health Organization) har givet til at undgå smitte, har derfor været hhv. god håndhygiejne, og at mennesker skal holde en afstand fra hinanden på mindst 1 m [1]. Det internationale samfund – heriblandt WHO – har været sen til at erkende, at der er en risiko for, at SARS-CoV-2 kan være luftbåren [1–4]. Her er det væsentligt at bemærke, at luftvejsdråber ikke betragtes som luftbårne.

Ved luftbåren menes, at en virus kan smitte via dråber med en aerodynamisk diameter på mindre end 5–100 µm [6,7] eller viruspartikler alene. Partikler af denne størrelse kan blive hængende i luften gennem længere tid. Fordi partiklerne ikke daler hurtigt ned og aflejres, kan de blive fanget i luftstrømme, som kan transportere partiklerne over afstande, der overstiger 1 m. En luftbåren virus kan derfor smitte over afstande, der er større end 1 m [6–10]. De luftbårne partikler har dog især en høj koncentration tæt ved smitekilden under 1 m og kan smitte kraftigt i dette område [11–17]. Det er samme område hvor der også er den høje koncentration af dråber.

Det har af det internationale samfund været betragtet som et åbent spørgsmål, hvorvidt SARS-CoV-2 er luftbåren eller ej. Der er imidlertid en del, der taler for, at SARS-CoV-2 kan være luftbåren. Flere studier har vist at SARS-CoV-1 er luftbåren [18–22], og det er aldrig blevet bevist, at der er patogener, der kun er smitsomme via luftvejsdråber (her forstået som partikler > 5 µm) [5]. Herudover er måden, hvorpå luftvejsdråber kan omformes til de mindre luftbårne partikler velkendt: luftvejsdråber med en aerodynamisk diameter mindre end 60–100 µm fordamper, inden de kan nå at deponeres på overflader og bliver af den vej til luftbårne partikler [8,9,23]. Denne transformation fra luftbåren dråbe til partikel er blandt andet illustreret ved simulering af dråber der fordamper tidligt i udåndingsforløbet [24]. Hertil kommer, at menneskers udånding i udgangspunktet består af både luftvejs- og luftbårne partikler [5,10,23].

SARS-CoV-1 er ikke den eneste kendte luftbårne virus. Det har længe været vidst, at tuberkulose, mæslinger og skoldkopper er luftbårne [25], og studier har vist, at blandt andre MERS-CoV (Middle East Respiratory Syndrome) [25,26] og influenza [27,28] kan være luftbårne. Der er foretaget in-situ målinger på sygehuse i Wuhan, Kina, der indikerer, at også SARS-CoV-2 kan være luftbåren [29,30]. Således har både ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers) [31] og REHVA (Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations) [32] i foråret 2020 anerkendt risikoen for, at SARS-CoV-2 kan være luftbåren. I juli 2020, efter at have modtaget et åbent brev fra 239 videnskabsfolk, hvori videnskabsfolkene opfordrer til anerkendelse af, at SARS-CoV-2 kan være luftbåren [2], anerkendte WHO også risikoen [1,33].

Skandinaver bruger op mod 90 % af deres liv indendørs [34], og det er bredt anerkendt, at ventilation er en af de mest effektive måder at begrænse spredningen af smitsomme sygdomme i indemiljøer [35–40]. Ovenstående illustrerer og understreger, at effektiv ventilation af bygninger er afgørende både i forhold til

indeklima og reducere af risikoen for luftbåren smittespredning indendørs. Pointen er gyldig, også selvom det endnu ikke er bevist, at også SARS-CoV-2 er luftbåren. Den optimale systemløsning er at anvende mindre luft til at skabe højere luftkvalitet. Det er ligeledes vigtigt, at systemet i et givent rum samtidig automatisk sørger for at luften skiftes ud. Derfor må det betragtes som rettidig omhu at øge fokus på at finde de ventilationstekniske løsninger, der kan sikre, at bygningerne får velventilerede indemiljøer, sådan at beboere og brugere af bygninger kan beskyttes mod spredning af sygdom, der hvor de bor, undervises og arbejder.

Hvad er ventilation?

Ventilation er nødvendig for at holde mængden af luftbårne forurenende stoffer indendørs på et acceptabelt niveau. Dette kan gøres ved at fjerne forurenende stoffer. Disse kan være luftformige, det kan fx være fugt i form af vanddamp. Forurenende stoffer kan også forekomme i form af partikler. Partikler (aerosol, svævestøv) er faste eller flydende stoffer, som findes svævende i luften. Den forurenede luft transporteres ud af bygningen gennem ventilation.

Ventilation kan både udføres med behandlet og ubehandlet luft. Behandling af luft kan fx bestå i regulering af temperaturen og filtrering. Når man ventilerer en bygning, er der en strøm af luft til og fra bygningen, der også kan bruges til andre formål. Ved at tilføre luft, der har en anden temperatur end rumluften, kan man påvirke temperaturen i bygningen. Denne opgave kan kræve så store luftstrømme, at de overstiger dem, der kræves for at holde niveauet af forurenende stoffer på et acceptabelt niveau. Dette betyder, at luftbehandling i ventilationssystemet har et dobbelt formål.

Hvis tilførsel af luftbårne forurenende stoffer til den indendørs luft ikke kan begrænses ved hjælp af kildekontrol, spredes forureningen hurtigt til hele luftmængden i et givent rum. Spredningen opstår både som et resultat af turbulent diffusion og som et resultat af luftbevægelser. Resultatet er en generel stigning i indholdet af aktuel forurening i den indendørs luft. En almindelig måde at holde niveauet af luftbårne forurenende stoffer i den indendørs luft nede på er at skabe en fortynding af forureningen. En alternativ eller komplementær måde at mindske mængde forurenende stoffer i indeluften på er at recirkulere indeluften gennem filtre, der er målrettet den type forurening, der ønskes frafiltreret.

For at være i stand til at erstatte luften i de bygninger, der skal ventileres, findes der tre forskellige principper: naturlig ventilation, mekanisk ventilation og hybrid ventilation. Hybrid ventilation kombinerer mekanisk og naturlig ventilation, efter behov.

Hvad indgår i et ventilationssystem?

Naturlig ventilation

Ved naturlig ventilation er drivkræfterne i systemet trykforskelle, der kommer fra termisk opdrift og vindpåvirkningen af en bygning. Systemets ydeevne er følsomt over for ændringer i udeklimaet, men også udformning og placering af aftrækskanaler/afkast og udeluftventiler har indvirkning på funktionen [41].

For at opnå en effektiv naturlig ventilation skal samspillet mellem åbninger i bygningens klimaskærm koordineres. Den mindst effektive form for naturlig ventilation er ensidig ventilation. Ensidig ventilation kan opnås ved at åbne vinduer eller udeluftventiler i en enkelt facade. Tværv ventilation er en betydeligt mere effektiv form for ventilation. Her åbnes vinduer eller udeluftventiler i to (gerne modstående) facader. Når vinden blæser luft rundt om og over bygninger, skaber luftbevægelserne trykforskelle over de forskellige bygningsdele. Tværv ventilation fungerer, fordi åbningerne i de forskellige facader gør det muligt at bruge de trykforskelle, vinden har skabt, til at drive luft gennem bygningen.

Som et alternativ til åbninger i en anden facade kan man i stedet benytte højt placerede åbninger. De kan principielt være i samme facade, men ofte vil de være placeret i toppen af et atrium eller en trappeopgang. Selvom vind stadig spiller en rolle her, så er det termisk opdrift, der er den dominerende effekt. Termisk opdrift (eller skorstenseffekten) opstår, fordi varm indeluft er lettere end den ofte køligere udeluft. Når den varme indeluft søger op, skabes der et undertryk nederst i bygningen, som kan bruges til at drive udeluft ind gennem de lavere placerede åbninger.

Et naturligt ventilationssystem er altså et system, hvor luft drevet af temperaturforskelle og vind på en forud planlagt måde bevæger sig ind og ud gennem regulerbare åbninger i en klimaskærm for på den måde at ventilere rummene i en bygning.

Mekanisk ventilation

Der findes i praksis to forskellige typer af mekaniske ventilationsanlæg: et anlæg, der kun suger den brugte indeluft ud, fx et udsugningsanlæg, og et anlæg, der både suger den brugte indeluft ud og blæser udeluft ind. Det sidste kaldes balanceret mekanisk ventilation. Al luftbevægelse foregår fra højere til lavere tryk. I et mekanisk ventilationsanlæg kommer drivkræfterne fra elektrisk drevne ventilatorer, der sikrer den lokale stigning i trykforskel, som først driver luften udefra og ind og siden indefra og ud. Udeluften tages ind gennem klimaskærmen og føres til et luftbehandlingsanlæg. Alle mekaniske ventilationssystemer består af fire delsystemer [42]:

- Rumsystem: indblæsnings- og udsugningsarmaturer i rummene
- Luftfordelingssystem: kanaler, der distribuerer luft til og fra
- Luftbehandlingsanlæg: i sin enkleste form er det bare en ventilator, men normalt indeholder det også varmeplade, filtre, varmegenvinder.
- Reguleringsystemer til temperatur-, tryk- eller luftstrømme.

Inden for hvert delsystem er der en række udformninger og teknikker at vælge imellem afhængigt af opgaven, og de krav der stilles.

Et af formålene med et luftfordelingssystem er at transportere den genererede forurening ud af opholdszonen. De vigtigste hovedprincipper for luftfordelingssystemer er opblandingsventilation og fortrængningsventilation. Ideen bag opblandingsventilation, er at danne en recirkulerende luftstrømning i rummet, således at koncentrationen bliver ensartet overalt i opholdszonen [43]. Ved fortrængningsventilation er det de termiske kræfter fra varmekilderne i rummet, der styrer luftfordelingen.

Inden for mekanisk ventilation af bygninger findes der to ventilationsprincipper: CAV (Constant Air Volume), dvs. konstant volumenstrøm, og VAV (Variable Air Volume), dvs. variabel volumenstrøm. Ved ventilationsprincippet CAV kan volumenstrømmen holdes konstant gennem aggregatet og regulerer på indblæsningstemperaturen. Ved ventilationsprincippet VAV kan indblæsningstemperaturen holdes konstant og regulerer kontinuert volumenstrømmen til de enkelte rum ud fra temperatur- eller luftkvalitetsregistreringer i rummet [44].

Luftbehandlingsaggregatet er udviklet til at regulere og styre temperaturer, luftfugtighed og luftkvalitet af indblæsningsluften i henhold til kravene fra virksomheden med hensyn til luftkvalitet og temperatur. Afhængigt af kravene passerer indblæsningsluften følgende komponenter: indløbspjæld, filter, varme- og køleflade, varmeveksler, ventilatorer, tomsektion, lyddæmper og befugtning. Denne behandling af indblæsningsluften kræver en vis mængde energi.

Om begrænsningen af ventilationsgener fra luftbevægelse foreskriver Bygningsreglementets § 425, at: "Ved tilførsel af luft og bortskaffelse af luft skal i rum, hvor personer opholder sig i længere tid, sikres, at der ikke opstår træk i opholdszonen".

Al luftbevægelse foregår fra højere til lavere tryk. I et mekanisk ventilationsanlæg er det ventilatoren, der sikrer den lokale stigning i trykforskel, som først driver luften udefra og ind og siden indefra og ud.

På luftens vej gennem systemet vil luften som noget af det første blive ført gennem et partikelfilter. Filtrets første opgave er at beskytte anlægget mod snavs. Er der et ønske om renere luft, kan en serie af forskellige og progressivt finere filtre benyttes. Efter filtrering kan udeluften blive ført gennem en varmeveksler, der har det formål at overføre energi – i form af varme eller kulde – fra den bortskaffede indeluft til den leverede udeluft. Hvis udeluften efter passage gennem varmeveksleren stadig ikke har den ønskede temperatur, kan den yderligere opvarmes eller afkøles med dedikerede varme- eller køleflader. Efter varme- og kølefladerne kommer selve ventilatoren. På den anden side af ventilatoren er der en lyddæmper og et kanalsystem der fører luften frem til indblæsningsarmaturerne. Hvor meget luft, der bliver sendt igennem systemet, styres af samspillet mellem ventilatoren og de spjæld og modstande, der ellers er i systemet.

Når indeluften skal bortskaffes er det i store træk den samme procedure, der gentages, men i omvendt rækkefølge: indeluften suges ud gennem armaturer, gennem et kanalsystem og lyddæmper. På den anden side af lyddæmperen står et filter, der har til formål at beskytte ventilator og varmeveksler mod snavs. Efter filtret føres luften gennem varmeveksleren for at komme til ventilatoren. Endeligt er der et relativt kort stykke med kanaler til dér, hvor indeluften til sidst ledes ud.

Kollektivt kaldes al mekanikken, der står for at etablere drivtryk og behandling af luft, for et aggregat. Der, hvor luft skal leveres eller bortskaffes, forbinder kanaler aggregatet med armaturer. I mindre bygninger vil man ofte benytte kompaktaggregater, hvor al mekanikken er samlet i en og samme kasse. I større bygninger vil mekanikken kunne fylde hele rum eller tagflader.

Ventilationssystemer i forskellige bygninger

Boliger

Boliger skal ventileres for at sikre tilfredsstillende luftkvalitet i sundhedsmæssig, hygiejnisk og komfortmæssig henseende og for at kontrollere fugtforholdene. Almindeligt forekommende forureninger i indeklimaet stammer fra forureningskilder, som kan være relateret til selve boligen og bygningsmæssige forhold, til beboernes tilstedeværelse og til beboernes aktiviteter. Forureninger, som skyldes beboernes brug af boligen, håndteres ved hjælp af ventilation, hvor lufttilførslen har til formål at nedbringe forureningskoncentrationen gennem fortynding.

Grundlæggende fungerer boligventilationssystemer efter princippet om, at luftfjernelse skal ske fra boligens luftforurenede og fugtbelastede rum, typisk køkken, baderum, wc-rum og bryggers, mens lufttilførsel skal ske i beboelsesrummene, dvs. stuer og værelser. Princippet har til formål at fremme betingelserne for, at der internt i boligen forekommer luftbevægelser, som i overvejende grad fører luft fra beboelsesrummene til de luftforurenede og fugtbelastede rum. Hensigten er at modvirke luftoverføring fra mere til mindre luftforurenede og fugtbelastede rum ved at fjerne forureningen eksempelvis fugten effektivt direkte ved kilden [41].

Enfamilieshuse

Enfamilieshuse skiller sig ud, fordi de i dag er den eneste bygningstype, der kan opføres uden balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding. Det er værd at bemærke, at enfamilieshuse fortsat skal overholde energirammen, og at varmegenvinding derfor kan vise sig nødvendig afhængig af husets design.

Den klassiske måde at ventilere danske enfamilieshuse på er gennem naturlig ventilation. Senere er der kommet krav om aftræk i køkken og bad. I dag bliver mange nyopførte og nyrenoverede enfamilieshuse udstyret med balanceret mekanisk ventilation med varmegenvinding. Her søges udeluft leveret i opholdsrum som stuer og soveværelser, mens indeluft søges bortskaffet i rum som køkken, bad/toilet og bryggers. Årsagen til opdelingen er, at den hjælper til at øge komforten for beboerne, samtidigt med at den mindsker energibehovet til ventilation. Princippet om at levere luft, hvor folk er, og bortskaffe luft, hvor der forurenes med fx vanddamp og mados, gælder generelt for alle typer beboelse. Nuværende mindstekrav til ventilation i beboelse foreskriver (løst fortolket), at alt luften skal skiftes hver anden time.

Etageboliger

Der har siden 2010 været et krav om mekanisk balanceret ventilation med varmegenvinding i etageboliger.

Den klassiske måde at ventilere danske etageboliger på har været at bruge naturlig ventilation. Senere er der kommet krav om aftræk i køkken og bad. I årrækken 2005-10 var der et højt tæthedskrav kombineret med et mindstekrav om mekanisk udsugning. Kombinationen af høj tæthed og mekanisk aftræk var ikke god og har ledt til dårligt indeklima i mange af etageboligerne, der blev opført efter forskrifterne. I anerkendelse af problemerne har der siden 2017 været krav om, at ventilationsanlæg skal "funktionsafprøves" (kvalitetssikres), inden det færdiginstallerede anlæg overleveres til kunden.

I ældre etageboliger kan ventilationen være baseret på mekanisk luftfjernelse i køkken, bade- og wc-rum og passiv udelufttilførsel gennem udeluftventiler anbragt i ydervæggene eller i vinduerne i

beboelsesrummene. Det gældende bygningsreglement tillader ikke, at systemet nyinstalleres ved renovering af eksisterende etageboliger. (Det er imidlertid muligt at søge dispensation. For detaljer refereres til Bygningsreglementets vejledning om ventilation, stk. 1.6.)

I nyere etageboliger er ventilationen baseret på balanceret mekanisk ventilation, dvs. mekanisk luftfjernelse i køkken, bade- og wc-rum og mekanisk lufttilførsel i beboelsesrummene. Ordet "balanceret" henfører til, at der totalt for boligenheden er balance mellem den fjernede luftmængde og den tilførte luftmængde. Almindeligvis tilstræbes det dog, at systemet indreguleres, så den fjernede luftmængde er lidt større end den tilførte. Derved opstår et lille undertryk i boligen, hvilket reducerer risikoen for, at fugtig indeluft trænger ud i bygningens konstruktive dele. Balanceret mekanisk ventilation indbefatter varmegenvinding, der er i stand til at genanvende mere end 80 % af varmen i den fjernede luft til forvarmning af indblæsningsluften.

I etageboliger kan den mekaniske ventilation være udført som et centralt eller et decentralt ventilationssystem. Ventilationsaggregatet i et centralt ventilationssystem er typisk anbragt i bygningens loftsrum, og aggregatet betjener flere etageboliger gennem et lodret hovedkanalsystem og vandrette grenkanaler i boligerne.

Ved decentral ventilation er der et ventilationsaggregat i hver enkelt bolig. Aggregatet kan være anbragt i et skab fx i boligens entré eller i køkkenet, eller det kan være anbragt over et nedhængt loft i entréen eller i badeværelset. Fra aggregatet er der ført vandrette kanaler til de enkelte rum i boligen. En variant af et decentralt ventilationssystem er et vekselretnings-ventilationssystem, som består af et antal små, kompakte ventilationsenheder med indbygget ventilator. Ventilations-enhederne anbringes normalt i ydervæggene i boligens beboelsesrum. Enhederne fungerer skiftevis som luftindtag og som luftafkast. I hver enhed er der indbygget en varmeakkumulator. Når luftstrømmen skifter retning, opnås der genvinding af varme fra afkastluften ved at varmeakkumulatoren henholdsvis modtager varme fra afkastluften og efterfølgende afgiver varmen til indtagsluften, når luftstrømmen skifter retning. Enhederne fungerer parvis eller sætvis sammen, så der samlet set bliver balance mellem luftindtag og luftafkast.

Et system bestående af separate ventilationsenheder fungerer uden et traditionelt kanalsystem, hvilket dels reducerer tryktab og dermed energibehovet til drift af ventilatorerne, dels frigør plads og forenkler installationen. Endvidere er det enkelt at tilpasse ventilationen rum for rum. Systemet udgør normalt ikke i sig selv et komplet system, idet det ikke indbefatter dedikerede komponenter herunder styring til luftfjernelse fra boligens luftforurenede og fugtbelastede rum.

Daginstitutioner og undervisningsrum

Indeluften i bygninger herunder børneinstitutioner og skoler forurenes med en lang række af gasser og partikler. Kilderne kan være byggematerialer og inventar, herunder maling, lakker, tæpper og andre gulvbelægningsmaterialer, møbler, etc. Forskellige aktiviteter og brug af udstyr og maskiner kan også medføre, at indeluften bliver forurenede. Koncentrationen af forureningerne i indeluften afhænger af forureningskilderne, deres kildestyrke og tilførslen af udeluft, som fortynder forureningerne. Vigtige led i bestræbelserne på at tilvejebringe tilfredsstillende luftkvalitet er først og fremmest at eliminere potentielle forureningskilder i indeklimaet og at reducere emissionen af gasser og partikler fra materialer, inventar, aktiviteter etc. Forureninger, som skyldes persontilstedeværelse (børn, elever, pædagoger og lærere), kan ikke umiddelbart elimineres eller nedbringes, og her har ventilation til formål at nedbringe forureningskoncentrationen gennem fortynding [49].

Den primære kilde til forurening af indeluften i opholdsrum i børneinstitutioner og i klasserum i skoler er persontilstedeværelse – børn, elever, pædagoger og lærere. En væsentlig indikator for den forurening, som udgår direkte fra personer, er kuldioxid (CO₂). Kuldioxid udledes naturligt som følge af de menneskelige stofskifteprocesser. Kuldioxid er under almindelige forhold ikke direkte en skadelig bestanddel af indeluften, men indluftens CO₂-indhold er en god og almindelig anvendt indikator for luftkvaliteten.

Nyopførte eller gennemrenoverede daginstitutioner og undervisningsrum skal ifølge Bygningsreglementet ventileres sådan, at den indendørs koncentration af CO₂ ikke overstiger 1000 ppm (enhed: parts per million). Skoler omfatter ud over klasselokaler typisk også en række andre lokaler,

herunder kontorer, faglokaler, sportshaller, gangarealer, kantiner etc. I dette notat fokuseres der hovedsageligt på de ventilationstekniske aspekter i klasselokaler. For andre lokaler er ventilationsforholdene meget anderledes end for et klasselokale, og de kræver ofte helt specielle overvejelser.

De forskellige ventilationsprincipper, som typisk forekommer i stort antal i børneinstitutioner og skoler i Danmark er [50]:

- Central balanceret mekanisk ventilation
- Decentral balanceret mekanisk ventilation
- Udsugningsventilation
- Udsugningsventilation med indtag gennem varmeblade i facade
- Naturlig ventilation med manuelt vinduesopluk
- Naturlig tværv ventilation med automatisk vinduesopluk
- Hybrid ventilation i to former: ventilator-understøttet naturlig ventilation (mixed-mode) og mekanisk ventilation, som erstattes eller suppleres af naturlig ventilation om sommeren (two-mode).

Klasserummene i en skole er typisk ujævnt belastede. I perioder gennemføres flere lektioner uden afbrydelser, og i andre perioder deles klassens elever op i mindre grupper, som arbejder uden for klasserummet. Omtrent tilsvarende varierende belastning kan forekomme i opholdsrum i børneinstitutioner. Strategien for styring af ventilationen i opholdsrum i børneinstitutioner og klasserum i skoler kan tilrettelægges af alt fra en helt simpel manuel brugerstyring over urstyring og programmerbare styringer til mere avancerede styringer, hvor der anvendes én eller flere følere i rummene. Behovsstyring af ventilationen kan også indbefatte vinduesudluftning.

Fuldstændig manuel brugerstyring kan være velfungerende. Funktionen er dog afhængig af, at de voksne brugere af bygningen er klar over, hvilken betydning tilfredsstillende luftkvalitet har for børn og elever, og at luftkvaliteten i opholds- og klasserum alene afhænger af deres påvirkning af ventilationssystemet. Det kan desuden være nødvendigt, at de voksne brugere forstår præcis, hvordan systemet fungerer, for at modvirke unødigt energiforbrug. Manuel brugerstyring af ventilationen kan i mange tilfælde sikre, at ventilationsbehovet dækkes, men efterkommer ikke altid de tids- og forureningsmæssige variationer, som forekommer. Energiforbruget kan være unødigt højt, da der eventuelt ventileres på tidspunkter, hvor ventilationsbehovet er mindre.

Kontorbyggeri

Ventilationssystemer i kontorbygninger er med til at tilføre lokaler udeluft og sørger samtidig for, at der skabes et godt indeklima. Herunder hører det termiske indeklima, hvor det skal sikres, at personer i et lokale oplever temperaturen som komfortabel. Dette indebærer, at det hverken må opleves for varmt eller for koldt. Normalt er kravet til kontorbygninger derfor både, at rumtemperaturen ikke må falde under et nedre niveau eller stige over et øvre niveau.

I kontorbygninger har man ofte et overskud af varme, så snart rummene tages i brug. Det er afgørende, at der fokuseres på at nedbringe de interne varmelaster fra el, belysning, personer, etc. samt de eksterne varmelaster i form af solindfald. Bliver overskud af varme ikke fjernet, kan der blive uacceptabelt varmt inde, selv når det er koldt udenfor. Det kræver derfor et ventilationssystem som fjerner varmeoverskuddet, når det er for varmt og et varmesystem, som tilfører varme til bygningen, når det er for koldt. Det er de ventilationssystemer, som skal fjerne varmeoverskuddet, der gør kontorbygninger teknisk komplicerede. Som regel bruges der konvektorer (radiatorer) for at imødekomme varmebehovet i et rum og for at undgå, at rumtemperaturen falder til et uacceptabelt niveau. Der findes to forskellige principper for fjernelse af varmeoverskud. Enten anvendes der et luftsystem, hvor varmeoverskuddet fjernes med ventilation eller et koldvandsystem, hvor varmeoverskuddet fjernes med kølebafler [51].

I forbindelse med kontorbygninger anvendes der, som tidligere nævnt, primært to indblæsningsprincipper: opblandingsventilation og fortrængningsventilation. Ved opblandingsventilation

tilføres der med relativ stor hastighed luft udefra til opholdszonen, som regel fra loft eller væg. Dette stiller krav til indblæsningsarmaturernes effektivitet med hensyn til indblæsningshastighed og opblanding. Opblandingsventilation er relativt ufølsom over for ydre påvirkninger og kan anvendes både til opvarmning og køling [52]. Ved fortrængningsventilation er ventilationseffektiviteten på grund af lagdeling større end ved opblandingsventilation. Forskellen forøges ved større lofthøjde.

Der er ikke særskilte krav til ventilationsforholdene i kontorbyggeri i Bygningsreglementet. Det står i modsætning til beboelse, daginstitutioner og undervisningsrum. Bygningsreglementet foreskriver blot at "ventilationens dimensionering [skal] ske under hensyn til rummets størrelse og anvendelse." Derfor er det Arbejdsmiljøloven, der er gældende. I praksis betyder det, at det er den samme øvre grænse på 1000 ppm CO₂, som gælder for daginstitutioner og undervisningsrum, der også er gældende for indeklimaet i kontorbyggeri [53].

Hospitalsbyggeri

Et hospital rummer mange forskellige funktioner. Der er sengestuer, operationsstuer, laboratorier, kontorpladser og gang- og fællesarealer. Samtidigt er der høje krav til hygiejne og fleksibilitet.

På hospitaler er det en stor udfordring at undgå smittespredning mellem patienter og mellem patienter og sundhedspersonale. Der er skrappe funktionskrav til operationsstuer, isolationsstuer og laboratorier med stinkskabe. For at opfylde kravene, kræves der en høj rate af ventilation.

Ventilationsanlæg, der ventilerer sengestuer, hvor patienter ligger i isolation, skal sikre undertryk i stuerne, sådan at risikoen for spredning af luftbårne bakterier og vira minimeres. Omvendt er det for ventilationsanlæg, der ventilerer operationsstuer. Her skal der sikres et overtryk, sådan at risikoen for at luftbårne bakterier og vira infiltrerer operationsstuerne minimeres.

Ved processer og menneskelig aktivitet på operationsstuer forurenes rumluften. Derfor er et af hovedformålene med ventilationsanlæg på operationsstuer at sikre luftens renhed i operationsfeltet og derved medvirke til at minimere risikoen for infektion efter operation. Dyb infektion omkring isatte fremmedlegemer fx hofte- og knæproteser har særligt alvorlige konsekvenser for patienten og udgør en væsentlig økonomisk belastning for sundhedsvæsenet [54].

Ved ventilation af operationsstuer skelnes der mellem to forskellige ventilationsprincipper. De to grundtyper af ventilation opdeles i TAF, Turbulent Air Flow og LAF, Laminar Air Flow. TAF er baseret på diffus og turbulent indblæsning af filtreret luft med henblik på at skabe ensartet opblandingsventilation i hele operationsrummet. LAF fungerer anderledes ved at filtreret luft indblæses i kontrollerede parallelle strømme mod operationsfeltet vertikalt og horisontalt for at skabe en central zone af filtreret ultraren luft i selve operationsfeltet, hvorfra det efterfølgende bortventileres.

De enkelte anlæg skal hver især kunne serviceres eller udskiftes, uden at det påvirker de andre ventilationssystemer på det pågældende hospital. Det er et krav, at ingen af luftstrømmene i systemerne må have kontakt til hinanden, hverken i eller uden for bygningerne.

Løsningen på de mange forskelligartede behov er mange separate ventilationsanlæg med særlige driftsforhold. Resultatet er et højst komplekst system af anlæg og kanalføringer.

Referencer

- [1] WHO. Transmission of SARS-CoV-2: implications for infection prevention precautions - Scientific Brief - 9 July 2020 [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 12]. Available from: <https://www.who.int/news-room/commentaries/detail/transmission-of-sars-cov-2-implications-for-infection-prevention-precautions>
- [2] Morawska L, Milton DK. It is Time to Address Airborne Transmission of COVID-19. Clin Infect Dis [Internet]. 2020 Jul 6;1–23. Available from: <https://academic.oup.com/cid/advance-article/doi/10.1093/cid/ciaa939/5867798>
- [3] Morawska L, Cao J. Airborne transmission of SARS-CoV-2: The world should face the reality. Environ Int [Internet]. 2020;139(April):105730. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105730>

- [4] Morawska L, Tang JW, Bahnfleth W, Bluyssen PM, Boerstra A, Buonanno G, et al. How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environ Int* [Internet]. 2020 Sep;142(May):105832. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0160412020317876>
- [5] Fennelly KP. Particle sizes of infectious aerosols: implications for infection control. *Lancet Respir Med* [Internet]. 2020 Sep;8(9):914–24. Available from: [http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30323-4](http://dx.doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30323-4)
- [6] Ai ZT, Melikov AK. Airborne spread of expiratory droplet nuclei between the occupants of indoor environments: A review. *Indoor Air* [Internet]. 2018 Jul;28(4):500–24. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12465>
- [7] Bourouiba L. Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions. *JAMA* [Internet]. 2020 Mar 26;323(18):1837–8. Available from: <https://jamanetwork.com/journals/jama/fullarticle/2763852>
- [8] Xie, Li Y, Chwang ATY, Ho PL, Seto WH. How far droplets can move in indoor environments. *Indoor Air*. 2007;17:211–2256.
- [9] Liu L, Wei J, Li Y, Ooi A. Evaporation and dispersion of respiratory droplets from coughing. *Indoor Air* [Internet]. 2017 Jan;27(1):179–90. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/ina.12297>
- [10] Wei J, Li Y. Airborne spread of infectious agents in the indoor environment. *Am J Infect Control* [Internet]. 2016 Sep;44(9):S102–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ajic.2016.06.003>
- [11] Chen W, Zhang N, Wei J, Yen H-L, Li Y. Short-range airborne route dominates exposure of respiratory infection during close contact. *Build Environ* [Internet]. 2020 Jun;176(April):106859. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.106859>
- [12] Xu C, Nielsen P V., Gong G, Liu L, Jensen RL. Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects. *Indoor Air*. 2015;25(2):188–97.
- [13] Liu L, Li Y, Nielsen P V., Wei J, Jensen RL. Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people. *Indoor Air* [Internet]. 2017 Mar;27(2):452–62. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/24837295>
- [14] Ai Z, Hashimoto K, Melikov AK. Influence of pulmonary ventilation rate and breathing cycle period on the risk of cross-infection. *Indoor Air* [Internet]. 2019 Nov 6;29(6):993–1004. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/ina.12589>
- [15] Bjørn E, Nielsen P V. Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air* [Internet]. 2002 Sep;12(3):147–64. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x>
- [16] Olmedo I, Nielsen P V., Ruiz de Adana M, Jensen RL, Grzelecki P. Distribution of exhaled contaminants and personal exposure in a room using three different air distribution strategies. *Indoor Air* [Internet]. 2012 Feb;22(1):64–76. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x>
- [17] Olmedo I, Nielsen P V., Ruiz de Adana M, Jensen RL. The risk of airborne cross-infection in a room with vertical low-velocity ventilation. *Indoor Air* [Internet]. 2013 Feb;23(1):62–73. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2012.00794.x>
- [18] Olsen SJ, Chang H-L, Cheung TY-Y, Tang AF-Y, Fisk TL, Ooi SP-L, et al. Transmission of the Severe Acute Respiratory Syndrome on Aircraft. *N Engl J Med* [Internet]. 2003 Dec 18;349(25):2416–22. Available from: <http://www.nejm.org/doi/abs/10.1056/NEJMoa031349>
- [19] Booth TF, Kournikakis B, Bastien N, Ho J, Kobasa D, Stadnyk L, et al. Detection of Airborne Severe Acute Respiratory Syndrome (SARS) Coronavirus and Environmental Contamination in SARS Outbreak Units. *J Infect Dis* [Internet]. 2005 May 1;191(9):1472–7. Available from: <https://academic.oup.com/jid/article/191/9/1472/862003>
- [20] Yu ITS, Wong TW, Chiu YL, Lee N, Li Y. Temporal-Spatial Analysis of Severe Acute Respiratory Syndrome among Hospital Inpatients. *Clin Infect Dis* [Internet]. 2005 May 1;40(9):1237–43. Available from: <https://academic.oup.com/cid/article-lookup/doi/10.1086/428735>
- [21] Li Y, Huang X, Yu ITS, Wong TW, Qian H. Role of air distribution in SARS transmission during the largest nosocomial outbreak in Hong Kong. *Indoor Air* [Internet]. 2005 Apr;15(2):83–95. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2004.00317.x>
- [22] Xiao S, Li Y, Wong T, Hui DSC. Role of fomites in SARS transmission during the largest hospital

- outbreak in Hong Kong. Shaman J, editor. PLoS One [Internet]. 2017 Jul 20;12(7):e0181558. Available from: <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0181558>
- [23] Morawska L, Johnson GR, Ristovski ZD, Hargreaves M, Mengersen K, Corbett S, et al. Size distribution and sites of origin of droplets expelled from the human respiratory tract during expiratory activities. *J Aerosol Sci* [Internet]. 2009 Mar;40(3):256–69. Available from: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0021850208002036>
- [24] Liu L, Nielsen P V., Xu C, Wei J, Li Y. Impacts of Modelling Simplifications on Predicted Dispersion of Human Expiratory Droplets. 14th Int Conf Indoor Air Qual Clim (indoor Air 2016). 2016;3:1484–91.
- [25] Tellier R, Li Y, Cowling BJ, Tang JW. Recognition of aerosol transmission of infectious agents: A commentary. *BMC Infect Dis*. 2019;19(1):1–9.
- [26] Kim S-H, Chang SY, Sung M, Park JH, Bin Kim H, Lee H, et al. Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards. *Clin Infect Dis* [Internet]. 2016 Aug 1;63(3):363–9. Available from: <https://academic.oup.com/cid/article-lookup/doi/10.1093/cid/ciw239>
- [27] Yan J, Grantham M, Pantelic J, Bueno de Mesquita PJ, Albert B, Liu F, et al. Infectious virus in exhaled breath of symptomatic seasonal influenza cases from a college community. *Proc Natl Acad Sci* [Internet]. 2018 Jan 30;115(5):1081–6. Available from: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1716561115>
- [28] Lindsley WG, Noti JD, Blachere FM, Thewlis RE, Martin SB, Othumpangat S, et al. Viable Influenza A Virus in Airborne Particles from Human Coughs. *J Occup Environ Hyg* [Internet]. 2015 Feb 18;12(2):107–13. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15459624.2014.973113>
- [29] Li Y, Qian H, Hang J, Chen X, Hong L, Liang P, et al. Evidence for probable aerosol transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. Preprint [Internet]. 2020;1–19. Available from: <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.16.20067728v1>
- [30] Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature* [Internet]. 2020 Jun 27;582(7813):557–60. Available from: <http://www.nature.com/articles/s41586-020-2271-3>
- [31] ASHRAE. COVID-19 (coronavirus) preparedness resources [Internet]. 2020 [cited 2020 Sep 13]. Available from: <https://www.ashrae.org/technical-resources/resources>
- [32] REHVA. REHVA COVID-19 guidance document [Internet]. 2020. Available from: <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-guidance>
- [33] Ducharme J. The WHO Says Airborne Coronavirus Transmission Isn't a Big Risk. Scientists Are Pushing Back. *Time* [Internet]. 2020 Jul 8; Available from: <https://time.com/5863220/airborne-coronavirus-transmission/>
- [34] Klepeis NE, Nelson WC, Ott WR, Robinson JP, Tsang AM, Switzer P, et al. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *J Expo Anal Environ Epidemiol*. 2001;11(3):231–52.
- [35] Li Y, Leung GM, Tang JW, Yang X, Chao CYH, Lin JZ, et al. Role of ventilation in airborne transmission of infectious agents in the built environment - a multidisciplinary systematic review. *Indoor Air* [Internet]. 2007 Feb;17(1):2–18. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2006.00445.x>
- [36] Beggs CB, Kerr KG, Noakes CJ, Hathway EA, Sleight PA. The ventilation of multiple-bed hospital wards: review and analysis. *Am J Infect Control* [Internet]. 2008 May [cited 2015 Jul 22];36(4):250–9. Available from: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-42949127764&partnerID=tZOtx3y1>
- [37] Qian H, Li Y. Removal of exhaled particles by ventilation and deposition in a multibed airborne infection isolation room. *Indoor Air* [Internet]. 2010 Mar 13;20(4):284–97. Available from: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1600-0668.2010.00653.x>
- [38] Nielsen P V., Li Y, Buus M, Winther F V. Risk of cross-infection in a hospital ward with downward ventilation. *Build Environ* [Internet]. 2010 Sep;45(9):2008–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.02.017>

- [39] Mousavi ES, Grosskopf KR. Ventilation Rates and Airflow Pathways in Patient Rooms: A Case Study of Bioaerosol Containment and Removal. *Ann Occup Hyg.* 2014;59(9):1190–9.
- [40] Bolashikov ZD, Melikov AK, Kierat W, Popioek Z, Brand M. Exposure of health care workers and occupants to coughed airborne pathogens in a double-bed hospital patient room with overhead mixing ventilation. *HVAC R Res.* 2012;18(4):602–15.
- [41] Afshari A, Rasmussen B, Knudsen HN, Kragh J, Gunnarsen L, Bergsøe NC, et al. Hvidbog - Ventilation af eksisterende etageboliger: Erfaringsopsamling og anbefalinger [Internet]. SBI 2020:12. København, Danmark: BUILD, Aalborg Universitet; 2020. Available from: <https://sbi.dk/Pages/Hvidbog-Ventilation-af-eksisterende-etageboliger.aspx>
- [42] Warfvinge C, Dahlblom M. Projektering av VVS-installationer. Studentlitteratur AB; 2010. 308 p.
- [43] Nielsen PV. Simulering af luftbevægelse og forureningsfordeling i industrilokaler. Sørensen HH, editor. Vol. 3, Industriventilation. Aalborg, Danmark; 1996.
- [44] Petersen BH. Komfortventilation. BYG-DTU U-052. Kgs. Lyngby, Danmark: Institut for Byggeri og Anlæg, Danmarks Tekniske Universitet; 2005. p. 91.
- [49] Bergsøe NC, Afshari A. Vejledning om behovsstyret ventilation: Boliger, børneinstitutioner og skoler [Internet]. SBI 2012:17. Hørsholm, Danmark: Statens Byggeforskningsinstitut (SBI), Aalborg Universitet; 2012. Available from: <https://sbi.dk/Assets/Vejledning-om-behovsstyret-ventilation/sbi-2012-17.pdf>
- [50] Hviid CA. Velfungerende løsninger til ventilationssystemer i skoleklasser [Internet]. Virum, Danmark; 2014. Available from: https://pcb-guiden.dk/file/460142/ventilationssystemer_skoleklasser_katalog.pdf
- [51] Abel E, Elmroth A. Byggnaden som system. 2nd ed. Formas; 2008. 284 p.
- [52] Lindab. Teori om luftfordelingssystemer. In: Lindab Comfort [Internet]. Lindab Ventilation A/S; 2008. p. 17. Available from: <https://itsolution.lindab.com/LindabWebProductsDoc/pdf/Documentation/Comfort/DK/Technical/Teori.pdf>
- [53] Arbejdstilsynet. At-Vejledning A.1.2-1 Indeklima [Internet]. Danmark: Arbejdstilsynet; 2018. Available from: <https://amid.dk/regler/at-vejledninger/indeklima-a-1-2/>
- [54] Sundhedsstyrelsen. Ventilation på operationsstuer. Vol. 13, Medicinsk Teknologivurdering. København, Danmark: Sundhedsstyrelsen, Dokumentation af Kvalitet og Standardisering Ventilation; 2011.

Luftfordelingsprincipper

Ventilationssystemet har til formål at bringe luft til og fra lokalerne i en bygning. I lokalerne fordeles luften efter forskellige principper som har forskellige karakteristika. Der er luftfordelingsprincipperne der tilgodeser ensartethed af luftkvalitet og komfort i hele rumvolumenet. Der kan også være principper der på forskellig vis optimere komfort og luftkvalitet i opholdszonen eller i dele af opholdszonen. Luftfordeling kan have afgørende indflydelse på, hvordan virusbelastede aerosoler bevæger sig i rummet og hvilken koncentrationen de danner forskellige steder i rummet.

Mange af de luftfordelingssystemer der omtales i det følgende har den bedste virkning (ventilations effektivitet) i en kølesituation med en indblæsningstemperatur der er mindre end den ønskede rumtemperatur. Kølesituationen vil ofte være den gældende situation i danske kontor bygninger.

Opblandingsventilation

Opblandingsventilation er et luftfordelingssystem, der bygger på indblæsning af en eller flere luftstråler uden for opholdszonen. Lufthastigheden falder i disse stråler med afstanden fra armaturerne, fordi der medrives luft fra omgivelserne i hele forløbet. Systemet dimensioneres således, at lufthastigheden vil falde til et acceptabelt niveau i opholdszonen. Luftens indhold af forurening, sporstoffer mm. fordeles jævnt i hele lokalets volumen. Det er den store indblæsningshastighed ved armaturerne der giver en høj impuls (bevægelsesmængdestrøm), og denne impuls driver opblandingen af luften i rummet [1].

En særlig type opblandingsventilation er aktive køle-baffler. Dette system genererer en stor opblanding i selve enheden og det resulterer i en opblanding der er 3 – 10 gange større end i et almindelig opblandingssystem. På grund af den store opblanding virker dette system også tilfredsstillende ved opvarmning.

Diffus Loftindblæsning

Man kan også skabe opblanding ved at tilføre den kolde luft øverst i lokalet, for eksempel igennem loftfladen ved lav impuls og lade varmeafgivelsen fra personer og udstyr skabe den opblandende luftbevægelse. Dette system kaldes Diffus Loftindblæsning. Det er opdriftskraften genereret af varmekilder der er den vigtigste drivkraft for rumluftblandingen og varmekildernes størrelse og placering spiller derfor en vigtig rolle for diffus loftsventilation [2][3][4]. På grund af den lave impuls kan systemet give et trækfrit miljø ved et højt luftskifte op til 10 ACH [5]. Diffus loftventilation har den samme ventilationseffektivitet som opblandingsventilation i køletilstand (indblæsningstemperatur lavere end rumluft), men der er risiko for lav luftkvalitet i opholdszonen, når systemet betjenes i opvarmningstilstand, hvor den friske varme luft kan stagnere i den øverste zone uden at komme ind i opholdszonen. I sådanne situationer kan andre kilder i rummet, for eksempel kølige vægflader eller vinduer i en opvarmningssituation efter natsenkning, eller andre varmekilder, hjælpe med at skabe lidt recirkulation i rummet [6].

Fortrængningsventilation

Denne ventilationsform kan anvendes i bygninger hvor der overvejende er kølebehov. Systemet er karakteriseret ved at luften tilføres nederst i lokalet med en begrænset **impuls** og at den føres op igennem lokalet i et lagdelt strømningsforløb, samt ved medrivning i de opadgående strømninger fra varmekilderne.

På denne måde opstår der en lodret temperatur gradient i lokalet og den forurenede luft samles i nogen grad øverst i lokalet hvor det føres bort [7]. Dette kan være en fordel hvis der er forurenende varmekilder i lokalet, men det er også et problem i forbindelse med smittespredning imellem personer. Den lodrette temperaturgradient kan låse et lag af udånding (inklusiv eventuel virus) i ansigtshøjde og dermed overføres til andre personer i lokalet [8]. En fastlåsning af forurenede lag kan også finde sted i andre luftfordelingssystemer hvis der dannes en lodret temperaturgradient. Højden på stratificeringslaget afhænger af størrelse og placering af varmekilder og forurenende kilder og rummets geometri samt lufttemperatur. Fortrængningsventilation er velegnet til brug i et højt rum (> 3 m højde), men mindre egnet til rummet med lofthøjder lavere end 2,3 m (for eksempel klasselokaler, små kontorer eller patientrum) [7].

Personlig ventilation

En effektiv løsning kan være brug af personlig ventilation (PV) til at tilføre frisk luft direkte til åndedrætszone. Udførelsen af personlig ventilation (PV) til reduktion af den luftbårne infektionsrisiko i det indendørs miljø ved forskellige baggrundsventilation er dokumenteret i litteraturen [9][10][11][12][13][14][15][16]. Princippet med PV er at levere rent luft i for eksempel en stråle direkte til personens åndedrætszone. Imidlertid bør interaktionen mellem bevægelsesmængdestrømmen genereret af PV og micro-miljøet omkring menneskekroppen ikke overses. Andre systemer bygger på at den rene luft tilføres via det termiske grænselag fra overflader af puder, sæder mm. [17]. Systemet kan kun opnå høj ventilationseffektivitet, når opblanding af forurenede rumluft kontrolleres omhyggeligt og minimeres i forhold til indblæsningsluften [18][19]. Derfor anbefalede nogle undersøgelser [19][20] at bruge personlig udstødning (PE) sammen med PV. PE er et effektivt metode til kildekontrol. Den kombinerede PV-PE kan blokere opblanding af udåndingsstrømmen og give ren luft direkte til vejtrækningszonen, hvilket kan forbedre smittespredningen inden for det menneskelige micro-miljø. En begrænsning af stationær (skrivebord/stol installeret) PV og PE er, at det måske ikke er effektiv, når personens mobilitet er vigtig.

Man kan også betragte udsugning som personlig ventilation. Det må således være muligt at begrænse smittespredningen i en sengestue på et hospital ved at anvende lokal udsugning ved de enkelte senge, udsugning ved tandlægeudstyr mm.

Personlig ventilation anvendes ofte sammen med et total-volumen ventilation som for eksempel opblandingsventilation eller fortrængningsventilation [21][22][23][24][25][26].

Personlig ventilation kræver ofte at brugeren skal holde sit ansigt i en bestemt position eller vedkommende skal bære udstyret for at få optimal virkning, men det betyder også at det kan være et optimalt system ved visse typer arbejde som for eksempel ved transport, stillestående arbejde mm. Det er også muligt at anvende en variant - personlige ventilation igennem boligtekstiler - hvor luften tilføres igennem forskellige former for boligtekstiler som for eksempel igennem beklædninger på en stol (nakkestøtte og ryg) eller igennem en pude, madras eller del af dyne i en seng, [21] og [22]. Sæder med komfort ventilation igennem beklædningen anvender i dag i visse biler og der findes også sæder med musik og underholdning der transmittere igennem tekstiler i sæder. En seng med ventilation igennem en pude kan være en god løsning på et hospital med flersengs stue. Den giver en effektiv beskyttelse af patienten. Personalet vil også være beskyttet hvis der i dette særlige tilfælde anvendes fortrængningsventilation som luftfordeling i lokalet uden for nærområdet omkring patienterne [22]. Den personlige ventilation kan også integreres i stole/sæder som sidestøtter på hver side af brugerens ansigt [27][28].

Der er desuden mulighed for at anvende bærbare PV systemer som er integreret i et 'head set' [29][30][31]. Luftrenser (HEPA filter og UVGI) og pumpe er placeret i en lille boks som kan monteres i bæltet.

Personlig eller lokal udsugning

Luftudsugningen skal altid placeres så tæt ved forureningskilderne (personer maskiner mm.) som muligt. Hvis dette ikke er muligt skal udsugningerne placeres i den del af rummet hvor forureningen er størst. I især industrilokaler anvendes denne variant af opblandingsventilation hvor udsugningsåbningerne spiller en aktiv rolle. Lokal udsugnings ventilation (LEV) er en løsning der reducerer personers eksponering for luftbårne forurenende stoffer (støv, tåge, røg, damp, gas, virus mm.) på arbejdspladsen ved at opfange emissionen ved kilden og transportere den til et sikkert udsugningsområde eller til et filter/skrubber. Et LEV-system består normalt af følgende elementer: et udløb/hætte, hvor forureningen fanges; en kanal til at transportere den forurenende luft fra emhætten; et filter til rengøring af udsuget luft (ikke alle systemer har brug for et filter) en ventilator til at drive den udsugede luft. Luftstrømningshastigheden gennem den lokale udsugning skal være tilstrækkelig til at føre alle forurenende stoffer til rensnings- eller filtreringssystemet.

Hospitalssenge med integreret udsugningsventilation der fjerner patienters udånding er beskrevet i [32]. Det tidligere beskrevet 'headset' der generere en ren ventilationsstråle tæt ved brugerens ansigt og tilkoblet et bærbar filter og blæser er beskrevet i [23][25]. Hvis der er ekstensiv anvendelse af PV løsninger er det ikke nødvendigt at forøge ventilationen under en pandemi [25] og der kan generelt spares energi ved brug af PV systemer [26][33][34][35].

Generelt om luftfordeling og fordeling af mikrodråber

Opblandingsventilation, fortrængningsventilation og diffus loftindblæsning er de tre typiske luftfordelingssystemer man arbejder med i Danmark. Der findes mange andre principper men de fleste repræsenterer variation af de ovennævnte, og de er alle grundlagt på nogle forskellige fysiske effekter som:

- Opblanding af hele luftmassen ved impuls fra indblæsning
- Opblanding ved høj placering af luft med undertemperatur
- Termisk lagdeling ved lav placering af luftindblæsning
- Stempelstrømning i visse dele af luftfordelingen
- Lokal tilførsel af luft
- Lokal udsugning

Systemer der skaber opblanding i alle drift situationer er simple systemer, der virker sikre i forbindelse med smittespredning. I princippet drejer det sig om at tilføre friskluft til et lokale i en sådan grad at koncentrationsniveauet af aerosoler er tilstrækkelig lavt til at en smitteoverførelse kan forhindres overalt i lokalet. I praksis opnås ofte ikke fuldstændig blanding af tilført rent luft med inficeret rumluften, og dette kan øge risikoen for luftbåren transmission.

Systemer der bygger på termisk lagdeling kan skabe lave koncentrationer i visse områder men har den negative effekt at områderne med lav koncentration skabes på baggrund af andre områder med høj koncentration da gennemsnits koncentrationen jo vil svare til den koncentration der etableres ved fuld opblanding.

Termisk stratificering kan udvide rækkevidden af kortdistance luftbåren infektion, og derfor anbefales det at fortrængningsventilation ikke blive brugt på hospitaler for at forhindre luftbåren risiko for smittespredning [36][37].

Et område med stempelstrømning kan være gunstig, men det kan være vanskeligt at etablere og opretholde. Ofte kræver det et præcist sammenspil imellem indblæsning, kildeplacering, andre personer og udsugning. Eksempler på systemer der kan skabe en form for stempelstrømning, eller lokal fortrængningsventilation, er systemer der anvender lokal indblæsning i dele af loftfladen i områder hvor der ikke befinder sig varmekilder, se 'Smittespredning > 1.5 m ved forskellige luftfordelingssystemer' [38][37].

Lokal tilførsel af frisk luft i form af personlig ventilation kan være en effektiv beskyttelse imod luftbåren smittespredning men det er en forudsætning at en person fastholder sin position i rummet for at være beskyttet. Tilsvarende forudsættes det at en smittet person skal fastholde sin position i forhold til lokal udsugning for at minimere aerosolniveauet i lokalet. Risikoen for luftbåren smitte kan reduceres kraftigt, når bærbar PV, PE eller PV&PE som er integreret i et 'head set' anvendes.

[39] gennemgår 12 forskellige luftfordelingssystemer med – blandt andet - diskussion af koncentrationsfordeling ved forskellige kildeplaceringer.

Luftfordelingssystemer og luftbåren smittespredning

Smittespredning < 1.5 m

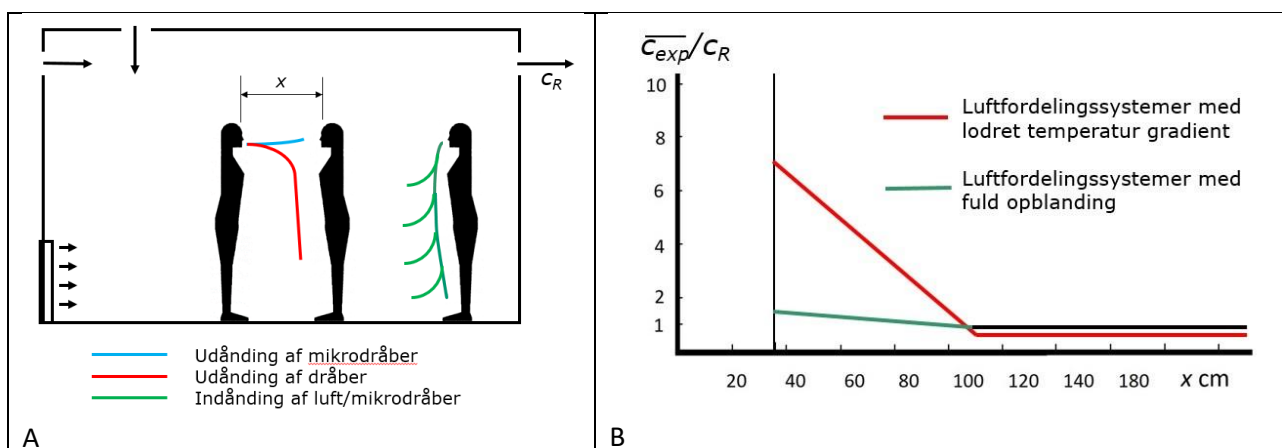
Der skal i det følgende fokuseres på forhold der vedrører smitteoverførelse. For at få en oversigt over luftbåren smittespredning er det nødvendigt at se på situationen både ved kort afstand og ved længere afstand imellem de involverede personer. I kort afstand er de strømningsforhold der opstår i 'nærområdet' (micro-miljøet) omkring personer væsentlig for både dråbeinfektion og luftbåren smitteoverførelse. Strømningsforholdene er påvirket af luftfordelings princippet, rumgeometri og armaturernes placering, det vil sige [40][41][42][43][44][45][46][47][48]:

- Temperaturer og vertikal temperaturfordeling tæt ved personerne
- Koncentrationsniveau tæt ved personerne
- Lufthastighed (størrelse og retning) tæt ved personerne
- Turbulensniveau tæt ved personerne

Smitteoverførelsen ved dråbe- og luftbåren aerosolspredning, er især styret af:

- Afstand imellem personerne [40][49]
- Position, højde og orientering af personerne [48].
- Aktivitetsniveau [48][43] [50]
- Luftbevægelse [44][45][51]
- Åndingsfunktion (mund, næse, host, nys) [40]

- Sang, råb [52][53]
- Person antal [47]
- Brug af mundbind [54]



Figur 1. A) Overførelse af virus via luftbårnemikro dråber og dråber imellem to personer der står over for hinanden. B) Den relative eksponering ved forskellig afstand imellem personerne.

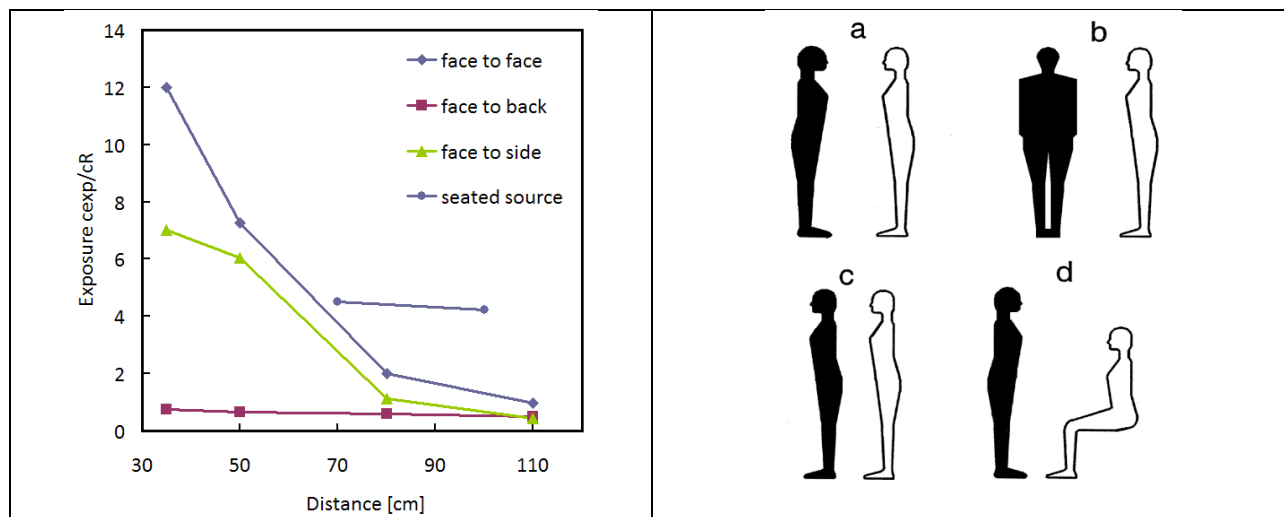
Figur 1A skitserer strømningsforholdene tæt ved to personer. Det ses hvorledes udåndingen af mikrodråber fra en person (blå markering) kan strømme ind i en anden persons indåndingszone. Man kan også se at der må være mange faktorer som er af betydning, som for eksempel åndingsretning (mund, næse), person størrelse, mund geometri, aktivitetsniveau, temperatur, bevægelse, råb med mere. Hvis der opstilles en summering af resultater for mange forsøg med forskellige luftfordelingssystemer og samme termiske manikiner, viser Figur 1B at der også vil være en indflydelse fra makro strømninger omkring personerne. Se [55] for flere detaljer. Der indikeres især en forskel imellem fortrængnings ventilation og opblandings ventilation. Fortrængnings ventilation giver en lodret temperaturgradient og derfor en lagdelt strømning i lokalet. Denne lagdeling kan fange udånding i et lag med det resultat at der opstår et højt mikrodråbeniveau i laget [8]. Som sagt så er mange andre parametre af betydning som nævnt ovenover, derfor behøver det ikke altid at blive som vist på Figur 1B.

Den store eksponering som en person udsættes for ved kort afstand i tilfælde af fortrængnings ventilation kan i visse situationer modsvares af en lavere koncentration i stor afstand over 1,5 m som indikeret på figur 1B. Bevægelse af personen og andre luftbevægelser fx fra åbne vinduer, bord ventilatorer mm. vil naturligvis også have indflydelse på forholdene og fjerne fordelene ved lagdelinger når der er stor afstand imellem personer.

Figur 1A viser ligeledes hvordan indåndingen foran en person der står i uforstyrrede omgivelser indånder luft (grøn markering) fra hele højden af personen da luften transporteres op til åndingszonen via den termiske strømning omkring personen. Figur 1A viser ligeledes hvordan dråber i princippet forløber uforstyrret af luftfordelingen og falder til jorden (rød markering). Dette er dog en tilnærmelse som udfordres i den nye forskning.

I figur 1 er C_R er koncentrationen i lokalets retur åbning og C_{exp} er koncentration af den pågældende mikrodråbe/virus i personens indånding. Hvis for eksempel en person udsættes for en højere eksponering end den der vil være hvis der var fuld opblanding i lokalet (udsugningskoncentrationen) er dette udtrykt

ved at den **relative eksponering** c_{exp}/c_R være større en 1,0. For at finde den **faktiske eksponering** skal der ganges med det fuld opblandede mikrodråbe niveau i rummet c_R . **Relativ eksponering** anvendes i Figur 1, Figur 2 og Figur 3.



Figur 2. Overførelse af virus via luftbårne aerosoler imellem to personer der står over for hinanden i forskellig afstand og i forskellig position. Fortrængnings ventilation [48].

Figur 2 viser hvorledes overførelsen er størst når personerne står ansigt til ansigt medens den falder når den person der er i fare for at blive smittet drejer med siden til. Den hvide figur illustrerer smitekilden og den sorte figur illustrerer personen der smittes, Figur 2. Når personen vender ryggen til smitekilden er det kun baggrundskoncentrationen af mikrodråber der vil blive inhaleret. Der altså tale om en meget høj beskyttelse svarende til den påvirkning der også er til stede for afstande større end 1,5 m.

Figur 2 viser desuden den situation hvor den siddende smitekilde ved fortrængningsventilation danner et stratificeret lag med høj koncentration i større afstand imellem personerne. Dette resulterer i en høj eksponering uafhængig af afstand [48].

Genereringen af mikrodråber, og derfor eventuelle luftbårne virus, vokser med personens aktivitetsniveau og åndningsvolumen., Eksponeringen i en afstand af 0,35 m vokser til det dobbelte ved en forøgelse af aktivitetsniveauet fra stående afslappet tilstand (1,2 MET) til for eksempel at løfte pakker (2 MET). Betydningen af aktivitetsniveauet bør for eksempel betragtes i forbindelse med fitness rum, hvor 'work out' nemt kan forøge en smittet persons udløsning af virus med en faktor 10-20.

Brug af mundbind har været meget diskuteret i forbindelse med COVID-19 pandemien. Der er dog klart at mundbind beskyttet effektivt i kort afstand ved at nedbryde det strømningsmønster der skabes tæt ved en person ved ånding, tale, sang, hoste og nyse [54]. I situationer hvor alle er påbudt at bære mundbind, vil der være sikkerhed for at smitekilder også bærer mundbind og dermed beskytter omgivelserne i den korte afstand for dråbeinfektion og mikrodråber. Denne beskyttelse består især i at udåndingsstrålen brydes foran den person der smittet og derfor får en kortere rækkevidde.

Dråbeinfektion er en afgørende smitekilde i nærfeltet, se Figur 1A. Ved ånding, tale, råb og sang kan en person der er smittet, udånde dråber der indeholder virus. Alt efter størrelse følger dråberne i princippet

en ballistik bane og lander på overflader som gulvet og andre vandrette flader [56]. Denne smittevej er i princippet ikke påvirket af ventilationen. Men i luftbevægelsen foregår der en fordampning af dråberne og de mindre dråber mister hurtigt størrelse og kan overgå til luftbårne mikrodråber som naturligvis er påvirket af ventilationen.

Dråber skal have en vis størrelse for at falde til gulvet i en ballistisk bane. En dråbe skal være større end 50-100 μm for at have en stor sandsynlighed for at lande 1-2 m fra den person der er smittekilde. Lokal turbulens kan forlænge denne opholdstid i luften. Dråber af størrelsen 50-100 μm kan transporteres langt over 1-2 m, specielt ved at nyse eller hoste [56][57].

Kalibreret støv (simulering af dråber) har været brugt til forsøg af samme karakter som dem der er udført med sporgas i forbindelse med Figur 1 til 3. Forsøgene viser at det termiske grænselag kan fordele partikler af størrelsen 15-30 μm bort fra den ballistiske bane og sende dem ud i lokalets andre områder [58].

Smittespredning > 1.5 m ved forskellige luftfordelingssystemer

Opblandingsventilation

I praksis vil det være en god og sikker løsning at anvende et effektivt Opblandings system med tilstrækkelig luftforsyning da dette system er dimensioneret til at give en ensartet koncentration overalt i lokalet i alle belastningssituationer. Se figur 1B for afstand større end 1m. Derefter skal luftforsyningen blot sikre et lavt koncentrationsniveau i hele rummet. Nogle opblandingsystemer kan håndtere en højere luftforsyning end andre, og samtidig opfylde kravet om termisk komfort i lokalet. Et system med diffus loftindblæsning er velegnet til dette formål i en køle situation, da det i princippet kan tilføre meget store luftmængder uden at opstår megen træk, hvis det er designet til store luftmængder [5]. I tilfælde af ventilation med lille temperatur differens kan der blive problemer med at opretholde opblandingen.

Det kan generelt være et problem at fastholde friskluftmængden med de forskellige systemer fordi styrings- og ventilationssystemerne er primært styret efter en komfort situation. For eksempel vil et VAV (Variable air volumen) system regulere temperaturen ved at variere luftmængden. Dette ved en køle situation giver en styring med en lav friskluftmængde ved lave udetemperaturer i stedet for en konstant høj friskluftmængde. For at forhindre spredning af smitte i et VAV system kan man operere med en indblæsningstemperatur der kun er 2-4 grader lavere end rum temperaturen i stedet for de sædvanlige 6-10 grader og samtidig sætte minimum luftmængden til et højere niveau. Systemets maksimal kapacitet vil blive lavere og det vil resultere i en højere rum temperaturen når kølebelastningen er høj. Ved denne høje kølebelastning kan indblæsningstemperaturen blive sænket fordi der vil altid være høj volumenstrøm i denne situation.

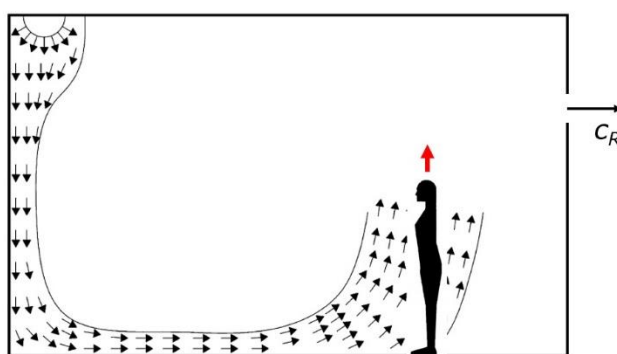
Fortrængningsventilation

Selv om fortrængningsventilation er anset for at være et effektivt system i mange forbindelser så kan det være problematisk i forbindelse med smittekontrol. Den nødvendige lodrette temperaturgradient kan låse en udånding fra en person i en given højde og opretholde et højt koncentrations niveau i denne højde i hele lokalets omfang. Dette kan forøge mikrodråbe eksponeringen for andre personer i lokalet i forhold til den situation hvor der for eksempel er tale om opblandings ventilation, hvis personerne netop indånder luft fra lagdelingen med høj koncentration.

Figur 1B indikerer at den relative eksponering kan ofte være lavere end 1,0 i tilfælde af fortrængningsventilation ved afstande større end 1,5 m, men det forudsætter dog at personer ikke er i bevægelse. Den lave koncentration i den nederste del af lokalet forudsætter en højere koncentration af mikrodråber i større højder med fare for en stor eksponering i denne højde.

Områder med stempelstrømning

Et område med stempelstrømning (et felt med ensrettede parallelstrømning hvor der ikke kan forekomme opstrøms opblanding) kan være gunstig for at etablere en strømningsfelt med ren luft og lav mikrodråbe- og virus niveau. Eksempler på systemer der kan skabe en form for stempelstrømning, eller lokal fortrængningsventilation, kan være systemer der anvender partiel indblæsning i dele af loftfladen over områder hvor der ikke befinder sig varmekilder [37].

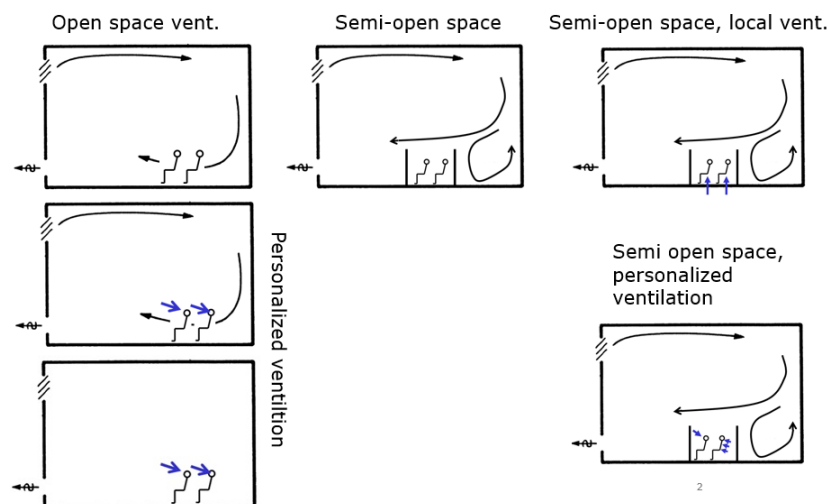


Figur 3. Lokale med vertikal luftindblæsning igennem et langsgående tekstil armatur. Der etableres stempelstrømning i en del af lokalet omkring personen.

I tilfælde af køling er det – som et eksempel - muligt at skabe et område i lokalet på Figur 3 hvor der er en form for stempelstrømning i opholdszonen. Det er både indblæsningsarmaturets placering og returåbningernes placering som er afgørende for virkningen. Desuden er det vigtigt at den varme termiske strømning fra personer arbejder med strømningsretningen. Koncentrationen omkring personen i højre side vil typisk være på niveauet $c_R/2$. Bemærk at det er ikke muligt at opnå en ønsket virkning hvis personer og varmekilder er placeret lige under loftarmaturet [38].

Storrumskontor og rumopdeling

Opdeling af store rum (med en generel luftfordeling) i mindre afsnit med lokalt klima, kan give anledning til uensartet fordeling af aerosoler i hele rummet med fordele der kan udnyttes og ulemper man skal undgå. Vi kan opdele rum i kategorierne i fuldt åbne rum, halvåbne rum, halvåbne rum med lokal ventilation, åbne og halvåbne rum med personlig ventilation Figur 6.



Figur 4. Et skematisk opdeling af luftfordelingsprincipper i åbent rum, halvåbne rum og lokal ventilation samt personlig ventilation.

Figur 4 viser luftfordelingsprincipper i forskellige typer rum. Ventilationen i det åbne rum vises i venstre kolonne som eneste ventilationsform eller som en hovedventilation kombineret med personlig ventilation. Den midterste kolonne viser halvåbne rum, der er typiske for de rum, der oprettes, når opholdszonen opdeles for at skabe et 'privat' miljø eller for at minimering af dråbeinfektion. Højre kolonne viser løsninger der anvender halvåbne rum med lokal ventilation og personlig ventilation kombineret med en hovedventilation.

Åben rum

I et åbent kontorlandskab vil der være specielle forhold man skal tage i betragtning i forbindelse med smittespredning. Vi kan for eksempel betragte en situation hvor n personer opholder sig i et stort lokale hvor personerne holder afstand. Lokalet tilføres en dimensioneret luftmængde på $q_{tot} = n \cdot q_p$ hvor q_p er den nødvendige lufttilførsel per person for at opfylde de almindelige krav til komfort. Hvis der blandt de n mennesker er en person der smitter med luftbåren virus, vil der i et stort rum være en stor lufttilførsel til rådighed for opblanding af den ene kildens generering af virus og der opstår en lav virus koncentration i rummet. Dette kan være en stor fordel hvis smittespredningen er karakteriseret ved et beskedent element af luftbåren spredning. Omvendt vil et åbent kontorlandskab være en farlig, hvis smittespredningen er kraftig luftbåren (smitter selv ved lav et virus koncentration) da alle n personer så kan blive udsat for smitte.

Halvåbne rum

Halvåbne rum kan f.eks. etableres ved at installere plexiglasafskærmning eller andre fysiske barrierer på det sted, hvor social afstand er vanskelig at opretholde. Fysiske barrierer kan også give en fysisk adskillelse mellem mennesker for at understøtte social og fysisk afstand. Figur 5 viser de mulige konfigurationer af fysisk barriere i arbejdsmiljøet. I teorien kan plexiglasafskærmninger beskytte en mod store åndedrætsdråber, der spredtes under tale, nyse eller hoste ved at spærre for dråbernes bevægelse. Det er dog vigtigt at bemærke, at effektiviteten af plexiglas beskyttelse imod luftbåret krydsinfektion stadig er uklar. Der er ingen data, der understøtter dens effektivitet over for små dråbers (mikrodråber) transmission.



STEELCASE



OFS



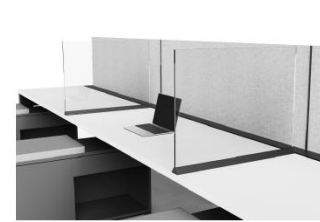
OFS



STEELCASE



ALLSTEEL

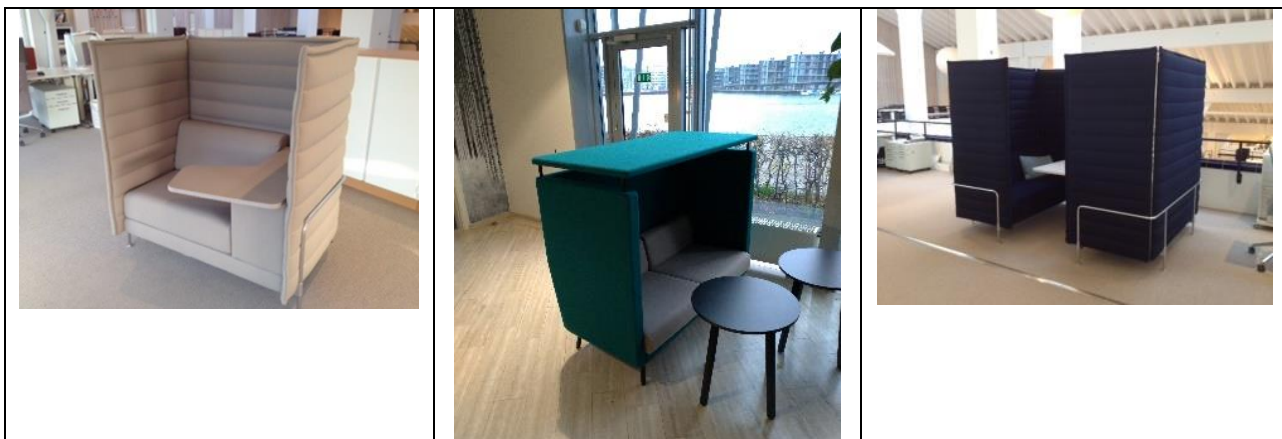


ALLSTEEL

Figur 5. Eksempler på anvendelse af fysiske barrierer i et kontor miljø [59].

Et problem i forbindelse med brugen af fysiske barrierer er, at det er vanskeligt at forudsige deres indvirkning på luftstrømsfordelingen i rummet, da det afhænger af rum layout og ventilationsprincipper. Fysisk barriere kan reducere blandingen af rumluft og frisk luft og resultere i en stillestående zone, hvor forureningen akkumuleres. Der er udført en laboratorietest på TNO for at undersøge effekten af forskellige arrangementer af fysiske barrierer (plexiglasafskærmning) anvendt ved forskellige ventilationssystemer (loft armaturer og facade armaturer med lav, medium og høj volumenstrøm) for at reducere risikoen for aerosoleksponering i en restaurant miljø [60]. Resultaterne viste, at ventilationshastighed er den mest afgørende parameter for eksponeringsrisikoen. Brug af fysiske barrierer kan forbedre situationen med høj, medium ventilationshastighed sammenlignet med 1,5 m social afstands layout, men synes meget afhængig af de enkelte layouts, og situationen kan forværres ved den lave ventilationshastighed. Det anbefales at bruge fysiske barrierer med den forudsætning, at ventilationshastigheden er højere end det minimale krav i de nuværende bygningsregulativer eller -standarder.

Som sagt så kan halvåbne rum være etableret for at skabe et privat miljø, men samtidig kan de også være både egnet og også uegnet, som et led i at etablere en ren zone. Figur 6 viser eksempler på afskærmninger som sandsynligvis vil fastholde en høj virus koncentration omkring en person der smitter. Et ophold tæt ved en sådan person vil give en højere eksponering end den omgivende fuldt opblandet luft.



Figur 6 Eksempler på halvåbne rum. Der kan skabes et uforstyrret mødemiljø men der er fare for at der kan opstå en forhøjet koncentration af aerosoler.

Halvåbne rum med lokal ventilation

Som vist på Figur 4 kan man forsyne halvåbne rum med lokal ventilation. Figur 7 viser eksempler på praktiske løsninger.



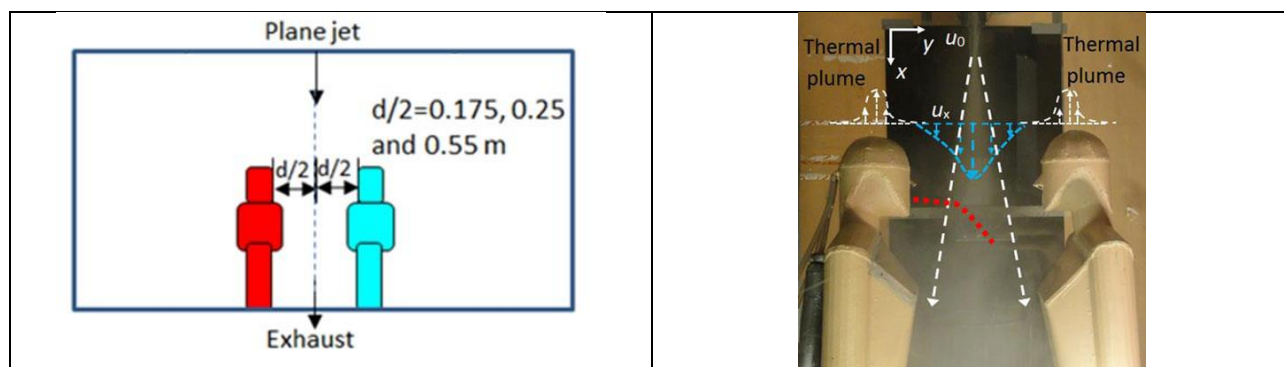
Figur 7. A) En afskærmning af en arbejdsplads med skærme der tilfører friskluft. B) I midten en installation hvor der tilføres luft individuelt til køjer C) Til højre et åbent køkken hvor udsugningen skaber undertryk. D) Celle i kontorlandskab med personlige ventilation.

Figur 7A viser en arbejdsplads hvor der primært er en afskærmning for at dæmpe støjen i værkstedet. For at forbedre luftmiljøet på arbejdspladsen bliver der samtidig tilført ren udeluft igennem skærmene ind imod personer. En sådan installation kunne også være relevant til etablering af et lavt niveau af aerosoler i andre miljøer [61][62].

Figur 7B viser forsøg med friskluft forsyning til køjerne i et marineskib. Køjerne skaber halvåbne rum som hver for sig får en lokal ventilation. Figur 7C illustrerer princippet i et åbent køkken. Udsugningen skaber undertryk i området og forurening fra området fjernes i stedet for at tilføres tilstødende områder. Denne tankegang kan også udvides til at styre koncentrationsniveauerne i halvåbne rum. I et hospitalsafsnit hvor der er patienter med luftbårne sygdomme skal der, som et af kravene, være undertryk i patienternes opholdslokale. Afskærmninger i hospital stuer er en prisbillig metode til at reducere krydsinfektion imellem sengene, og det er specielt effektivt hvis hver sektion har separat luftforsyning og afkast [63]. Det må være en metode der også kan anvendes i andre situationer, men det er nødvendigt at følge det op med målinger.

Visse storrums kontorer kan være opdelt i små celler der hver har et gulv armatur. I disse celler kan der ved ventilation etableres individuelle koncentrationsniveauer der er lavere end den koncentration af aerosoler der kan være til stede i det omgivende storum, se [64] og [65] for et typisk Amerikansk kontor layout (Forsøgslokale i Syracuse University), Figur 7D. Det halvåbne rum ventileres lokalt med et gulv armatur og det er muligt at skabe koncentrations niveau som kun er 35 % af det luftbårne aerosol niveau i det omgivende storum. Løsningen kan ikke betragtes som personlig ventilation, da den giver mulighed for at flere personer kan opholde sig i en større celle med fælles luftforsyning.

Det er muligt at etablere opdelinger i et rum ved hjælp af lodrette lufttæpper. De dannes ved hjælp af indblæsningsspalter placeret i loftet og returspalter placeret i gulvet [66]. Et lufttæppe alene kan dog kun reducere dråbeinfektion medens medrivning i den plane stråle vil opblande luften i de to rum halvdele. Figur 8 viser princippet i luftstrømnings fordeling i et lokale delt med et lodret lufttæppe.



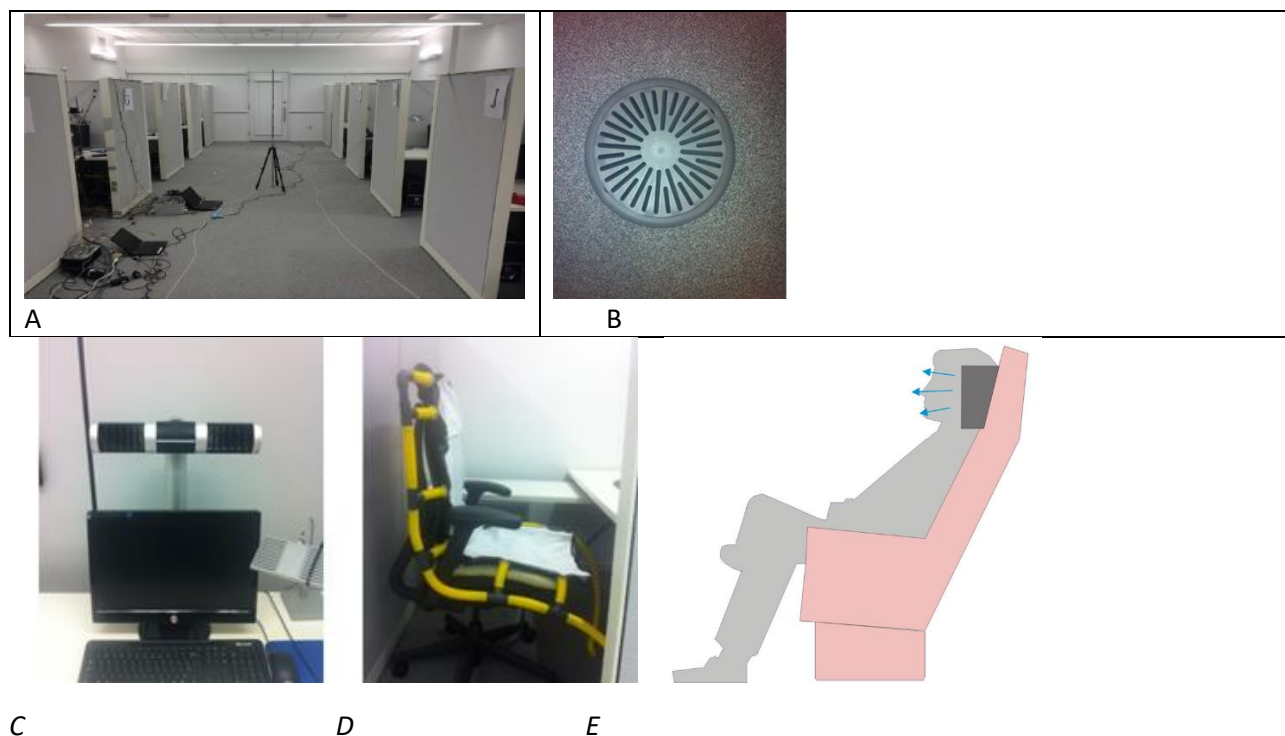
Figur 8. Layout og princip ved opdeling med et lodret lufttæppe samt en skitse af et lufttæppe for reduktion af dråbespredning [66].

De halvåbne rum med lokal ventilation har altså den fordel at der kan skabes en ren lufttilførsel til cellen. Luftmængden skal naturligvis være tilstrækkelig til at der kan opretholdes et lavt virus niveau hvis der opholder sig flere personer i cellen. Det er derfor ikke givet at det er en optimal løsning i forhold til at anvende et åbent kontorlandskab som det er omtalt i indledningen af afsnittet.

Halvåbne rum med personlig ventilation

Det er effektivt at anvende personlig ventilation i et storum med halvåbne rum. Figur 9 viser en løsning fra Syracuse University hvor en kontor enhed (celle) blev afprøvet med gulv indblæsning, personlig ventilation

ved frontal stråle (PV) og personlig ventilation ved lufttilførsel igennem kontorstolens tekstiler, (CV) Chair Ventilation [64][67].



Figur 9. A) Storrumss kontor med 12 kontor celler. B) gulv armatur, C) Personlig ventilation med stråle (PV), D) Personlig ventilation med frisklufttilførsel gennem tekstil (CV), E) Personlige ventilation tilførsel rent luft fra armatur monteret på nakkestøtte.

Brug af personlig ventilation viser at man i de refererede forsøg kan skabe et koncentrationsniveau med et PV system med stråle eller med frisklufttilførsel igennem tekstil, med et aerosol niveau som er 40 % af det luftbåren aerosol niveau i det omgivende storrum.

Mikrodråber- og virus fordeling i bygninger, kontorer, flerrumskontorer og halvåbne rum

Ovenstående afsnit handler om layout af rum i en bygning. Disse layout kan være baseret på forhold som arbejdsopgaver, organisationsstruktur, ønske om privathed, lokale varmekilder, lokale forureningskilder, krav om termisk komfort, luftkvalitet, støjbeskyttelse, lysadgang mm.

Luftbåren smittespredning er næppe taget i betragtning i den nuværende almene bygningslayout selv om ønsket om høj luftkvalitet i visse situationer understøtter problemet. I det følgende skal der derfor anvises en simple måleprocedure der kan belyse problemet.

Kuldioxid (CO_2) i luften kan stamme fra personers udånding og derfor være også være et udtryk for et mikrodråbe niveau, eller et udtryk for virus i luften, hvis der er smittede personer til stede i bygningen. Hvis der er varierende koncentrationer i et lokale tyder det på dårlig opblanding. Hvis der er varierende koncentrationer i løsninger med halvåbne rum kan det indikere områder med gode eller dårlige luftmiljøer, da det lokale CO_2 niveau også er et udtryk for kvaliteten af luftfornyelsen i området. Generelt er et højt CO_2 niveau et udtryk for lav ventilation eller stor personbelastning. Målte værdier skal naturligvis korrigeres for luftens naturlige indhold af kuldioxid.

Bygningsniveau:

- Forskellige koncentrationsniveau i forskellige områder indikerer lokaler med høj eller lav ventilation samt høj eller lav personbelastning. Der kan også være effekter, der opstår på grund af trykforholdene i bygningen med tilhørende lækage strømning.

Åbent rum:

- Forskellige koncentrationsniveau i forskellige områder indikerer lav opblanding i rumluften. Hvis det gælder opholdszonen, betyder det, at der kan være områder med et højere mikrodråbe niveau end det der ville være tilfældet ved en god opblanding. Det vil betyde en højere risiko for et forhøjet virusniveau.

Halvåbne rum:

- Forskellige koncentrationsniveau i forskellige områder af kontorceller med ens belastning uden lokal ventilation (Figur 4) kan belyse i hvor høj grad en kontorcelle kan oparbejde et skadeligt mikrodråbe niveau.
- Forskellige koncentrationsniveau i de forskellige kontorceller med lokale ventilation (Figur 5) og ens belastning kan belyse effekten af denne ventilation.

Personlig ventilation:

- Koncentrationen i det åbne rum kan sammenlignes med koncentrationsniveauet i åndingszonen ved personlig ventilation. Forskellen kan give et udtryk for den beskyttelse, der kan opnås ved personlig ventilation.

Figur 10 viser en anvendelse af CO₂ målinger til at analysere forholdene i en bygning. Der kan for eksempel være tale om et midlertidigt hospital som et af dem der blev oprettet i Wuhan i 2020. I en sådan midlertidig installation, kan det være svært overskue ventilationsforholdene og en række CO₂ målere er med til at give et overblik over situationen [68]. Figur 10A viser en af de mobile CO₂ målere og 10B viser et typisk midlertidigt hospital i et udstillings center.



Figur 10. A) Mobil sensor for CO₂, PM 2.5 masse koncentration, luft temperatur og relative fugtighed. B) plan over midlertidig hospital i Wuhan [68].

Referencer

- [1] D. Müller, C. Kandzia, R. Kosonen, A. K. Melikov, and P. V. Nielsen, *REHVA Guidebook No.19: Mixing ventilation*. Federation of European Heating, Ventilation and Air - conditioning Associations, 2013.
- [2] C. Zhang, P. Heiselberg, and P. V Nielsen, "Diffuse Ceiling Ventilation : A Review," *Int. J. Vent.*, vol. 13, no. 1, pp. 49–63, 2014.
- [3] B. ; Bertheussen, P. ; Mustakallio, A. K. Melikov, and R. Kosonen, "Performance of Chilled Beam with Radial Swirl Jet and Diffuse Ceiling Air Supply in Heating Mode," in *11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*, 2013.
- [4] B. Bertheussen, P. Mustakallio, R. Kosonen, and A. K. Melikov, "Comparison of the Performance of Chilled Beam with Swirl Jet and Diffuse Ceiling Air Supply: Impact of Heat Load Distribution," in *11th REHVA World Congress and the 8th International Conference on Indoor Air Quality, Ventilation and Energy Conservation in Buildings*, 2013.
- [5] C. Zhang, T. Yu, P. Heiselberg, M. Pominaowski, and P. Nielsen, "Diffuse Ceiling Ventilation – Design Guide," Aalborg University, DCE Technical Report, 2016.
- [6] P. V Nielsen and E. Jakubowska, "The Performance of Diffuse Ceiling Inlet and other Room Air Distribution Systems," *Cold Clim. HVAC*, p. 7, 2009.
- [7] R. Kosonen, A. Melikov, E. Mundt, P. Mustakallio, and P. V. Nielsen, *REHVA Guidebook No.23: Displacement Ventilation*. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations, 2017.
- [8] Y. Li, P. V. Nielsen, and M. Sandberg, "Displacement Ventilation In Hospital Environments," *ASHRAE J.*, vol. 53, no. 6, pp. 86–88, 2011.
- [9] A. K. Melikov, "Personalized ventilation," *Indoor Air, Suppl.*, vol. 14, no. SUPPL. 7, pp. 157–167, 2004, doi: 10.1111/j.1600-0668.2004.00284.x.
- [10] R. Cermak and A. K. Melikov, "Protection of occupants from exhaled infectious agents and floor material emissions in rooms with personalized and underfloor ventilation," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 1, pp. 23–38, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10390942.
- [11] A. K. Melikov, R. Cermak, and M. Majer, "Personalized ventilation: Evaluation of different air terminal devices," *Energy Build.*, vol. 34, no. 8, pp. 829–836, 2002, doi: 10.1016/S0378-7788(02)00102-0.
- [12] A. K. Melikov, M. A. Skwarczynski, J. Kaczmarczyk, and J. Zabecky, "Use of personalized ventilation for improving health, comfort, and performance at high room temperature and humidity," *Indoor Air*, vol. 23, no. 3, pp. 250–263, 2013, doi: 10.1111/ina.12012.
- [13] A. K. . Halvoňová B.a b Melikov, "Performance of 'ductless' personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: Impact of intake height," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 427–436, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.023.
- [14] A. Lipczynska, J. Kaczmarczyk, and A. K. Melikov, "Thermal environment and air quality in office with personalized ventilation combined with chilled ceiling," *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 603–614, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.05.035.
- [15] R. Li, S. C. Sekhar, and A. K. Melikov, "Thermal comfort and indoor air quality in rooms with integrated personalized ventilation and under-floor air distribution systems," *HVAC R Res.*, vol. 17, no. 5, pp. 829–846, 2011, doi: 10.1080/10789669.2010.544834.
- [16] R. Cermak, A. K. Melikov, L. Forejt, and O. Kovar, "Performance of personalized ventilation in conjunction with mixing and displacement ventilation," *HVAC R Res.*, vol. 12, no. 2, pp. 295–311, 2006, doi: 10.1080/10789669.2006.10391180.
- [17] P. V. Nielsen, "Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces," *J. R. Soc. Interface*, vol. 6, 2009, doi: 10.1098/rsif.2009.0228.focus.
- [18] C. Xu, P. V. Nielsen, L. Liu, R. L. Jensen, and G. Gong, "Impacts of airflow interactions with thermal

- boundary layer on performance of personalized ventilation," *Build. Environ.*, vol. 135, pp. 31–41, May 2018, doi: 10.1016/j.buildenv.2018.02.048.
- [19] C. Xu *et al.*, "Effects of personalized ventilation interventions on airborne infection risk and transmission between occupants," *Build. Environ.*, vol. 180, p. 107008, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107008.
- [20] J. Yang, S. C. Sekhar, K. W. D. Cheong, and B. Raphael, "Performance evaluation of a novel personalized ventilation-personalized exhaust system for airborne infection control," *Indoor Air*, vol. 25, no. 2, pp. 176–187, 2015, doi: 10.1111/ina.12127.
- [21] P. V. Nielsen *et al.*, "Chair with Integrated Personalized Ventilation for Minimizing Cross Infection," in *Proceedings of Roomvent 2007*, 2007.
- [22] P. V. Nielsen, H. Jiang, and M. Polak, "Bed with Integrated Personalized Ventilation for Minimizing Cross Infection," in *Proceedings of Roomvent 2007*, 2007, p. 218.
- [23] A. K. Melikov and V. Dzhartov, "Advanced air distribution for minimizing airborne cross-infection in aircraft cabins," *HVAC&R Res.*, vol. 19, no. 8, pp. 926–933, Nov. 2013, doi: 10.1080/10789669.2013.818468.
- [24] Z. D. Bolashikov, M. Barova, and A. K. Melikov, "Wearable personal exhaust ventilation: Improved indoor air quality and reduced exposure to air exhaled from a sick doctor," *Sci. Technol. Built Environ.*, vol. 21, no. 8, pp. 1117–1125, Nov. 2015, doi: 10.1080/23744731.2015.1091270.
- [25] A. K. Melikov, "COVID-19: Reduction of airborne transmission needs paradigm shift in ventilation," *Building and Environment*, vol. 186, Elsevier Ltd, p. 107336, Dec. 01, 2020, doi: 10.1016/j.buildenv.2020.107336.
- [26] S. Schiavon and A. K. Melikov, "Energy-saving strategies with personalized ventilation in cold climates," *Energy Build.*, vol. 41, no. 5, pp. 543–550, May 2009, doi: 10.1016/j.enbuild.2008.11.018.
- [27] A. Melikov, T. Ivanova, and G. Stefanova, "Seat headrest-incorporated personalized ventilation: Thermal comfort and inhaled air quality," *Build. Environ.*, vol. 47, no. 1, pp. 100–108, Jan. 2012, doi: 10.1016/j.buildenv.2011.07.013.
- [28] A. K. Melikov, "Advanced air distribution," *ASHRAE J.*, vol. 53, no. 11, pp. 73–77, 2011.
- [29] Z. Bolashikov, A. Melikov, M. Spilak, I. Nastase, and A. Meslem, "Improved inhaled air quality at reduced ventilation rate by control of airflow interaction at the breathing zone with lobed jets," *HVAC R Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 238–250, Feb. 2014, doi: 10.1080/10789669.2013.864919.
- [30] Z. Bolashikov, A. Melikov, and M. Spilak, "Experimental investigation on reduced exposure to pollutants indoors by applying wearable personalized ventilation," *HVAC R Res.*, vol. 19, no. 4, pp. 385–399, May 2013, doi: 10.1080/10789669.2013.784645.
- [31] A. K. Melikov, "Advanced air distribution: improving health and comfort while reducing energy use," *Indoor Air*, vol. 26, no. 1, pp. 112–124, Feb. 2016, doi: 10.1111/ina.12206.
- [32] A. K. Melikov, Z. D. Bolashikov, and E. Georgiev, "Novel ventilation strategy for reducing the risk of airborne cross infection in hospital rooms," in *12th International Conference on Indoor Air Quality and Climate*, 2011, p. 1037.
- [33] S. Schiavon, A. K. Melikov, and C. Sekhar, "Energy analysis of the personalized ventilation system in hot and humid climates," *Energy Build.*, vol. 42, no. 5, pp. 699–707, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2009.11.009.
- [34] B. Yang, C. Sekhar, and A. K. Melikov, "Ceiling mounted personalized ventilation system in hot and humid climate - An energy analysis," *Energy Build.*, vol. 42, no. 12, pp. 2304–2308, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.022.
- [35] A. Lipczynska, J. Kaczmarczyk, and A. Melikov, "The Energy-Saving Potential of Chilled Ceilings Combined with Personalized Ventilation," *Energies*, vol. 14, no. 4, p. 1133, Feb. 2021, doi: 10.3390/en14041133.
- [36] P. V. Nielsen, C. E. Hylgaard, A. K. Melikov, H. Andersen, and M. Soennichsen, "Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals - with and without personalized ventilation," *HVAC R Res.*, pp. 2522–2526, 2005.

- [37] P. V. Nielsen, Y. Li, M. Buus, and F. V. Winther, "Risk of cross-infection in a hospital ward with downward ventilation," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 9, pp. 2008–2014, 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2010.02.017.
- [38] P. V. Nielsen, C. E. Hyldgaard, A. Melikov, H. Andersen, and M. Soennichsen, "Personal exposure between people in a room ventilated by textile terminals—with and without personalized ventilation," *HVAC R Res.*, vol. 13, no. 4, pp. 635–643, 2007, doi: 10.1080/10789669.2007.10390976.
- [39] B. Yang *et al.*, "A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions," *Energy Build.*, vol. 202, p. 109359, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109359.
- [40] P. V. Nielsen, F. V. Winther, M. Buus, and M. Thilageswaran, "Contaminant Flow in the Microenvironment between People under Different Ventilation Conditions," *ASHRAE Trans.*, pp. 632–640, 2008.
- [41] C. Xu, P. V. Nielsen, G. Gong, L. Liu, and R. L. Jensen, "Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects," *Indoor Air*, vol. 25, no. 2, pp. 188–197, 2015, doi: 10.1111/ina.12129.
- [42] L. Liu, Y. Li, P. V. Nielsen, J. Wei, and R. L. Jensen, "Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people," *Indoor Air*, vol. 27, no. 2, pp. 452–462, 2017, doi: 10.1111/ina.12314.
- [43] Z. Ai, K. Hashimoto, and A. K. Melikov, "Influence of pulmonary ventilation rate and breathing cycle period on the risk of cross-infection," *Indoor Air*, vol. 29, no. 6, pp. 993–1004, 2019, doi: 10.1111/ina.12589.
- [44] E. Bjørn and P. V. Nielsen, "Dispersal of exhaled air and personal exposure in displacement ventilated rooms," *Indoor Air*, vol. 12, no. 3, pp. 147–164, 2002, doi: 10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x.
- [45] Z. T. Ai, T. Huang, and A. K. Melikov, "Airborne transmission of exhaled droplet nuclei between occupants in a room with horizontal air distribution," *Build. Environ.*, vol. 163, no. March, 2019, doi: 10.1016/j.buildenv.2019.106328.
- [46] I. Olmedo, P. V. Nielsen, M. R. de Adana, and R. L. Jensen, "The risk of airborne cross-infection in a room with vertical low-velocity ventilation," *Indoor Air*, vol. 23, no. 1, pp. 62–73, 2013, doi: 10.1111/j.1600-0668.2012.00794.x.
- [47] L. Liu, C. Xu, P. V. Nielsen, Y. Li, and R. L. Jensen, "Interpersonal transport of droplet nuclei among three manikins in a full-scale test room," *ASHRAE Trans.*, vol. 120, no. 1, Jan. 2014.
- [48] P. V. Nielsen, I. Olmedo, M. R. De Adana, P. Grzelecki, and R. L. Jensen, "Airborne cross-infection risk between two people standing in surroundings with a vertical temperature gradient," *HVAC R Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 552–561, 2012, doi: 10.1080/10789669.2011.598441.
- [49] Z. Ai, K. Hashimoto, and A. K. Melikov, "Airborne transmission between room occupants during short-term events: Measurement and evaluation," *Indoor Air*, vol. 29, no. 4, p. ina.12557, May 2019, doi: 10.1111/ina.12557.
- [50] B. Halvoňová and A. K. Melikov, "Performance of 'ductless' personalized ventilation in conjunction with displacement ventilation: Impact of disturbances due to walking person(s)," *Build. Environ.*, vol. 45, no. 2, pp. 427–436, Feb. 2010, doi: 10.1016/j.buildenv.2009.06.023.
- [51] T. Arghand, T. Karimipannah, H. B. Awbi, M. Cehlin, U. Larsson, and E. Linden, "An experimental investigation of the flow and comfort parameters for under-floor, confluent jets and mixing ventilation systems in an open-plan office," *Build. Environ.*, vol. 92, pp. 48–60, 2015, doi: 10.1016/j.buildenv.2015.04.019.
- [52] M. R. Naunheim *et al.*, "Safer Singing During the SARS-CoV-2 Pandemic: What We Know and What We Don't," *J. Voice*, vol. 0, no. 0, 2020, doi: 10.1016/j.jvoice.2020.06.028.
- [53] M. Abkarian, S. Mendez, N. Xue, F. Yang, and H. A. Stone, "Speech can produce jet-like transport relevant to asymptomatic spreading of virus," *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 117, no. 41, pp. 25237–25245, Oct. 2020, doi: 10.1073/pnas.2012156117.
- [54] L. Bandiera *et al.*, "Face coverings and respiratory tract droplet dispersion," *R. Soc. Open Sci.*, vol. 7, no. 12, p. 201663, Dec. 2020, doi: 10.1098/rsos.201663.
- [55] P. V. Nielsen and C. Xu, "Multiple airflow patterns in human microenvironment and the influence on

- short-distance airborne cross infection - a review" *Submitt. to J. Indoor Built Environ.*, 2022.
- [56] X. Xie, Y. Li, A. T. Y. Chwang, P. L. Ho, and W. H. Seto, "How far droplets can move in indoor environments - revisiting the Wells evaporation-falling curve," *Indoor Air*, vol. 17, no. 3, pp. 211–225, 2007, doi: 10.1111/j.1600-0668.2007.00469.x.
- [57] L. Bourouiba, "Turbulent Gas Clouds and Respiratory Pathogen Emissions: Potential Implications for Reducing Transmission of COVID-19," *JAMA - J. Am. Med. Assoc.*, vol. 323, no. 18, pp. 1837–1838, 2020, doi: 10.1001/jama.2020.4756.
- [58] P. V Nielsen, Y. Li, F. Khalegi, A. Møllerskov, and L. Liu, "A full-scale study of exhaled droplet dispersion in the microenvironment around one and two persons," in *The Second International Conference on Building Energy and Environment 2012 Topic*, 2012, pp. 602–609.
- [59] Federal Facilities Council, "Federal Facilities Council Webinar: Evolution or Revolution? Changes in Workspaces in Response to COVID-19," 2020.
- [60] Tno-rapport, "TNO 2020 R11252: Laboratoriumonderzoek naar effect van verschillende opstellingen, ventilatiesystemen en ventilatiehoeveelheden op de blootstelling van aerosolen in een horecagelegenheden," Delft, 2020.
- [61] P. V Nielsen, *Forurenende processer og den almene ventilation*. Aalborg: Institut for Bygningsteknik, Aalborg Universitetscenter, 1990.
- [62] K. Belin, *Allmänventilation med deplacerande strömning: utvärdering av energisnålt ventilationssystem och generella studier av principen*. Statens råd för byggnadsforskning, 1978.
- [63] C. J. Noakes, P. A. Sleight, A. R. Escombe, and C. B. Beggs, "Use of CFD Analysis in Modifying a TB Ward in Lima, Peru," *Indoor Built Environ.*, vol. 15, no. 1, pp. 41–47, 2006, doi: 10.1177/1420326X06062364.
- [64] M. Kong, J. Zhang, P. Nielsen, J. Wang, and W. Li-hui, "Experimental Study of Chair Ventilation in Office Cubicles," in *ROOMVENT 2014, 13th SCANVAC International Conference on Air Distribution in Rooms*, 2014.
- [65] M. Kong, "Semi-Open Space and Micro-Environmental Control for Improving Thermal Comfort, Indoor Air Quality, and Building Energy Efficiency," Syracuse University, 2017.
- [66] G. Cao, P. V. Nielsen, R. L. Jensen, P. Heiselberg, L. Liu, and J. Heikkinen, "Protected zone ventilation and reduced personal exposure to airborne cross-infection," *Indoor Air*, vol. 25, no. 3, pp. 307–319, 2015, doi: 10.1111/ina.12142.
- [67] M. Kong, J. Zhang, and J. Wang, "Air and air contaminant flows in office cubicles with and without personal ventilation: A CFD modeling and simulation study," *Build. Simul.*, vol. 8, no. 4, pp. 381–392, 2015, doi: 10.1007/s12273-015-0219-6.
- [68] L. Liu, H. Zhou, B. Lin, and J. Yu, "Real-time monitoring and controlling strategies of indoor environment in the frontline hospitals during COVID-19 pandemic," *Kexue Tongbao/Chinese Sci. Bull.*, vol. 66, no. 4–5, pp. 424–432, Feb. 2021, doi: 10.1360/TB-2020-0660.

VENTILATION OG INDEKLIMA: FILTRERING OG DEKONTAMINERING AF LUFT VED RISIKO FOR VIRUSOVERFØRSEL SOM CORONA VIRUS (SARS-COV-2)

DRAFT RAPPORT

Kiril Naydenov/Rambøll

1. Luft filtrering

Luftfiltre som findes i bygninger, påvirker signifikant den indendørs luftkvalitet ved at reducere koncentrationen af partikler og dermed at øge menneskets sundhed. Partikler i luften kan være en alvorlig sundhedsfare, der bidrager til eller endda forårsager luftvejssygdomme og hjerte-kar-sygdomme. Det er velkendt, at bl.a. den byens luftkvalitet i dag er forurenet af partikler og gasser fra forbrænding og trafik som skal filtreres. Derudover skal bakterie- og svampesporer af hygiejniske årsager fjernes fra luftstrømmen. Alle disse sager er forbundet med udendørs luft. I modsat, er smitsomme sygdomme som COVID-19 primært identificeret i indendørs luft, hvor typisk vira "transporteres" i luften fastgjort på partikler. Partikler indendørs kan være genereret fra mennesker eller udstyr samt ved transport af luft gennem ventilationsanlæg, kontrolleret (f.eks. vinduer) og ukontrolleret lækager i bygninger. Filtrering af partikler i indendørs luft gennem mekanisk ventilation er i fokus i nuværende dokument.

Mekanismerne til adskillelse af partikler og gasser i luften er fundamentalt forskellige. Partikler adskilles ved mekaniske eller elektromekaniske effekter, hvorimod gasser normalt adskilles ved adsorption eller absorption. Nuværende dokument fokuserer på filtrering af partikler, da det er mest anvendeligt med hensyn til forebyggelse af spredning af infektiøse sygdomme.

Der er to brede kategorier af partikelforurening: levedygtig og ikke- levedygtig partikelforurening. Eksempler på ikke-levedygtige partikler er støv, røg, røg, tåge og tåge. Levedygtig partikelforurening kan defineres som en partikel, der består af eller understøtter en eller flere levende mikroorganismer. Bakterier, vira og sporer er alle eksempler på levedygtig partikelforurening. Mennesker producerer store mængder levedygtige partikler.

Størrelsen af pollen er mellem 10 µm og 100 µm, mæslingevirus (50–500 nm, 1µm=1000 nm), HIV virus (120 nm), Zika virus (45 nm), SARS virus (0.08–0.12 µm), virus influenzavirus (0.1 µm–1 µm) og Mycobacterium tuberculosis (1-3 µm) [1, 2]. Til info, mindste partikelstørrelse som kan ses med det blotte øjne, er ca.40 µm. SARS-CoV-2 vira har størrelser mellem ca. 0.06 µm og 0.14 µm. Virus såsom SARS-CoV-2 flyder ikke gennem luften som frie partikler, men altid med en væske, spyt og/eller slim som udåndede dråber. Diametrene på disse dråber er derfor meget større end virus diameter. En rask person udånder aerosol partikler med størrelse mellem 0.2 og 0.4 µm under normal hvile vejtrækning, 1 til 2 µm under tale og synge. Partikler større end 100-1000 µm kan også observeres under tale eller synge samt hoste, nyse [3,4,5]. Evans [6] rapporterer at dråber, der er dannet med diametre mindre end ~ 50 µm mister hurtigt det meste af deres vand til fordampning, krymper med en faktor på 2-3 i diameter og bliver til "dråbekerner". Disse finder partikler sætter sig langsomt og blandes med luften indendørs [6,7]. Det antages almindeligvis, at dråbekerne-partikler har en gennemsnitlig diameter på 1 til 3 µm [7]. Dvs. dråber-, dråbekerner- samt bakterie eller virus-størrelsen kan variere meget i henhold til fysik, person, aktiviteter og filtrering skal tilpasses specifik for patogen eller patogen gruppe samt små størrelser for patogener bør ikke overses.

1.1.1 Partikelfilter

Et partikelfilter består hovedsagelig af ét eller flere lag af tynde fibre af mikroglas eller syntetisk materiale (plast), plisseret eller syet på poser og holdt sammen med en ramme af stål, plast eller træ. Filtrenes diameter er på mellem 1-10 µm. Mikroglasfiltre har tyndere fibre end de syntetiske filtre.

Partikler bevæger sig gennem luften ved hjælp af diffusion og ballistiske kræfter, og de akkumuleres på overflader gennem tyngdekraft og elektrostatiske vedhæftning. Partikler, der er suspenderet i en aerosol, bevæges af flere kræfter: strømme, termisk variation og Brownian-bevægelse.

Korrekt luftfiltrering forhindrer de fleste eksternt genererede partikler i at komme ind i et rum. Under filtrering ledes det forurenede luft gennem et filter med huller, der er store nok til, at selve luft molekyler kan passere, men alligevel for lille til, at partiklerne kan komme igennem.

1.1.2 Filtrering af udendørsluft

Foreløbige undersøgelser har identificeret en positiv sammenhæng mellem COVID-19-relaterede dødeligheder og luftforurening i udendørsluften. Der er også en sandsynlighed at luftbårne partikler hjælper virusspredningen [8]. En undersøgelse i Italien konkluderede, at belastningen med høj luftforurening kunne være en medfaktor, der forårsagede den høje dødelighed på grund af COVID-19-infektionen [9]. Luftforurening i løbet af SARS-epidemien i 2003 blev også forbundet med øget SARS-dødelighed i flere undersøgelser. En undersøgelse viste, at SARS-patienter fra regioner i Kina med et højt luftkvalitetsindeks (AQI) har dobbelt så høj risiko til at dø af SARS sammenlignet med dem fra regioner med lav AQI [10]. Vind kan føre mikroorganismer fra jord over lange afstande i støv. Fx fugle influenza er blevet forbundet med støvstorme fra Centralasien [11].

Baseret på dette bevis er atmosfærisk partikler en effektiv vektor til transport og spredning af virusinfektioner. Flere mekanismer kan være på arbejde. For det første er det velkendt, at luftforurening reducerer lungens og hele personens sundhed, hvilket gør dem mindre i stand til at bekæmpe infektioner. For det andet udsættelse for luftforurening fører til stigninger i virusinfektion. Tredje, fungerer atmosfæriske partikler kan "transportere" biologiske forureninger inklusive vira samt at tillade vira at forblive aktive meget længere, end ellers ville være. [12]

Moderne ventilationssystemer er udstyret med fine luftfiltre lige efter udendørsluft indtaget (ISO ePM2.5 eller/og ePM1 (tidl. filterklasse F7 eller/og F9), som kan godt filtrere partikler fra udendørsluften. Størrelsen af de viruspartikler i luftvejs aerosoler af fx 0.12 µm (PM0.12), er mindre end fangstområdet for ePM1-filtre (tidl. filterklasse F9) (ePM1≥80%). Alligevel kan der forventes at størrelsen af atmosfæriske partikler som kan bære virus materiale er allerede inden for filterets fangstområde. Jf. REHVA [13] indebærer dette at standard fine luftfiltre giver rimelig beskyttelse mod en lav koncentration og lejlighedsvis forekomst af viralt materiale i udeluften.

REHVA anbefaler ingen udskiftning af eksisterende udendørsluft filtre med andre typer filtre med specielt luftfiltrerings effektivitet, heller ikke at udskifte dem hurtigere end normalt [13].

ECDC bemærker at filtereffektiviteten for filtre i ventilationsanlægget generelt ikke høj nok til at reducere antal partikler < 5µm [14]. Der skal også bemærkes at aerosols størrelse kan falde på grund af fordampning af væske på partikeloverfladerne [15]. Fx i tørre omgivelser (<40%RF) mister dråber hurtigt

deres fugtindhold gennem fordampning og bliver til "tørre aerosoler" [14]. Gesellschaft für Aerosolforschung e. V. [3] rapporterer at en ren vanddråbe af 100 µm diameter har brug for 15 s ved en relativ fugtighed af 50% til at fordampe til størrelse af en SARS-CoV-2-virus (0,14 µm), en 10 µm vanddråbe- 0.1 s og 1 µm dråbe kun 0.003 s. Flere undersøgelser har vist, at denne flydende fordampning typisk forekommer inden for mindre end en sekund (<1 sec) af emission afhængigt af den partikelstørrelse og den omgivende termodynamiske betingelser [7]. Efter hurtig fordampning, "dråbe-kerne" indeholder blandingen af faste partikler (inklusive infektiøse partikler).

Selvom udendørsluften som regel er virusfri, den er ikke fri for andre luftforurenende stoffer. Derfor en effektiv filtrering af udendørsluft skal der ikke undervurderes. Standarden EN16798-3:2017 stiller krav for minimumfilterklasser afhængigt af rumsklasse og udeluftkvalitet. Etablering af min. ePM1≥50 anbefales i ASHRAE Positionsdokument om smitsomme aerosoler, hvor bygninger, der ikke er en del af sundhedsvæsenet, skal overveje at forbedre central luft filtrering til MERV-13 (≈ePM1, tidl. F7) eller det højeste opnåelige niveau [17].

Opgradering af filtrene til en højere filterklasse vil øge virusreduktionen i forhold til filtertrinnet. Men andre overvejelser er vigtige såvel som kan luftbehandlingsenheden håndtere den højere modstand over luftfilteret, er tætninger og pakninger tætte nok til at retfærdiggøre den højere filterklasse. Generelt vil en eller to filterklasser op ikke forårsage et problem. Opgradering længere fx. til HEPA (High-Efficiency Particulate air) filterklasse vil kræve korrekte foranstaltninger.

Der er flere producenter i dag som har begyndt at producere HEPA-filtre med ePTFE membranmedier eller lign som er også udviklet til brug i HVAC-systemer i almindelige bygninger og ikke kun i renrum eller på hospitaler. Den innovative nye membranmedier kan tilbyde sammen filtreringseffektivitet ved lavere differenstræk sammenlignet med konventionel HEPA-filtre baseret på mikroglasfibertechnologi. Eksempler viser at kombination af ePM1 65% + H13 filtre (fx 290Pa) kan resultere i den sammen system tryktab som filterkombination af ePM1 60% + ePM1 80% filtre ved sammen luftmængde. Alternativ løsning med etablering af HEPA filtration i kombination med etablering af by-pass ved køleflade (vinter) eller varmegenvindingssektion (sommer) kan også overvejes. En tredje løsning kan være etablering af booster-ventilator med HEPA-filtre som kan bruges som midlertidig løsning.

1.1.3 Filtrering af indendørsluft

Filtre i ventilationssystemer for kontorbyggeri, skoler, mm er designet til at mindske generelt forureningskilder i udendørsluften og ikke for forureningskilder i selve bygning som infektiøse aerosoler genereret fra mennesker. Udendørsluft filtre, kan bruges til filtrering af indendørs vira kun ved fortyndingsprincip som er ofte forbundet med højt luftskifte eller lang tid.

Flere undersøgelser viser, at transmission som COVID-19 kan være særlig effektiv i overfyldte, indendørs lokaler såsom arbejdspladser (kontorer, fabrikker) og under indendørs begivenheder - f.eks. i kirker, restauranter, sammenkomst steder på skisportsområder, fester, indkøbscentre, kollegier, dansekurser, krydstogtskibe og køretøjer. Dvs. fokussen er rettet på indendørs miljø [14].

Der er tre komponenter i eksponering for smitsomme sygdomme - intensitet, hyppighed og varighed. Generelt har mere intense, hyppigere og / eller længerevarende eksponeringer potentialet til at forårsage virus smitte. Det er en hensigt, at rumluftrenser kan have fordel af alle disse tre komponenter.

For at en indendørsluft filter kan være effektiv til at fjerne vira fra luften, skal den være i stand til at fjerne små luftbårne partikler som kan have vira på (i størrelsesområdet ned til 0,1-1 µm). Partikler af sådan størrelse kan effektivt filtreres af et HEPA-filter og er ULPA-filter (Ultra-Low Particulate Air). Dvs. SARS-CoV-2 virus partikel kan filtreres effektivt, ved kontakt med et HEPA- eller ULPA-filter luftfilter [18].

Luftcirkulation filterenheder med HEPA-filtre kan øge filtrering samt behov for luftskifte i rum. De kan være specielt effektivt ved hybridventilation hvor filtrering af udeluften er minimeret (pga. åbent vinduer eller lign). Rumluftrensere med HEPA-filtre effektivitet kan anvendes indendørs for forbedring af indendørs luftfiltrering dog rumluftrensning ikke har så en stor effekt i nærfeltet hvor social distance eller fysisk afskærm er stadig vigtigt. Effektivitet af rumluftrensere med HEPA-filtre effektivitet kan øges hvis aerosoler med vira genereret fra personer kan fanges direkte fra luftrenser før modtaget af anden person (dvs. punktudsugning tæt på kilden).

Luftstrømmen gennem rumluftrensere med HEPA-filtre effektivitet skal være så stor som muligt. En rumluftrenser må ikke befinde sig i en stillestående zone; en luftrenser placeret i midten af rummet filtrerer større del af rumluften på grund af luftcirkulationen, der passerer den. Eventuelt kan rumluftrenser placeres tæt på vejtrækningszonen, men dette kræver en luftrenser pr. person [19].

En simplificeret beregning viser at supplerende rumluftrenser kan reducere op til ca. 79% af forventet partikelniveau ($\geq 0.1 \mu\text{m}$) genereret af mennesker i rum med rumvolumen af 50 m³ sammenlignet med forventet partikelniveau ($\geq 0.1 \mu\text{m}$) i rum uden rumluftrenser ved sammenlagt rumluftskifte på 6 g/t. Det skyldes at partikler genereres også indendørs og derfor kan ikke filtreres med de filtre som er placeret i hoved ventilationsaggregat (hvis der er ingen recirkulation med filtrering i hoved ventilationsaggregat, ekstra luftskifter eller åbning af vinduer). Tilsvarende genereres vira primært fra mennesker indendørs og derfor kan rumluftrenser være effektiv mod vira hvis vira filtreres effektivt.

Brug af luftrensere giver mulighed for at vende et rum i et miljø med under/overtryk ift tilstødende rum, hvilket tillader fx felthospitaler, midlertidige plejehenheder, plejehjem eller lign til at opretholde sikkerheden for patienter og personale. Sådant princip kan også bruges for forhindring af smitten på kontor, skoler, mm. For at forhindre udslip af forurenede partikler fra et rum, der skal etableres undertryk. Rum med positivt tryk anvendes til applikationer, hvor rummet skal forblive rent og vil ikke være forurenede med forurenede luft.

Central Enhed for Infektionshygiejne (CEI) bemærker at hverken ECDC, CDC eller WHO har anbefalinger for brug af luftrensere. CEI er ikke bekendt med studier, som viser, at anvendelse af luftrensere som smitteforebyggende tiltag skulle have dokumenteret klinisk effekt over for smitte med COVID-19. Og derfor anbefaler CEI ikke luftrensere til rutinemæssig brug i sundhedssektoren. Luftrensere vil kunne overvejes anvendt i specifikke situationer, når anden ventilation eller udluftning ikke er mulig uden at gå på kompromis med indeklimaet (temperatur eller luftfugtighed) [20].

Fordelingen af infektiøse aerosoler i rumluften afhænger af menneskers position, luftændringshastighed, typen af luftfordelingssystem som f.eks. blanding, fortrængnings eller personlig ventilation og andre luftstrømme i rummet. Tæt kontakt med en person som genererer infektiøse aerosoler inden for den første 1,5 meter, resulterer i høj eksponering for både dråber og aerosoler, og i en sådan nærhed er luftfiltrering (gennem bygningers ventilationsanlæg og uden kildekontrol) ikke muligt og effektiv.

CADR, Clean Air Delivery Rate [21] er en måling, der blev udviklet i US som en måde at måle ydeevnen på luftrensere. ANSI/AHAM AC-1 performance metode [22] tester luftrenser med røg (partikler 0.09-1.0 µm),

støv (0.5-3.0 µm), og pollenpartikler (0.5-11 µm). Fordelen ved CADR-klassificering er, at det giver forbrugeren en måde at sammenligne luftrensere, der overvejer både luftgennemstrømning og filtereffektivitet. CADR er grundlæggende en refleksion af luftstrømmen (m³/h, l/s) gange luftfilterets effektivitet. Så hvis et luftfilter har 200 m³/h og 100% effektivitet, ville CADR være 200. Hvis luftfilteret har 200 m³/h og 75% effektivitet, ville CADR være 150. Bemærk at CADR måles med luftrenser kørt på den højeste blæserhastighed. Hvis man bruger luftrenseren på en lavere blæserhastighed, vil den CADR være lavere. CADR er testet med et nyt, rent filter, så det ikke afspejler luftrenserens ydeevne over tid. CADR vurderer ikke støjniveauet. Jf. DS 447:2013 [23] bestemmes Clean Air Delivery Rate som:

$$\text{CADR} = \epsilon_{\text{PAQ}} * Q_{\text{AP}} * (3.6/V), [\text{h}^{-1}]$$

Hvor

ϵ_{PAQ} er luftrensningseffektivitet for oplevet luftkvalitet

Q_{AP} er luftstrømmen gennem luftrenseren i l/s

V er volumen af rummet, m³

Ved eventuel anvendelse af luftrensere, som skaber luftstrømme, er det desuden vigtigt nøje at overveje placering af apparatet, så man minimerer risiko for at luftstrømmene kan bidrage til smittespredning i rummet [20].

1.1.4 Mundbind som filter

Mundbind kan være et supplement til forebyggelse af smitte, når det bruges korrekt og sammen med øvrige smitteforebyggende anbefalinger. En mundbind blokerer ikke helt vira. Mundbind hjælper med at filtrere nogle af de udåndede partikler (og vira). Dette reducerer koncentrationen af udåndede partikler (og vira) i en rum og dermed risikoen for infektion.

Medicinsk (kirurgiske) mundbind bruges som en fysisk barriere for at beskytte brugeren mod farer som store dråber eller krop væsker. Medicinsk mundbind beskytter også andre mennesker mod infektion fra den person, der bærer den kirurgiske maske. Medicinsk mundbind er ikke designet eller certificeret for at forhindre indånding af små luftbårne forurenende stoffer.

Medicinsk mundbind type I, II og IIR efter EN 14683 [24] og Level 1-3 efter ASTM F2100 [25] er beregnet til at bruges normalt til at forhindre overførsel af sygdom fra en sundhedspersonale til en patient. Ofte er de afhængige af sundhedspersonale for deres egen beskyttelse.

Forkert brug kan medføre, at mundbindet ikke vil have en effekt, og det kan være en smitterisiko i sig selv. Sanchez (2010) [26] rapporterer, at filtreringseffektiviteten for 0.5 µm partikler varierede fra 3% til 43% for de uforseglede medicinske mundbind og 42% til 51% for de forseglede. For 1.0 µm partikler, var effektiviteten 58% til 75% for uforseglet og 71% til 84% for forseglede masker. For 2.0 µm var effektiviteten 58% til 79% for uforseglede masker og 69% til 85% for forseglede masker.

Åndedrætsværn er designet til at reducere en arbejdstagers eksponering for luftbårne forurenende stoffer. Åndedrætsværn fanger typisk > 90% af virusstørrelsespartikler (>0.3µm). Sanchez (2010)

bemærker at filtermediet til medicinsk mundbind med en meget høj (> 95%) PFE kan være under 70% effektivitet under NIOSH-metoder brugt til certificering af åndedrætsværn [26].

2. Dekontaminering

2.1 UVGI

Ultraviolet (UV) desinfektionsteknologi har eksisteret i mange år. Stråling i UVC-området på 250-280 nm deaktiverer bakterier, vira og andre mikrober ved at angribe deres DNA. UVC-lys er i stand til at trænge ind i cellerne i mikroorganismer og forstyrre strukturen af DNA-molekylerne [27].

UV-C-delen af UV-spektret har den højeste energi. Selvom det er muligt at beskadige nogle mikroorganismer og vira med det meste af det ultraviolette strålingsspektrum, er UV-C den mest effektive, og derfor bruges UV-C oftest som bakteriedræbende UV-stråling. Den strålingsdosis per areal, der kræves for at opnå 90% de-aktivering af et inficeret materiale (i luft eller på en overflade) afhænger af miljøforholdene (såsom relativ fugtighed) og typen af det inficerede materiale. Det spænder typisk mellem 20 J/m² og 200 J/m² (1 J/m²=0.1 µJ/cm²=1µW*s/cm²) for kviksløvlamper, der overvejende udsender stråling ved 254 nm [28].

UV-dosis, der kræves til en bestemt desinfektionsgrad, kaldes en "log-reduktion" (dvs. logaritmisk reduktion). Logreduktion er relateret til procentdelen af mikroorganismer som er fysisk fjernet eller inaktiveret ved en given proces. For eksempel vil en 1 log betyde at patogener er reduceret med 90% fra niveauet før UV-desinfektion, log reduktion 2-reduceret med 99%, log reduktion 3- reduceret med 99.9%. UV-dosis-respons-forholdet bestemmer, hvor stor en andel af en bestemt mikroorganisme er ødelagt efter en bestemt dosis UV-stråling.

UVGI (Ultraviolet germicidal irradiation) eller UV bakteriedræbende bestråling vist sig at være effektiv til at desinficere overflader, der er kontamineret med ebola-virussen, og influenza. Desuden anbefales af WHO, UV-stråling i den øvre del af rum som et middel til forebyggelse og bekæmpelse af tuberkuloseinfektion [28]. UV-C har vist sig at opnå et højt niveau af inaktivering af SARS-CoV-1, testet med en passende dosis på 254 nm UV mens den er suspenderet i væske [29].

På trods af igangværende forskning er der imidlertid på nuværende tidspunkt få data om effektiviteten af bakteriedræbende UV-stråling over for SARS-CoV-2. Crystal IS og Boston University's National Emerging Infectious Diseases Laboratories (NEIDL) har udført forskning, der demonstrerer effekten af UVC LED'er til at inaktivere SARS-CoV-2 (bestråle en overflade, der indeholder SARS-CoV-2) [30].

Inagaki et al. (2020) [31] har udført undersøgelse som viser, at bestråling med en dyb ultraviolet lysemitterende diode (DUV-LED) på 280 ± 5 nm bølgelængde hurtigt inaktiverer SARS-CoV-2 opnået fra en COVID-19-patient. Til evaluering af DUV-LED inaktivering, var en del af virusstam (150 µl) anbragt i midten af en 60 mm petriskål og bestrålet med 3,75 µW/cm² i arbejdsafstand 20 mm i et række gange (n = 3 hver gang i 1, 10, 20, 30, eller 60 s, og hver dosis svarer til 3.75, 37.5, 75, 112.5 eller 225 µJ/cm²). Udvikling af enheder med DUV-LED forventes at forhindre virusinvasion gennem luften og efter berøring forurenede genstande.

Bianco et al. 2020 [32] rapporterer at UV-C-stråling forhindrer SARS-CoV-2, og responsen er afhængigt af både UV-C-dosis og viruskoncentration. For lavt vira niveau som på hospital værelse af 0.05 MOI (MOI- multiplicity of infection: antal virioner, der tilføjes pr. celle under infektion) og spyt af COVID-19-inficerede patienter (5 MOI), en dosis på 4 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$ var nok til at opnå fuld inaktivering af virussen. Selv ved den højeste virale inputkoncentration ved syge COVID-19 patienter (1000 MOI) var viral replikation totalt inaktiveret ved en dosis > 16,9 $\mu\text{J}/\text{cm}^2$.

Rapporteret studier viser at UV-stråling kan således effektivt inaktivere vira, med det er i øjeblikket uklart, om resultaterne kan overføres til luftbårne vira.

Luftdesinfektion med UVGI opnås ved hjælp af flere metoder: bestråling af luften i det øvre rum, bestråling af hele rummet (når rummet ikke er optaget eller beskyttelsestøj er brugt) og bestrålende luft, når den passerer gennem lukkede luftcirkulations- og ventilationsanlæg. UVGI bruges også i selvstændige rumluftdesinfektionsenheder [33].

UVGI, placeret i øverste del af rummet er en af to primære anvendelser af UVGI-luftdesinfektion [33]. UVGI i øverste rum bruger vægmonterede og loftsophængte, UVGI-armaturer til at begrænse den bakteriedræbende stråling til hele rumområdet over folks hoveder og minimerer i høj grad eksponeringen personer i rummet. Anordninger til UV-C-eksponering kan enten placeres i et specifikt sted i et rum i et givet tidsrum, eller de kan være robot-anordninger, der bevæger sig rundt i rummet for at minimere skyggeeffekter.

UVGI i kanaler eller aggregater er den anden primære anvendelse af UVGI-luftdesinfektion. Designet til at desinficere luft, når den passerer gennem HVAC-systemet, og inden den recirkuleres eller er opbrugt, bestråler UVGI i kanalen hele tværsnittet af en kanal ved høje intensiteter, der ikke er tilgængelige for personer. Effektiv desinfektion af rumluften afhænger af cirkulering af maksimal rumluft gennem kanalen og den hastighed, hvormed den cirkuleres. Det krævede gennemsnitlig bestråling for et typisk kanalsystem er i størrelsesordenen 1000 til 10.000 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$, men det kan være højere eller lavere afhængigt af applikationen. Fordi de typisk er installeret i luftbehandlingsenheder, UVGI-systemer i kanaler eller aggregater designs til en luft hastighed på omkring 2,5 m/s. På denne hastighed, en strålingszone på 2,5 m i længden opnår en 1 s eksponering. Som en tommelfingerregel skal UVGI-systemer installeres som de kan give mindst 0,25 s UV-eksponering ellers systemomkostninger og strømforbrug vil være for store [34].

UVC bør ikke anvendes til og er ikke beregnet til direkte menneskelig desinfektion. UV-stråling er en kendt årsag bl.a. til hudkræft og øjenskader, samt det kan påvirke immunsystemet. Da UV-stråling hverken kan ses eller mærkes, er det vigtigt, at arbejdstagere, der har potentialet til at blive udsat for intense niveauer af UV-stråling, er opmærksomme på risiciene. Alle desinfektionsrum for UV-lys skal mærkes korrekt og holdes låst for at undgå enhver risiko for eksponering for personale og patienter.

CIE og WHO advarer mod brug af UV-desinfektionslamper til at desinficere hænder eller ethvert andet hudområde (WHO, 2020) [35], medmindre det er klinisk berettiget. UV-C kan være meget farligt for mennesker og dyr og kan derfor kun bruges i korrekt konstruerede produkter, der opfylder sikkerhedsbestemmelserne, eller under meget kontrollerede omstændigheder, hvor sikkerhed tages i betragtning som den første prioritet, hvilket sikrer, at eksponeringsgrænserne som specificeret i ICNIRP (2004) [36] og IEC/CIE (2006) [37] ikke overskrides [28]. Metoder specificeret i standards som bl.a. DS/ISO 15714 (2019) [38], ASHRAE 185.1 (2020) [39] og ASHRAE 185.2 (2020) [42] kan de videre bruges til evaluering af UV-dosering for luftbårne mikroorganismer i kanaler eller ventilationssystemer.

2.2 Øvrige dekontamineringsmetoder

Dekontaminering med ozon

Nogle produkter, der sælges som luftrensere, genererer med vilje ozon. Disse produkter skal ikke bruges, når folk er til stede, fordi ozon kan irritere luftvejene [40]. Jf. EPA skal ozongeneratorer ikke bruges i rum hvor der er mennesker. Når det anvendes i koncentrationer, der ikke overstiger folkesundhedsstandarderne, er ozon ikke effektivt mod vira, bakterier, skimmelsvamp eller andre biologiske forurenende stoffer [21].

Ozon, kan produceres indirekte af iongeneratorer. Iongeneratorer adskiller sig fra ozongeneratorer. Ionisation er teknologi hvor en højspænding er påført på de ioniserende ledninger til dannelsen af et stærkt elektrisk felt. Elektroner i forurenede luft skubbes med høj hastighed fra det negative ladet elektrisk felt til positivt ladet elektrisk felt [42]. Mål med ionisering er at skabe større partikler, som kan opsamles.

Jf. TFL [40] er iongenerator ikke egnede til viruskontrol, da de er baseret på frigivelse af ioner i luften. Ioner binder i partikler, i dette tilfælde virussen, og som et resultat bliver vira ladet. De ladede vira kan fæstne sig til overflader som vægge, gulve og møbler. Jf. EPA [43] iongeneratorer kan fjerne små partikler (fx dem i tobaksrøg) fra den indendørs luft, men kan de ikke fjerne gasser eller lugt og kan være relativt ineffektive til at fjerne store partikler såsom pollen og husstøvallergener.

Elektrofilter adskiller sig fra iongenerator. Begge to oplader luften. Elektrofilter suger luft, oplader den, opsamler forureningen og frigiver ren luft. Iongenerator oplader partikler men ikke opsamler forureningen, så partiklerne klæber simpelthen til alle overflader i rum. Dvs. partiklerne er muligvis ikke i luften, men de er stadigvæk i rummet.

PCO (Photocatalytic oxidation) er andet luftrensnings teknologi. PCO består af et metaloxid halvledermateriale. Fotokatalysatoren genererer iltarter, der forbliver overfladebundet, når de udsættes for UV-lys. Oxygenarterne er meget stærke reaktive med adsorberede gasser og biologiske partikler. Mulige biprodukter dannet af ufuldstændig oxidering [44].

Varmebehandling af virus

Varme kan inaktivere vira ved at denaturere proteins sekundære strukturer og kan derved ændre formning af virion-proteiner, der er involveret i binding og replikation inden i en værtscelle [45].

Chan et al [46] rapporterer at SARS tørrede virus på glatte overflader bevarede sin levedygtighed i over 5 dage ved temperaturer på 22-25 ° C og relativ luftfugtighed på 40–50%. Viruslevedygtighed blev dog hurtigt reduceret (> 3 log₁₀) ved højere temperaturer og højere relativ luftfugtighed (f.eks. 38 ° C og relativ luftfugtighed på > 95%).

Darnell et al. [45] har inkuberet 320 µl prøve af virus i 1,5 ml polypropylenryrør ved hjælp af en varmeklok for at opnå tre forskellige temperaturer (56, 65 og 75 ° C). Resultaterne viser at SARS-CoV virus var fuldstændigt inaktiveret ved 75 ° C i 45 minutter men ikke ved 56 og 65 ° C i 60 minutter.

Baseret på data fra studier om SARS-CoV og Canine coronavirus har Abraham et al [47] estimeret følgende minimum temperatur/tid for at dræbe COVID-19:

- 3 minutter ved temperatur over 75 ° C

- 5 minutter ved temperatur over 65 °C
- 20 minutter ved temperatur over 60 °C

Kemiske behandling af virus

Kemiske substanser som brintoverilte (hydrogenperoxid, H₂O₂), formalin, glutaraldehyde kan også bruges ved dekontaminering af forskellige vira, specielt ved desinfektion af viruskontaminerede overflader.

Darnell et al. [45] viser i deres studie at ved 25 og 37 ° C inaktiverede formalin det meste af virussen SARS-CoV, tæt på detektionsgrænsen for analysen, efter 1 dag, men alligevel forblev en del virus stadig infektiøs på dag 3. Imidlertid inaktiverede glutaraldehyd virussen fuldstændigt efter dag 2 ved 25 ° C og dag 1 ved 37 ° C.

Studie af Goyal et al. [48] om hydrogenperoxid, viser at hydrogenperoxid (HPV) kan inaktivere (> 4-log reduktion) feline calicivirus (FCV, a norovirus surrogate), adenovirus, transmissible gastroenteritis coronavirus of pigs (TGEV, a severe acute respiratory syndrome coronavirus [SARS-CoV] surrogate) og fugleinfluenza virus (AIV) tørret på overflader ved det laveste fordampede volumen af HPV testet (25 ml). Fischer et al. [49] konkluderer at fordampet hydrogenperoxid (VHP) kan bruges til hurtig inaktivering af SARS-CoV-2 på N95 respirator under deres eksperimentelle forhold. THL rapporterer at undersøgelser viser, at hydrogenperoxiddamp er effektiv mod mange vira, herunder norovirus, adenovirus, influenzavirus og coronavirus. Effektiviteten af hydrogenperoxid afhænger imidlertid af sådanne faktorer som koncentration, kontakttid, temperatur, fugtighed og det materiale, der skal dekontamineres. Da effektiviteten af hydrogenperoxid i forskellige materialer og mod forskellige mikrober varierer, er det vigtigt at validere den valgte hydrogenperoxidmetode [40].

3. Konklusion

Vira i bygningen kommer mest sandsynligt indefra end udefra, selvom der er tegn på, at vira kan overføres f.eks. med vinde. Når de anvendes korrekt, kan filtre i ventilationssystemet og luftrensere med HEPA-filtre hjælpe med at reducere luftbårne forurenende stoffer, herunder vira i en bygning eller et rum eller/og forhindrer bevægelse af inficerede aerosoler i den tilstødende lokaler. I sig selv er luftrensning, dekontaminering eller filtrering ikke nok til at beskytte folk mod eksponering for vira som den virus, der forårsager COVID-19. En inficeret person vil altid forurene luften, hvis der ikke anvendes effektiv kildekontrol. Når det anvendes sammen med andre bedste fremgangsmåder, der anbefales af myndighederne, kan filtrering være en del af en plan for at reducere chancen for luftbåret transmission af infektiøse vira som SARS-CoV-2 indendørs.

4. Litteratur

1. Asadi, S., Wexler, A., Cappa, C., Barreda, S., Bouvier, N., Ristenpart, W., Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness, 2019, Article number: 2348, <https://www.nature.com/articles/s41598-019-38808-z>
2. Cuffari, B, 2020, The Size of SARS-CoV-2 Compared to Other Things, <https://www.news-medical.net/health/The-Size-of-SARS-CoV-2-Compared-to-Other-Things.aspx>
3. Gesellschaft für Aerosolforschung e. V., 2020, Position paper of the Gesellschaft für Aerosolforschung on understanding the role of aerosol particles in SARS-CoV-2 infection, <https://www.info.gaef.de/positionspapier>

4. Alsved, M., Matamis, A., Bohlin, R., Richter, M., Bengtsson, P.-E., Fraenkel, C.-J., Medstrand P., Löndahl, J. ,2020, Exhaled respiratory particles during singing and talking, *Aerosol Science and Technology*, 54:11, 1245-1248,
<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/02786826.2020.1812502?needAccess=true>
5. Somsen, G., Rijn, C., Kooij, S., Bem, R., Bonn, B., 2020, Small droplet aerosols in poorly ventilated spaces and SARS-CoV-2 transmission, *The Lancet, Respiratory Medicine*, Published Online May 27, 2020, [https://doi.org/10.1016/S2213-2600\(20\)30245-9](https://doi.org/10.1016/S2213-2600(20)30245-9),
[https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600\(20\)30245-9/fulltext](https://www.thelancet.com/journals/lanres/article/PIIS2213-2600(20)30245-9/fulltext)
6. Evans. M, Avoiding COVID-19: Aerosol Guidelines, 2020, Medrxiv,
<https://doi.org/10.1101/2020.05.21.20108894>,
<https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.05.21.20108894v3>
7. NAFA, HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases, 2013, http://built-envi.com/publications/nafa_iit_wellsriley%20-%20FINAL.pdf
8. Lau, B. How Air Pollution Contributes to the Spread of COVID-19, 2020, <https://earth.org/air-pollution-exacerbating-the-spread-of-covid-19/>
9. Conticini, E., Frediani, B., Caro, D., Can atmospheric pollution be considered a co-factor in extremely high level of SARS-CoV-2 lethality in Northern Italy?, 2020, *Environmental Pollution*, Volume 261, June 2020, 114465,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0269749120320601?via%3Dihub>
10. Narain, U., Air Pollution: Locked Down by COVID-19 but Not Arrested, 2020,
<https://www.worldbank.org/en/news/immersive-story/2020/07/01/air-pollution-locked-down-by-covid-19-but-not-arrested>
11. How can you catch diseases through the air?, 2020, <https://www.initial.com/au/how-you-catch-diseases-through-air/>
12. Bonomaully, J., Knap, H., Johnson, M., Reducing-Airborne-Exposure-of-COVID-19-Using-Air-Filtration-Systems , 2020, https://airlabs.com/wp-content/uploads/2020/04/Reducing-Airborne-Exposure-of-COVID-19-Using-Air-Filtration-Systems_WhitePaper_20200409_FINAL.pdf
13. REHVA COVID-19 guidance document, November 17, 2020, [REHVA COVID-19 guidance document V4 23112020 V2.pdf](#)
14. ECDC, Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19 , 2020,
<https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Ventilation-in-the-context-of-COVID-19.pdf>
15. Lee, B., Minimum Sizes of Respiratory Particles Carrying SARS-CoV-2 and the Possibility of Aerosol Generation, *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2020, 17(19), 6960; <https://doi.org/10.3390/ijerph17196960>, https://www.mdpi.com/1660-4601/17/19/6960?type=check_update&version=1
16. Condaair Group AG, Low humidity and its effects on airborne infection,
<https://www.condairgroup.com/humidity-health-wellbeing/dry-air-and-airborne-infection>
17. ASHRAE Position Document on Infectious Aerosols, 2020,
https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/pd_infectiousaerosols_2020.pdf
18. Elias, B., Bar-Yam, Y., Could Air Filtration Reduce COVID-19 Severity and Spread?, 2020,
<https://static1.squarespace.com/static/5b68a4e4a2772c2a206180a1/t/5e67a58357b4e0440343e1fa/1583850883797/SpeculationOnAirFilters.pdf>

19. Building Engineering Services Association, BESA, COVID-19 - PRACTICAL MEASURES FOR BUILDING SERVICES OPERATION, <https://www.thebesa.com/media/837805/besa-guidance-covid-19-practical-measures-for-building-services-operation.pdf>
20. CEI, Vurdering af brug af luftrensere i sundhedssektoren i forbindelse med COVID-19, 2020, <https://us6.campaign-archive.com/?u=1e594c00ace1e260cd560ef48&id=d44385032a>
21. AHAM, Air Filtration Standards, <https://ahamverifide.org/ahams-air-filtration-standards/>
22. ANSI/AHAM AC-1-2006, Method for Measuring the Performance of Portable Household Electric Room Air Cleaners, <https://ahamverifide.org/wp-content/uploads/2019/07/Scope-of-Air-Cleaner-Certification.pdf>
23. DS 447, Ventilation i bygninger - Mekaniske, naturlige og hybride ventilationssystemer, 2013, <https://webshop.ds.dk/da-dk/standard/ds-4472013>
24. DS/EN 14683:2019+AC:2019, Operationsmasker – Krav og testmetoder, 2019, <https://webshop.ds.dk/da-dk/standard/ds-en-146832019-ac2019>
25. ASTM F2100 – 11, Standard Specification for Performance of Materials Used in Medical Face, 2011, <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/F2100-11.htm>
26. Sanchez, Filtration Efficiency of Surgical Masks, 2010, University of South Florida, <https://scholarcommons.usf.edu/etd/1760/>.
27. UVC LEDs for Disinfection, 2018, Crystal IS, UVC-LEDs-for-Disinfection---Application-Note---AN002.pdf
28. CIE, CIE holdningserklæring om ultraviolett (UV) stråling til håndtering af risiko for COVID-19 smittespredning, 2020, <https://orbit.dtu.dk/en/publications/cie-holdningserkl%C3%A6ring-om-ultraviolett-uv-str%C3%A5ling-til-h%C3%A5ndtering>
29. Kariwa, H., Fujii, N., Takashima, I., Inactivation of SARS coronavirus by means of povidone-iodine, physical conditions and chemical reagents (2006), Dermatology, <https://doi.org/10.1159/000089211>
30. Crystal IS and Boston University Research Demonstrates Klaran UVC LEDs' Effective Wavelength for Inactivating SARS-CoV-2, Businesswire, 2020, <https://www.businesswire.com/news/home/20200928005673/en/Crystal-IS-and-Boston-University-Research-Demonstrates-Klaran-UVC-LEDs%E2%80%99-Effective-Wavelength-for-Inactivating-SARS-CoV-2>.
31. Inagaki, H., Saito, A., Sugiyama, H., Okabayashi, T., Fujimoto, S., Rapid inactivation of SARS-CoV-2 with deep-UV LED irradiation, 2020, Emerging Microbes & Infections, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/22221751.2020.1796529?needAccess=true>
32. Bianco, A., Biasin, M., Pareschi, G., Cavalieri, A., Cavatorta, C., Fenizia, C., Galli, P., Lessio, L., Lualdi, M., Redaelli, E., Saulle, I., Trabattoni, D., Zanutta, A., Clerici, M., UV-C irradiation is highly effective in inactivating and inhibiting SARS-CoV-2 replication, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.06.05.20123463v2.full.pdf>
33. Reed, N., The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection, Public Health Rep. 2010 Jan-Feb; 125(1): 15–27, doi: 10.1177/003335491012500105, <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2789813/>
34. ASHRAE, Handbook, HVAC Applications, 2019, <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook>
35. WHO, Coronavirus disease (COVID-19) advice for the public: Mythbusters, 2020, <https://www.who.int/emergencies/diseases/novel-coronavirus-2019/advice-forpublic/mythbusters>.

36. ICNIRP, ICNIRP Guidelines – On limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation), Health Physics 87(2):171-186; 2004. Available at <http://www.icnirp.org>
37. IEC/CIE, IEC 62471:2006/CIE S 009:2002 Photobiological safety of lamps and lamp systems / Sécurité photobiologique des lampes et des appareils utilisant des lampes. (bilingual edition)
38. ISO 15714, Method of evaluating the UV dose to airborne microorganisms transiting in-duct ultraviolet germicidal irradiation devices, 2019, ISO, <https://www.iso.org/standard/67814.html>
39. ASHRAE 185.1, Method of Testing UV-C Lights for Use in Air-Handling Units or Air Ducts to Inactivate Airborne Microorganisms, 2020, <https://www.ashrae.org/technical-resources/standards-and-guidelines/read-only-versions-of-ashrae-standards>
40. Coronavirus and safety of indoor air, THL, 2020, <https://thl.fi/en/web/environmental-health/indoor-air/coronavirus-and-safety-of-indoor-air>
41. EPA, Air Cleaners, HVAC Filters, and Coronavirus (COVID-19), 2020, <https://www.epa.gov/coronavirus/air-cleaners-hvac-filters-and-coronavirus-covid-19>
42. PerfectAir, MAP, Newsletter- MAY 2020, 2020, <http://perfectair.in/MAPS%20May%20newsletter%202020%20-%20By%20Perfect%20Air.pdf>
43. EPA, What are ionizers and other ozone generating air cleaners?, 2020, <https://www.epa.gov/indoor-air-quality-iaq/what-are-ionizers-and-other-ozone-generating-air-cleaners>
44. ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning, 2018, <https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/filtration-and-air-cleaning-pd.pdf>
45. Darnell, M., Kanta Subbarao, K., Feinstone, S., Taylora, D., . Inactivation of the coronavirus that induces severe acute respiratory syndrome, SARS-CoV, 2004, J Virol Methods. 2004 Oct; 121(1): 85–91.doi: 10.1016/j.jviromet.2004.06.006, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016609340400179X#fig2>).
46. Chan, K., Malik Peiris, J., Lam, S., Poon, L., Yuen, K., Seto, W., 2011, The Effects of Temperature and Relative Humidity on the Viability of the SARS Coronavirus, Hindawi Publishing Corporation Advances in Virology, Volume 2011, doi:10.1155/2011/734690, [734690.pdf \(hindawi.com\)](https://www.hindawi.com/734690.pdf)
47. Abraham, J., Plourde, B., Cheng, L., 2020, Using heat to kill SARS-CoV-2, Reviews in medical virology, Volume30, Issue5, September 2020, <https://doi.org/10.1002/rmv.2115>, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/rmv.2115>
48. Goyala, S., Chandera, Y., Yezli, S., Otter, J., , Evaluating the virucidal efficacy of hydrogen peroxide vapour, Journal of Hospital Infection, Volume 86, Issue 4, April 2014, Pages 255-259, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0195670114000590>
49. Fischer, R., Morris, D., Doremalen, N., Sarchette, S., Matson, M., Bushmaker, T., Yinda, C., Seifert, S., Gamble, A., Williamson, B., Judson, S., Wit, E., Lloyd-Smith, J., Munster, V., Assessment of N95 respirator decontamination and re-use for SARS-CoV-2, 2020, MedRxiv, <https://doi.org/10.1101/2020.04.11.20062018>, <https://www.medrxiv.org/content/10.1101/2020.04.11.20062018v2.full-text>

VEDLIGEHOLDELSE AF VARME-, VENTILATIONS- OG KLIMAANLÆG, VAND OG AFLØBSSYSTEMER I BYGNINGER VED RISIKO FOR VIRUSOVERFØRSEL SOM CORONA VIRUS (SARS-COV-2) DRAFT RAPPORT

Kiril Naydenov/Rambøll

1. Drift og vedligeholdelse

Korrekt drift og vedligeholdelse af bygningstekniske systemer som varme-, ventilations- og klimaanlæg, vand- og afløbssystemer betragtes som effektive kontrolstrategier til forebyggelse af arbejdspladsinfektioner og dårligt helbred [1]. Regelmæssig inspektion og vedligeholdelse af bygningstekniske systemer kan forlænge levetiden for anlæg og forhindre et dårligt fungerende system, perioder med nedlukning eller komplet udskiftning af anlægget.

De vigtigste fordele ved regelmæssig vedligeholdelse er:

- Optimal ydelse
- Længere systemlevetid
- Reducerer behovet for dyre nødreparationer
- Opretholdelse af design effektivitet

Den nuværende Bygningsreglement (BR18) [2] har en speciel fokus på korrekt drift og vedligeholdelse af varme-, ventilations- og klimaanlæg, vand- og afløbssystemer. Baseret på BR18 [3], drift og vedligehold af installationer til:

- ventilation
- varme- og køleanlæg
- vand
- afløbssystemet
- energiforsyning

skal ske, så de til enhver tid overholder de for anlægget relevante bestemmelser skrevet i BR18. Det betyder, at de systemer skal vedligeholdes, driftes og rengøres, så anlæggene til enhver tid overholder bygningsreglementets krav.

Foranstaltninger til korrekt drift og vedligeholdelse af bygningstekniske systemer og forebyggelse af transmission af patogener under deres arbejde, er afhængig af typen af patogener og systemforhold. Det er for ambitiøst at oprette en retningslinje, der dækker alle slags patogener (virus, bakterier osv.). Patogener er forskellige i størrelse, styrke og transmission. Alligevel anbefales fremgangsmåde som den nedenfor specificerede, når man beskæftiger sig med potentielle patogener under drift og vedligeholdelse af varme, ventilations- og klimaanlæg, vand og afløbssystemer.

2. Vedligeholdelse i forbindelse med risiko fra virusoverførsel

I 2007 offentliggjorde Department of Health, UK et dokument om operationel styring og effektivitetsverifikation [4] for sundhedslokaler, der kan anvendes i forbindelse med drift og vedligeholdelse under situationer som COVID-19-pandemi. Jf. dokumentet er det ledelsesansvar for at definere hvem er

ansvarlig for sikker drift og vedligeholdelse af systemerne. En regelmæssig gennemgang af ledelsessystemer bør finde sted for at sikre, at de aftalte standarder opretholdes. Dem, der kræves for at inspicere, verificere eller vedligeholde varme-, ventilations- og klimaanlæg, vand og afløbssystemer, skal vise, at de er kompetente til at gøre det. Som et minimum skal de have tilstrækkelig viden om dens korrekte funktion til at kunne genkende fejl.

Arbejdstilsynet [5] erklærede, at arbejdsgiver har ansvar ved løbende ved kortlægge, om der er risiko for, at de ansatte kan blive udsat for smitte (fx med SARS-CoV-2 virus). Hvis det er tilfældet, skal du iværksætte foranstaltninger, der forebygger smitterisikoen så effektivt som mulig, herunder fx gennem tilrettelæggelse af arbejdet, og følge Sundhedsstyrelsens generelle anbefalinger om at mindske smitten.

Ifølge ECDC skal bygningsadministratorer vedligeholde varme-, ventilations- og klimaanlæg i overensstemmelse med producentens nuværende instruktioner, især i forbindelse med rengøring og udskiftning af filtre. Der er ingen fordel eller behov for yderligere vedligeholdelsescykler i forbindelse med SARS-CoV-2 virus spredning [6].

REHVA har postuleret, at varme-, ventilations- og klimaanlæg vedligeholdelsespersonale kan være i fare (ifm. COVID-19 sygdom), når der udføres planlagt vedligeholdelse, inspektion eller udskiftning af nogle HVAC-komponenter (som filtre), hvis standard sikkerhedsprocedurer ikke følges [7].

Det UK's Building Engineering Services Association [8] bemærker, at alle arbejder skal udføres med fælles beskyttelsesforanstaltninger, herunder åndedrætsværn. Vedligeholdelsespersonalet skal følge standard sikkerhedsprocedurer for støvet arbejde, herunder brug af handsker og åndedrætsværn.

3. Vedligeholdelsespraksis og risikostyring

Traditionel (planlagt) forebyggende vedligeholdelsespraksis kan ofte ikke identificere mekaniske fejl, der kunne have været opdaget. Et ikke-planlagt svigt af bygningssystemer, kan medføre risiko både for udstyr og dem der bruger bygningen. Det videre kan resultere i reparationer, der kan være dyrere end planlagte reparationer.

ISPE Good Practice Guide til HVAC-systemer [9] foreslog implementering af en forudsigende vedligeholdelse. Forudsigende vedligeholdelse omfatter en række teknologier til at opdage nedbrydning af udstyrets ydeevne på et tidligt tidspunkt, før det kan blive et problem. Dette giver vedligeholdelsespersonale mulighed for at bestille dele, planlægge arbejdskraft og planlægge flere reparationer (under en planlagt nedlukning). Målet med forudsigende vedligeholdelse er at proaktivt rette problemer, inden der opstår en væsentlig forringelse.

Udstyrets fysiske udseende og dets omgivelser afspejler kvaliteten af den vedligeholdelse, der udføres på udstyret. Brugte materialer, ekstra dele og affald kan give et indtryk af, om der findes en god eller dårlig vedligeholdelsespraksis i bygningen. Vedligeholdelse af HVAC-systemer er vigtig for acceptabelt indeklima. Forurenende stoffer i HVAC-systemer kan tage mange former. Generelt kan almindelige forurenende stoffer omfatte:

- støvpartikler
- aktiv bakterie- eller svampevækst
- snavs fra HVAC-komponenter (rust, bælteudskillelse, fedt)
- løs kanalforing

- skimmelsporer

Periodiske nedture i mekaniske områder kan sikre, at husholdningen opretholdes på et acceptabelt kvalitetsniveau.

For at minimere den negative virkning på grund af uønsket eksponering af vedligeholdelsespersonale for SARS-CoV-2 virus eller andre infektiøse sygdomme er det nødvendigt med en risikovurdering for hvert område på arbejdspladsen. En sådan risikovurdering kan udføres baseret på kontrol-hierarki modellen for at bestemme, hvordan man bedst beskytter arbejdstagere. Denne vurdering involverer alle processer og forhold, der har potentiale til at skade medarbejdere gennem kemiske / støveksposering, farligt maskiner, osv [10].

Workplace Safety & Prevention Services (WSPS) [11] skitserer, at arten af arbejdet for vedligeholdelsesmedarbejdere og vedligeholdelsesmedarbejdere kræver kontakt med kolleger, kunder og leverandører (dvs. inden for 2 meter). Disse interaktioner såvel som behovet for at røre ved arbejdsflader og udstyr kan øge sandsynligheden for, at de kan komme i kontakt med virussen.

Under den nuværende pandemi er det således nødvendigt at kigge efter tilfælde, der kan øge risikoen for, at arbejdstager udsættes for virussen. Arbejdstagereksposeringen vil primært være gennem blandt andre:

- langvarig nærhed til andre arbejdere, der er smittet
- brug af delte værktøjer og berøringsflader
- utilstrækkelig eller dårligt rettet ventilation
- tæt kontakt forbundet med et for stort antal ansatte i fællesområder på én gang.

4. Vedligeholdelses instruktioner, reservedele og træning

Det anbefales, at vedligeholdelse implementeres i henhold til en specificeret metode og et bestemt program. Følgende punkter kan vedtages fra standard DS / EN ISO 14644-4 [12] relateret til renrum:

- definition af sikkerhedsprocedurer inden vedligeholdelse eller reparationer;
- specifikation af vedligeholdelseshandlinger, der skal udføres, når acceptområdet for en kritisk præstationsparameter overskrides;
- aftalt definition af tilladte justeringer;
- metoder til at foretage tilladte justeringer;
- metoder til kontrol og kalibrering af kontrol-, sikkerheds- og overvågningsudstyr;
- krav til kontrol og udskiftning af alle sliddele (f.eks. remme, lejer, filtre);
- specifikation til rengøring af installationen eller komponenterne før, under og efter vedligeholdelsesarbejde;
- definition af handlinger, procedurer og test, der kræves efter vedligeholdelse, er afsluttet;
- medtagelse af brugerspecifikke eller relevante myndighedskrav

"Good-engineering-practice" og økonomien ved at holde bygningen i drift kræver, at reservedele holdes, så effekten af fejl minimeres. Et godt forudsigeligt vedligeholdelsesprogram bør forudsige behovet for at udskifte dele, før de fejler, hvilket giver tid til at bestille reservedele.

Arbejdsgivere har brug for at uddanne arbejdere på mulige vira, bakterier, mm transmission på arbejdspladsen samt hvilke skridt der tages for at beskytte dem, og hvordan de kan beskytte sig selv.

Rutinemæssige inspektions- og vedligeholdelsesprocedurer kan medføre sundhedsrisici for personale, der udfører arbejdet. Alle involverede bør gøres opmærksom på risiciene, og sikre arbejdsystemer bør aftales. Eget sikkerhedsudstyr bør leveres efter behov, og der skal gives træning i brugen af det.

Health Technical Memorandum 03-01 [4] foreslog, at enhver træning, der blev givet, skulle registreres sammen med leveringsdatoen og de emner, der blev dækket. Uddannelse i brugen af sikkerhedsudstyr og et sikkert arbejdsystem skal gentages regelmæssigt for at imødekomme personaleforandringer.

5. Arbejdsskadesager

Jf. Arbejdstilsynets [3] kan en person få anerkendt sygdom med COVID-19 som en arbejdsskade, hvis det kan sandsynliggøres, at sygdomsramte har været udsat for en konkret smitte i forbindelse med arbejdet og efterfølgende er blevet syg, eller hvis vedkommende har været udsat for risiko for smitte over en periode i forbindelse med sit arbejde og efterfølgende er blevet syg. Vejledningen beskriver de nærmere betingelser for, hvornår sygdom med COVID-19 kan anerkendes som en arbejdsskade, herunder om det kan anerkendes som en erhvervssygdom eller en ulykke.

6. Drift og vedligeholdelse af ventilationssystemer

6.1 Generel

Ventilation er anerkendt som en vigtig faktor, der påvirker overførslen af luftbårne sygdomme. Betydningen af ventilation blev også understreget af SARS-udbrud i 2003 og en "superspredende" situation på et hospital i Hong Kong. Undersøgelsen af det største SARS-udbrud i Hong Kong på Prince of Wales Hospital antydede, at et ineffektivt ventilationssystem sandsynligvis forårsagede spredning af virussen [13].

Dårligt designede eller vedligeholdte ventilationssystemer kan øge risikoen for infektioner, der overføres af luftbårne patogener på grund af forkert luftstrøm og dårlig vedligeholdelse af systemet. Strenge standarder for installation og vedligeholdelse af ventilationssystemer er afgørende for at sikre, at de er effektive og bidrager til et sikkert miljø inden for sundhedsvæsenet som helhed [14].

Rutinemæssig inspektion og vedligeholdelse, alt efter hvad der er relevant for systemet, er nødvendigt. anbefalede vedligeholdelsesforanstaltninger for luftbehandlingssystemer er vigtige at følge. Justeringer af ventilation (f.eks. øget udeluft) kan kræve hyppigere inspektioner og filterskift [15].

Jf. [16] er risikoen lav for infektion ved at udføre vedligeholdelse af HVAC-systemet. Imidlertid kan arbejdstagere, der deltager i vedligeholdelse eller udskiftning af filter, ønsker at bære passende personligt beskyttelsesudstyr (PPE), såsom en åndedrætsværn N-95 (hvis tilgængelig), engangshandsker og beskyttelsesbriller / sikkerhedsbriller.

For at være sikker antager man altid, at filtre, udsugningskanaler og varmegenvindingsudstyr kan have aktivt mikrobiologisk materiale, inklusive levedygtige vira. Dette er især vigtigt i enhver bygning, hvor der for nylig har været en infektion [7].

6.2 Filtre

Når filtre belastes med partikler, øges modstanden mod luftstrømmen (højere trykfald) til et punkt, hvor luftstrømmen kan reduceres, og filtrene kan kollapse. Alternativt, når filtre fyldes med materiale, øges deres effektivitet. Ideelt set bør filtre udskiftes baseret på et forudbestemt differenstryk-fald og filteromkostningerne. Dette optimerer de samlede omkostninger for filtrene. Højere energiomkostninger kræver typisk lavere differenstryk for udskiftning. Filtre skal installeres korrekt for at forhindre, at luft omgår dem. Filterproducenter skal være i stand til at give oplysninger for at opnå de laveste samlede omkostninger baseret på driftsforholdene i bygningen [9].

I designfasen antages at filtre og luftrensere generelt er installeret samt de skal fungere korrekt. I faktiske installationer kan der være luft- og forurenings "by-pass" omkring luftrensningsudstyr, forringelse af ydeevnen for nogle teknologier over tid og potentiale for emission af primære og / eller sekundære biprodukter [17].

Generelt skal der antages, at filtre har aktivt mikrobiologisk materiale på sig. Om dette repræsenterer en vigtig risiko for infektionssygdomme fra vira, vides endnu ikke, men man skal være forsigtig. Dette bliver især vigtigt i enhver bygning (herunder bolig), hvor der er kendte eller lignende tilfælde af infektiøs sygdom, herunder COVID-19 [18].

Udenfor luft ses ikke som en højrisikokilde for SARS-CoV-2 virale aerosoler [7,8]. Derfor bør de ændres i overensstemmelse med kravet om standardvedligeholdelsesregime.

Filtre skal udskiftes efter normal procedure, når tryk eller tidsgrænser overskrides eller i henhold til planlagte vedligeholdelsesintervaller [7,8,19]. Tilstoppede filtre er ikke en forureningskilde i denne sammenhæng, men de reducerer tillufts strømmen, hvilket har en negativ indvirkning på evnen til at fjerne og fortynde koncentrationer af forurenende stoffer.

6.3 Kanalsystemer

Periodisk inspektion af ventilationskanaler kan identificere potentielle problemer (snavs, lækager og korrosion), der skal rettes, før uventet fejl og omfattende reparationer er nødvendige. Kanalarbejde kan miste sin tætning over tid og kan være en kilde til lækage, der kan påvirke rumtrykket. Kanal, der er knust, fører til utilstrækkelig luftstrøm, øget støj og dårlig luftstrømskontrol. Beskadiget eller mistet kanalisolering bør hurtigt udskiftes for ikke at medføre kondens, overfladerustning og skimmelsvamp vækst [8].

Ifølge CIBSE [20] og BESA [8] reducerer kanalrengøring ikke risikoen for infektion i bygninger, da eventuelle viruspartikler indkapslet i aerosoler, der sætter sig i kanalarbejde, bliver ikke levedygtige over tid, i modsætning til andre patogener såsom bakterier og svampe, som kan fortsætte med at formere sig i sådanne miljøer, kræver vira en værtscelle til replikation. Derfor er der ikke behov for ændringer i normale kanalrengørings- og vedligeholdelsesprocedurer. I køkkener og forplejningsfaciliteter kræves normal kanalrensning af brandsikkerhed og for at opfylde andre folkesundhedskrav og skal udføres som normalt med passende forholdsregler på plads.

Desuden er rengøring af kanaler ikke effektiv mod rum-til-rum-infektion, fordi ventilationssystemet ikke er en forureningskilde, hvis vejledningen om varmegenvinding og recirkulation følges [7]. Jf. REHVA [7], afsættes ikke let virus som er fastgjort til små partikler i ventilationskanaler og udføres normalt af

luftstrømmen. Derfor er der ikke behov for ændringer i normale kanalrengørings- og vedligeholdelsesprocedurer. Alligevel, i tilfælde af udbrud er det vel en god ide at fraluft kanalsystemet kunne desinficeres, særligt hvis man har haft smittede personer i rummene der suges fra.

6.4 Varmeflader, Køleflader, Varmegenvinding

Flader i ventilationsanlæg til opvarmning, køling, genvinding eller affugtning, skal være rene både indvendigt og udvendigt, og finnerne til varmeoverførsel skal være intakte og ubeskadigede. Da køleflader typisk reducerer både den sensible (afkøling) og latente (affugtning) varme i luften, er de mere følsomme over for tab af varmeoverførselsevne end varmeklader. Køleflader akkumulerer mere sandsynligt snavs, da de normalt er våde [9].

Viruspartikeltransmission via varmegenvinding er ikke muligt, når et HVAC-system er udstyret med væsk koblet batteri eller et andet varmegenvindingssystem, der garanterer 100% luftseparation mellem retur- og forsyningssiden.

Nogle varmegenvinding systemer kan overføre partikler og gasfaseforurenende stoffer fra udsugningssiden til indblæsningssiden via lækager. Roterende luft til luft-varmevekslere (dvs. rotor, også kaldet entalpihjul) kan være udsat for betydelig lækage i tilfælde af dårlig design og vedligeholdelse [7].

Det er blevet vist, at roterende varmevekslere, som er korrekt konstrueret, installeret og vedligeholdt, har næsten nul overførsel af partikelbundne forurenende stoffer (inklusive luftbårne bakterier, vira og svampe), og overførslen er begrænset til luftformige forurenende stoffer, såsom tobak røg og andre lugte [7].

6.5 Ventilatorer

Opretholdelse af ønsket luftmængde er afgørende for at give tilstrækkelig konditioneret tilluft til et rum. Hvis ventilatorens komponenter ikke vedligeholdes korrekt, kan det medføre nedsat luftstrøm og eventuelt svigt.

Ventilatorer er den primære komponent i ethvert fraluftssystem. Lavkvalitetsfiltre på fraluftssiden fjerner ikke alle luftforurenende stoffer i et ventilationsanlæg. Selvom risikoen for infektion fra COVID-virus ved at udføre vedligeholdelse af HVAC-systemet er lav [16], skal der vises forsigtighed ved vedligehold af ventilatorsektionen, især for systemer i enhver bygning, hvor der for nylig har været en infektion.

7. Drift og vedligeholdelse af vandinstallationer

7.1 Generel

Ved projektering af vandinstallationer, skal der vælges en metode for sikring mod bakterier, herunder Legionella i vandinstallationen [2]. Metoden kan være en kombination af korrekt projektering og udførelse af anlæg samt krav til vedligeholdelse og drift. I vurderingen af metodevalg skal anvendelsen og brugergruppen af den konkrete bygning indgå. Ved vurdering af varmtvandstemperaturen i installationerne og ventetiden på, at det varme vand når ud i den enkelte installation, skal risikoen for Legionella indgå.

Det har desuden vist sig, at anvendelsen af nogle materialer som eksempelvis naturgummi og visse former for syntetisk gummi kan bidrage til bakterievækst, herunder Legionellavækst.

I hele varigheden af SARS-CoV-2 (COVID-19) -epidemien har mange bygninger oplevet mindre brug, og nogle bygninger kan være blevet lukket ned over længere tid. Dette kan f.eks. være hoteller, skoler, sportsfaciliteter, fitnesscentre, swimmingpools, badehuse og mange andre typer bygninger og faciliteter udstyret med HVAC og vandsystemer. Afhængig af en række faktorer, herunder systemlayout og design, kan langvarig reduceret (eller ingen) brug føre til vandstagnation i dele af HVAC og vandsystemer, hvilket øger risikoen for et udbrud af legionærsygdommen (Legionella) efter genoptagelse af fuld operation. Før systemet genstartes, skal der udføres en grundig risikoanalyse for at vurdere eventuelle involverede Legionella-risici. Flere relevante myndigheder giver oplysninger om relaterede risikovurderings- og genstartsprocedurer, herunder [7].

Skylning af vandafløb er en af de mest ubehagelige opgaver, men en af de vigtigste. Derfor skal personale, der udfører skylning, uddannes gennem træning for at forstå, hvorfor denne vanskelige opgave er så vigtig [20].

8. Drift og vedligeholdelse af varmesystem og kølesystem

Varmesystemer kan fungere normalt og uden justering under COVID-19 pandemi, da virussen er hård og modstandsdygtig, hvilket betyder, at ændringer i temperaturer eller fugtighed i miljøet ikke vil have stor indflydelse [21].

For at forhindre, at bakterier vokser i køletårne, skal du tømme vandet for at minimere stillestående vand, når køletårnene lukkes ned [22].

9. Drift og vedligeholdelse af afløbssystem

Afløbssystem er sammenkoblet gennem alle dele af en bygning, og potentialet for forurenede luft til at rejse gennem en bygning er stort, hvis defekt VVS og dræning bruges.

Utilstrækkeligt afløbssystem har sandsynligvis bidraget til spredningen af SARS i beboelsesejendomme i Hong Kong [23]. Det blev konkluderet, at forurenede aerosol blev trukket gennem tørre U-rør i badeværelsesgulv afløb fra andre lejligheder af ventilatorer til badeværelsesudsugning. Mennesker i nærliggende bygninger blev også inficeret og antages at være fra partikler, der bæres af vinden.

Andre faktorer, såsom overforbrug eller underudnyttelse af VVS- og afløbssystemer, høje temperaturer og store koncentrationer af inficerede mennesker skaber bekymring over selvisolering og brug af hospitalsafdelinger som karantæneområder. Store koncentrationer af inficerede mennesker skaber en højere virusbelastning i systemet og fører til en højere risiko for spredning af sygdommen. Selvisolering skaber en større mængde inficerede mennesker, der potentielt forårsager systemoverbrug. Sygehusafdelinger, der bruges som karantæneområder, er et problem på grund af, hvordan hele systemet er sammenkoblet [24].

IIR [25] anbefaler, at U-formede rør, herunder kloakker til bygninger, vandforseglinger til luftbehandlingsanordninger, toiletgulv afløb og kondensvandafløb til aircondition, bør undersøges regelmæssigt. Vand skal genopfyldes for at undgå blanding af luft mellem forskellige etager.

10. Konklusion

Varme-, ventilations- og klimaanlæg, vand og afløbssystemer, der er velholdt og betjent korrekt, bør ikke øge risikoen for virusoverførsel. Bygningstekniske systemer til både boliger og bygninger som offentlige bygninger, skoler, hoteller, mm skal inspiceres, vedligeholdes og rengøres regelmæssigt for at forhindre transmission.

Korrekt drifts- og vedligeholdelsespraksis skal være til sted. Den skal give information og instruktion til vedligeholdelsespersonalet for korrekt udføres af opgaverne. Strenge standarder for installation og vedligeholdelse af ventilationssystemer er afgørende for at sikre, at de er effektive og bidrager til et sikkert miljø som helhed. Vedligeholdelsespersonalet skal følge arbejds- og hygiejnepraksis i organisations drifts- og vedligeholdelses plan, herunder alle nødvendige sikkerhedsforanstaltninger for minimering muligt eksponering til patogener. Korrekt drifts- og vedligeholdelsespraksis skal beskytte både driftspersonallen og andre i bygninger.

11. Litteratur

- [1] Do air conditioning and ventilation systems increase the risk of virus transmission? If so, how can this be managed? Global HEAT Health information network,
<https://ghhin.org/faq/do-air-conditioning-and-ventilation-systems-increase-the-risk-of-virus-transmission-if-so-how-can-this-be-managed/>
- [2] Danish buildings regulation (BR18)
<https://byggningsreglementet.dk/>
- [3] Vejledning om vurdering af arbejdsskadesager om sygdom med COVID-19
<https://at.dk/regler/at-vejledninger/vurdering-arbejdsskadesager-covid-19/>
- [4] Heating and ventilation systems, Health Technical Memorandum 03-01: Specialised ventilation for healthcare premises, Part B: Operational management and performance verification
https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/144030/HTM_03-01_Part_B.pdf
- [5] Få svar på spørgsmål om coronavirus (COVID-19)
<https://at.dk/arbejdsmiljoeoproblemer/covid-19/spoergsmaal-og-svar-om-corona/>
- [6] Heating, ventilation and air-conditioning systems in the context of COVID-19 , 22 June 2020, ECDC,
<https://www.ecdc.europa.eu/sites/default/files/documents/Ventilation-in-the-context-of-COVID-19.pdf>
- [7] REHVA, REHVA COVID-19 guidance document, August 3, 2020 How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces
https://www.rehva.eu/fileadmin/user_upload/REHVA_COVID_19_guidance_document_V3_03082020.pdf
- [8] Building Engineering Services Association, BESA, COVID-19 - PRACTICAL MEASURES FOR BUILDING SERVICES OPERATION,
<https://www.thebesa.com/media/837805/besa-guidance-covid-19-practical-measures-for-building-services-operation.pdf>
- [9] ISPE Good Practice Guide, Heating, Ventilation, and Air Conditioning, 2009,
<https://ispe.org/publications/guidance-documents/good-practice-guide-heating-ventilation-air-conditioning-hvac>
- [10] ACGIH, White Paper on Ventilation for Industrial Settings during the COVID-19 Pandemic, 2020
https://www.acgih.org/docs/default-source/vent-committee/iv_position-test.pdf?sfvrsn=4b10ba0d_2
- [11] Workplace Safety & Prevention Services Guidance on Health and Safety for Maintenance and Facilities Maintenance Employees during COVID-19

<https://www.wsps.ca/WSPS/media/Site/Resources/Downloads/covid-19-maintenance-employees-health-and-safety-guidance.pdf?ext=.pdf>

[12] DS/EN ISO 14644-4, 2001, Renrum og tilknyttede kontrollerede områder - Del 4: Design, konstruktion og opstart, <https://webshop.ds.dk/da-dk/standarder/standard/13-040-35-renrum-og-tilsvarende-overv%C3%A5gede-milj%C3%B8er/ds-en-iso-14644-42001>

[13] Ventilation control for airborne transmission of human exhaled bio-aerosols in buildings <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6072925/>

[14] Infection prevention and control during health care when coronavirus disease (COVID-19) is suspected or confirmed, Interim guidance, 29 June 2020 <https://www.who.int/publications/i/item/WHO-2019-nCoV-IPC-2020.4>

[15] Inspection and Maintenance Q6. Are additional inspection or maintenance measures needed? <https://www.publichealthontario.ca/-/media/documents/ncov/ipac/2020/09/covid-19-hvac-systems-in-buildings.pdf?la=en>

[16] System Maintenance and Filter Replacement, Guidance on Using Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Systems During the COVID-19 Pandemic August 11, 2020 <https://health.ri.gov/publications/guidance/HVAC-COVID-19.pdf>

[17] ASHRAE Position Document on Filtration and Air Cleaning, 2015 <https://www.ashrae.org/file%20library/about/position%20documents/filtration-and-air-cleaning-pd.pdf>

[18] REHVA, Q&A <https://www.rehva.eu/activities/covid-19-guidance/rehva-covid-19-faq, 2020>

[19] NAFA, COVID-19 (Corona Virus) and Air Filtration Frequently Asked Questions (FAQs) <https://www.nafahq.org/covid-19-corona-virus-and-air-filtration-frequently-asked-questions-faqs/>

[20] HVAC and water system, Returning to work: Operation guidance. https://www.thermodial.ie/wp-content/uploads/2020/06/returning-to-work-operation-guidance_manual-final.pdf

[21] HVAC and water systems operation in COVID-19 <https://www.thermodial.ie/news/heating-ventilation-air-conditioning-hvac-and-water-systems-operation-in-covid-19/>

[22] Guidance on Using Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) Systems During the COVID-19 Pandemic, August 11, 2020 <https://health.ri.gov/publications/guidance/HVAC-COVID-19.pdf>

[23] Inadequate plumbing systems likely contributed to SARS transmission <https://www.who.int/mediacentre/news/releases/2003/pr70/en/>

[24] Coronavirus (COVID-19) - Drain Cleaning & Sanitising To Prevent Transmission. <https://drainboss.co.uk/services/coronavirus-covid-19-prevention-by-drain-cleaning/>

[25] Recommendations on the operation of air conditioning and heating systems coping with COVID-19. Chinese Association of Refrigeration, <https://iifiir.org/en/fridoc/142055>

Del 3_Luftfordelingsprincipper

Nomenklatur:

Udtryk	Definition	Kilde
Mikrodråber	Mikrodråber er små dråber (<100µm) fordelt i luft eller anden gas.	Wiki
Luftbåren smittespredning	Luftbåren smittespredning er defineret som spredningen af smitte via mikrodråber der kan vedblive at være opløste smittebærere over lang afstand og tid.	WHO
Opblandingsventilation	Opblandingsventilation er et luftfordelingssystem, hvor luften tilføres med en relativt høj hastighed og impulsstrøm uden for opholdszone.	Danvak ventilationsteknik
Fortrængningsventilation	Fortrængningsventilation er et luftfordelingssystem hvor luftbevægelsen er styret af densitetsforskelle i luften. Indblæsningen sker lavt i rummet med undertemperatur og lav impulsstrøm.	Danvak ventilationsteknik
Diffus Loftindblæsning	Diffus Loftindblæsning er et luftfordelingssystem Med indblæsning igennem store dele af loftfladen med meget lav hastighed og meget lav impulsstrøm. Strømningsmønstre styres af den frie konvektion omkring varmekilderne.	REHVA
Personlig ventilation (PV)	Personlig ventilation er et luftfordelingssystem som levere rent luft direkte til personens åndedrætszone via en ren stråle eller anden tilførsel til personens åndingszonen via grænselaget.	Danvak rapport
Personlig udsugning (PE)	Personlig udsugning er et luftfordelingssystem der fjerner eventuel forurening og smittespredning tæt ved kilden.	
Lokal ventilation	Lokal ventilation er et luftfordelingssystem, der fjerner eventuel forurening og smittespredning tæt ved kilden.	Industrial Ventilations Design Guidebook
Lokal udsugningsventilation (LEV)	Lokal udsugningsventilation er en løsning der fjerner eventuel forurening og smittespredning i et område omkring kilden.	Tekst i Danvak rapport
Stempelstrømning	Stempelstrømning er en strømningsform hvor luften tilføres gennem hele den ene af rummets begrænsningsflader (normalt loftet eller en væg) og passerer rummet uden nogen form opblanding. Det kan også være en strømningsform hvor der etableres et mindre felt med ensartet strømning i konstant størrelse og retning uden opblanding.	Danvak ventilationsteknik
Opholdszone	Opholdszonen er det volume ved gulvfladerne der definerer området for personers passage og ophold.	REHVA guidebook
Impuls, eller bevægelsesmængdestrøm	Impuls, eller bevægelsesmængdestrøm er en fysisk størrelse. Massestrøm gange hastighed	Wiki
Ventilationseffektivitet	Udtrykker det niveau som ventilationssystemet opfylder ventilationskravet.	REHVA guidebook

Stratificeringslaget	Lagdeling af luft i et rum på grund af tæthedforskelle.	REHVA guidebook
VAV (Variable air volumen)	VAV-anlæg (Variable Air Volume) er ventilationsanlæg, hvor det er volumenstrømmen til de ventilerede områder der tilpasses det aktuelle temperaturbehov.	Danvak ventilationsteknik
Mikro-miljø	De kombinerede strømningselementer omkring en eller flere personer. Mikro-miljøet er ofte til nogen grad uafhængig af den generelle ventilation.	

Symbols	Definition	Unit
ACH	Luftændringshastighed	1/h
C_{exp}	Koncentration af den pågældende aerosol/virus i personens indånding	ppm, mg/m ³
C_R	Koncentration i lokalets retur åbning [ppm, mg/m ³ , etc.]	ppm, mg/m ³
q_p	Den nødvendige lufttilførsel per person for at opfylde de almindelige krav til komfort	m ³ /h, m ³ /s
q_{tot}	Den samlede luftmængde, der leveres til rummet [m ³ /h, m ³ /s]	m ³ /h, m ³ /s
n	Antallet af personer i rummet	-

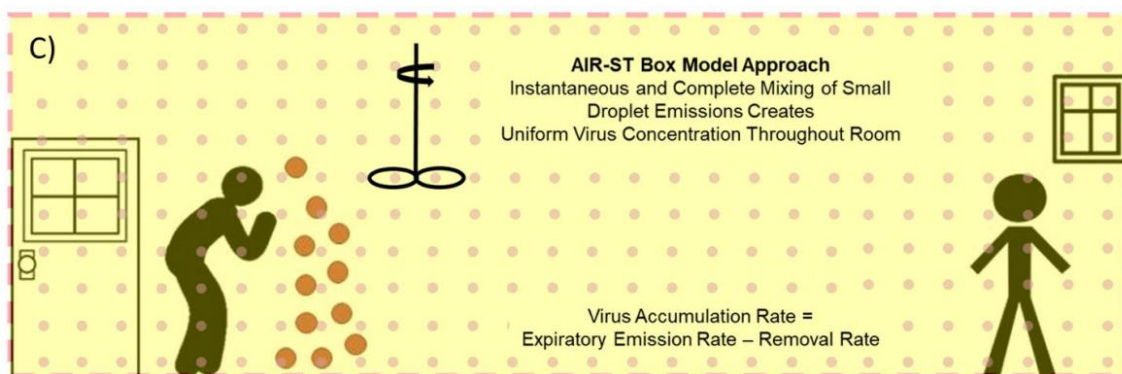
Del 3_Filtrering og dekontaminering

Symboler/ Forkortelser	Definition	Forklaring
COVID-19	Disease caused by SARS-CoV-2 virus	Sygdom forårsaget af SARS-CoV-2 vira
HEPA	High-Efficiency Particulate air	Højeffektiv partikulær luft
ULPA	Ultra-Low Particulate Air	Ultralav partikulær luft
SARS	Severe Acute Respiratory Syndrome	Svært akut luftvejssyndrom
AQI	Air Quality Index	Luftkvalitetsindeks
MERV	Minimum efficiency reporting value	Minimum effektivitetsrapporteringsværdi
DUV-LED	Deep UV- LED	dyb ultraviolet lysemitterende diode
RF	Relative humidity/RH	Relativ fugtighed
ePTFE	Expanded Polytetrafluoroethylene	
CADR	Clean Air Delivery Rate	Renluft leveringsgrad
UVGI	Ultraviolet germicidal irradiation	UV bakteriedræbende bestråling
µm	Micrometer	Mikrometer, 1×10 ⁻⁶ meter
nm	Nanometer	Nanometer, 1×10 ⁻⁹ meter

Luftbåren infektionsrisiko og strategier til ventilationskontrol

1. Risikovurdering af luftbårne transmissioner

Bl.a. REHVA [1], NAFA [2] og Mikszewski et al. [3] beskriver metoder som kan estimere af infektionsrisici for COVID-19 og andre patogener baseret på luftskifte i rum samt filtrering, der kan anvendes til typiske rum i ikke-beboelsesbygninger.



Figur 1. Boks-model tilgang brugt ved risikovurdering af luftbårne transmissioner [3]

Beregninger er baseret på den Wells-Riley-model for luftbårne sygdom transmission. I denne model udtrykkes den udsendte virale belastning i form af kvantemissionshastighed, quanta (E , quanta/h). Et kvanta defineres som den dosis af luftbårne dråbeformede kerner, der kræves for at forårsage infektion hos 63% af de modtagelige personer. Med Wells-Riley-modellen er sandsynligheden for infektion (p) relateret til antallet af indåndede kvanta (n) ifølge følgende ligning:

$$p = 1 - e^{-n}$$

Den kvante, der inhaleres (n , kvanta), afhænger af den tidsgennemsnitlige kvantekonzentration (C_{avg} , quanta/ m^3), den vejtrækningshastigheds volumen for en person (Q_b , m^3/h) og varigheden af belægning (D , h):

$$n = C_{avg} Q_b D$$

$$C_{avg} = \frac{1}{D} \int_0^D C(t) dt = \frac{E}{\lambda V} \left[1 - \frac{1}{\lambda D} (1 - e^{-\lambda D}) \right]$$

$$\lambda = \lambda_v + \lambda_{dep} + k + k_{filtration}$$

V er rumvolumen (m^3), λ er tabshastighedscoefficient for quanta / h på grund af de summerede effekter af ventilation (λ_v , 1 / h), aflejring på overflader (λ_{dep} , 1 / h), virusnedfald (k , 1 / h) og filtrering med bærbar luft renere ($k_{filtrering}$, 1 / h).

Kvantemissionshastighed er vanskeligt at estimere. Det varierer afhængigt af aktivitetsniveauet og patogener typen. For COVID-19, bruger REHVA [1] modellen følgende data for kvantemissionshastighed samt vejtrækningshastighed.

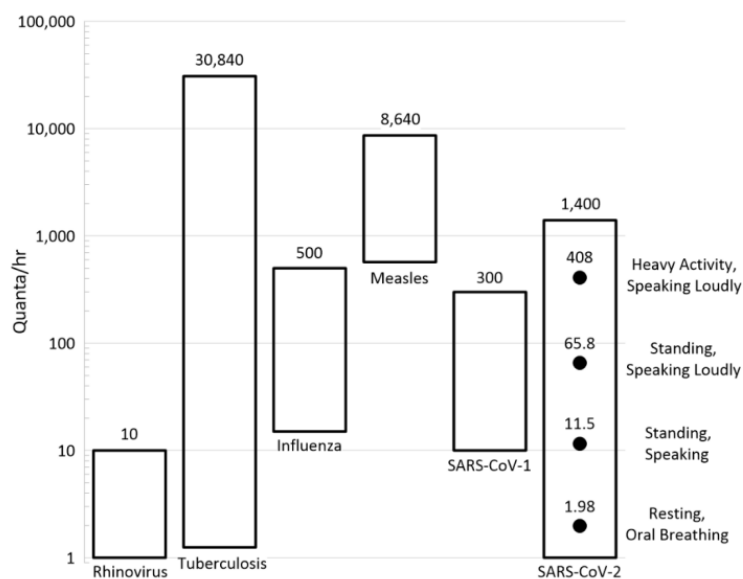
Tabel 1. 85 percentil kvanteemissionsrater for forskellige aktiviteter [1]

Activity	Quanta emission rate, quanta/h
Resting, oral breathing	3.1
Heavy activity, oral breathing	21
Light activity, speaking	42
Light activity, singing (or loudly speaking)	270

Tabel 2. Volumetriske vejrtrækningshastigheder [1]

Activity	Breathing rate, m ³ /h
Standing (office, classroom)	0.54
Talking (meeting room, restaurant)	1.1
Light exercise (shopping)	1.38
Heavy exercise (sports)	3.3

Mikszewski et al [3] rapportere for følgende data for forskellige patogene.

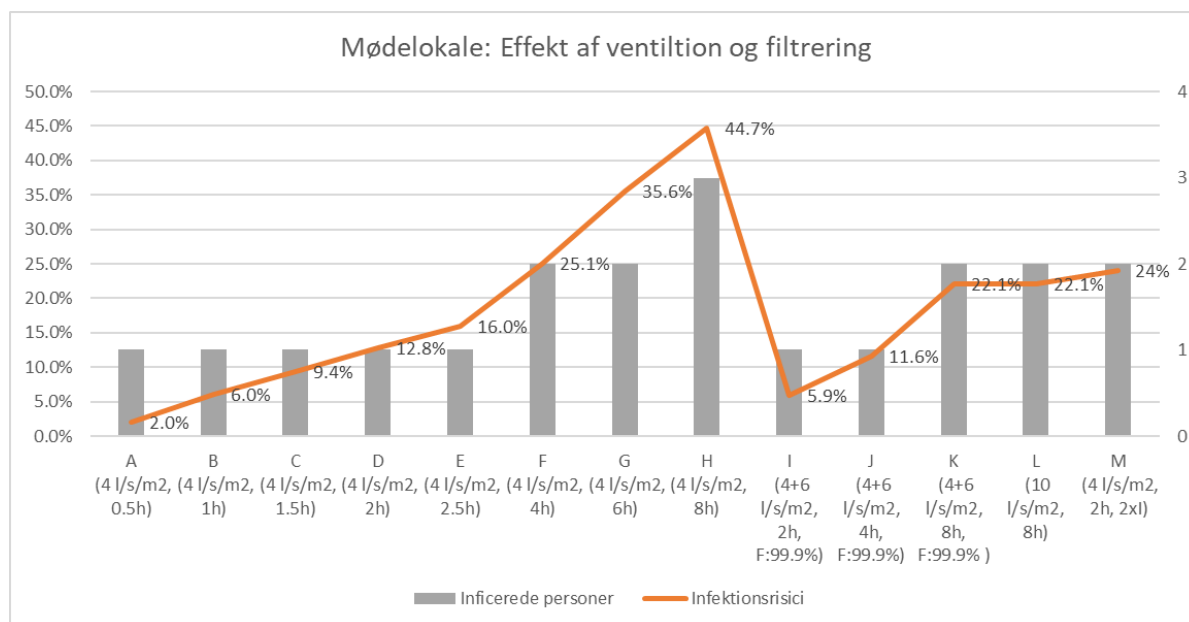


Figur 2. Kvantemissionshastighed for forskellige patogene [3]

REHVA [1]beregningsmodel tager ikke i betragtning effekten af luft recirkulering i lokalerne og samt filtrering af recirkuleringsluft. Mere oplysninger om recirkulering kan læses i NAFA dokumentet [2].

Beregningsmetoder beskrevet af REHVA [1]og NAFA [2] blev brugt i eksempel for mødelokale med 5 personer med mekanisk ventilation. Figur 3 viser effekten af tre parametre (varighed, luftmængde, filtrering) på infektionsrisikoen. Scenario A-G viser at en varighed af 0.5 til 4 timer der er risiko at 1 person ud af 5 bliver smittet med COVID-19, hvor antal af personer øges til 2 personer ud af 5 personer når mødevarighed er 4-6 timer. Ved møde på 6-8 timer kan der 3 ud af 5 person blev smittet. Effekt af 2

personer i mødelokale som er syge vises i scenario M. Etablering af luftrenser viser at kan reducere antallet af smittede personer i lokale (scenarier I-K). Effekten er det samme hvis der øges frisk luftmængder (scenario L). Fordelen ved brug af luftrenser er at der kan spares energi ved (manglende) konditionering af recirkuleret luftmængder. Resultaterne i Figur 3 er relateret til det specifikke eksempel.



Figur 3. Effekt af ventilation og filtrering. Eksempel: mødelokale, 6 personer, 3 m²/person, 1 person med virus, volumen 54 m³, areal 18 m², kvantemissionshastighed (quanta) 19 1/h, vejtrækningshastigheds volumen 1.1 m³/h; scenario A-H: luftmængde 72 l/s, 100% frisk luft, 4 l/s/m², varighed fra 0.5 til 8 timer; scenario I-K: frisk luftmængde 72 l/s, recirkuleret luftmængde 108 l/s, i alt 10 l/s/m², recirkulerings filter 99.9%, varighed 2, 6 og 8 timer; scenario L: luftmængde 180 l/s, 100% frisk luft, 10 l/s/m², varighed 8 timer; scenario M: lige som scenario D men med 2 personer som har virus. Antal personer der er smittet er beregnet som (0-1)=1 person, (1-2)=2 personer, (2-3)= 3 personer.

Der er mange usikkerheder og antagelser ved beregning sandsynligheden for infektion. Fx der forudsættes at der er kvantemissionshastighed (quanta) er en af de vigtigste parametre som normalt defineres efter pandemierne og derfor er svært at fastlægges. Distribution af partikelstørrelsen relateret til vira transport samt partikelafsettelse er andre parametre hvor manglende viden giver usikkerhed i resultaterne. Denne model betragter eksponeringskoncentrationen er ensartet i hele rummet. Stadigvæk modellen kan give indikation af forventet antal personer som kan blive syge samt effekt af forskellige foranstaltninger som ekstra luftskifte, brug af rumluftrenser, UV-desinfektion, mundbind, mm.

2. Luftmængder

Luftmængder afhænger af beboernes tæthed og bygningstyper. Den senest frigivne retningslinje for infektionsforebyggelse og kontrol i COVID-19 fra WHO [4] anbefaler, at luftmængderne 6-12 ACH i sundhedsfaciliteter i det mekaniske ventilationsområde og opretholder et undertryk større end 2,5 Pa. Den anbefalede gennemsnit naturlige luftmængderne er 160 l/s/patient. Tabel 1 viser en liste over minimums ACH og tryk for sundhedsfaciliteter baseret på ASHRAE170-2017-standarden [5].

Tabel 3. Minimum required ACH in health care facilities [5][6]

Functional space category	Subspace functions (minimum required ACH $\pm^1$)
Surgery and critical care	Class A (15+), B (20+), and C (20+) operations, newborn intensive care (6+), triage (12+)
Inpatient nursing	Patient recovery (6), protective environment (12+), airborne infection isolation (12-), corridor (2)
Skilled nursing facility	Resident (2), gathering/activity/dining (4)
Laboratories	Diagnostic radiology (6), surgical radiology (15+), bacteriology (6-), microbiology (6-), autopsy (12-), sterilizing (10-)
Diagnostic and treatment	Examination (6), medication (4+), treatment (6)
Sterilizing and supply	Sterilizing equipment (10-)
Central medical and surgical supply	Clean workroom (4+), sterile storage (4+)
Service	Food preparation (10), laundry (10-), bathrooms (10-)
Support	Hazardous material storage (10-)

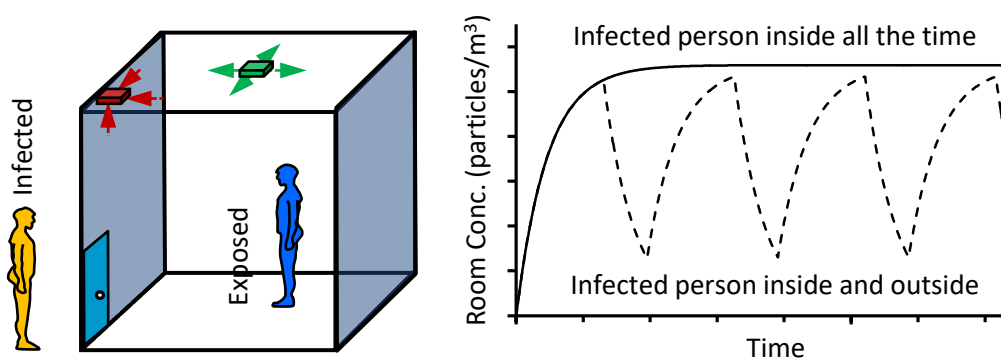
¹ +: positive pressure required; -: negative pressure required.

For offentlige bygninger (såsom kontorer, skoler, indkøbscentre osv.) og boligbyggerier skal luftmængder for udendørs luft mindst opfylde nationale minimumskrav, der er fastsat i den lokale bygningskodeks eller andre reguleringsdokumenter. Hvis der ikke findes en national ventilationsregulering, skal nationale, europæiske eller internationale standarder og retningslinjer bruges som baseline. Typisk dimensionering i henhold til ISO 17772-1: 2017 [7] og EN 16798-1: 2019 [8] resulterer i standardindeklime kategori II til 1,5 - 2 L / s pr. etage m² (10–15 L / s pr. person) volumenstrømmen på kontorer til ca. 4 L / s pr. etage m² (8-10 L / s pr. person) i mødelokaler og klasselokaler. De nuværende byggeforskrifter og standarder for ventilationsdesign i offentlige bygninger og beboelsesejendomme løser imidlertid ikke de luftbårne infektionsproblemer. Derfor mangler den tilstrækkelige data til at specificere og kvantificere minimumskrav til ventilation i sådanne rum til effektivt at kontrollere luftbåren transmission. WHO's anbefaling [9] til disse offentlige rum er mere kvalitativ end kvantitativ 'Øget luftmængder gennem naturlig ventilation eller mekanisk ventilation, helst uden recirkulation af luften.' Som anbefalet af REHVA [1] kan luftmængder i kategori I anvendes til fremtidige bygninger og ventilationsdesign, da det giver en betydelig risikoreduktion sammenlignet med almindelige luftmængder i kategori II.

For de eksisterende ventilationssystemer, der ikke har mulighed for at øge ventilationskapaciteten markant, er der behov for andre kontrolstrategier, såsom at reducere belægningstiden og at gennemføre intermitterende pauser for at reducere infektionsrisikoen.

Med en steady-state luftmængde og steady-state-ekspiratoriske strømme fra beboere kan der være mindst to typiske og tydelige scenarier for luftbåren infektion afhængigt af tidsplanen for den inficerede persons tilstedeværelse i et rum. Udviklingen af rumkoncentrationen af respiratoriske mikrodråber til de to

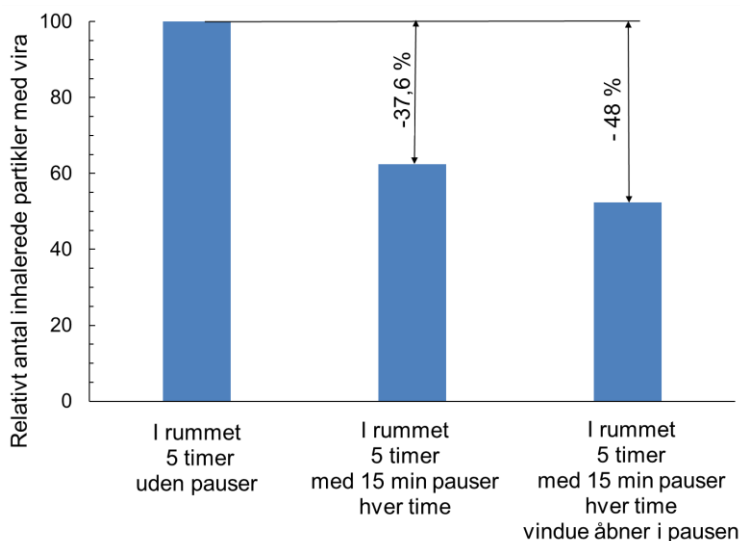
scenarier er skematisk vist i Figur 4. Bemærk, at der i denne undersøgelse antages fuldstændig blanding af respiratoriske mikrodråber og rumluft. Efter at den inficerede person kommer ind i et rum, begynder rumkoncentrationen af de mikrodråber at stige, og dermed øges den eksponering af beboerne for virusbelastede mikrodråberne. Hvis den inficerede person forbliver i rummet i lang tid, bygger koncentrationen af mikrodråber op, indtil den når stabil tilstand (Figur 4, kontinuerlig kurve). Men hvis den inficerede person efter et stykke tid forlader rummet, begynder koncentrationen af mikrodråber at henfalde (Figur 4, stiptet linje). Opbygningsprocessen fra en lav koncentration starter igen, når den inficerede person igen kommer ind i rummet efter et stykke tid. Opbygningen og henfaldet gentages hver gang den inficerede person kommer ind og forlader rummet. Under disse forbigående betingelser vil den gennemsnitlige eksponering for beboere for mikrodråber være lavere end det første scenario (Figur 4, kontinuerlig kurve). For begge scenarier (kontinuerlig og intermitterende kildegenerering) afhænger eksponeringen af en række faktorer, såsom tidsplanen for tilstedeværelsen af den inficerede person i rummet, antallet af inficerede personer i rummet, længden af perioderne i som hver inficeret person er fraværende i rummet, den designede beboertæthed, luftmængder, rumvolumen og antal beboere.



Figur 4. Udvikling af rumkoncentrationen af mikrodråber under eksponering (a) med en opbygning til steady-state rumkoncentration (med kontinuerlig tilstedeværelse af inficeret person); (b) med skiftevis opbygning og henfald af rumkoncentration (med intermitterende tilstedeværelse af inficeret person) [10]

Tilførsel af ekstra luft til rummet med stand-alone luftbehandlingsenheder, vinduesventilatorer anbefales i pauser. Dette kan effektivt fjerne mikrodråber fra indendørs, samtidig reducere risikoen for termisk ubehag og støjproblemer.

Figur 5 viser effekten af intermitterende belægning, når den anvendes i et klasseværelse med 30 elever. Det relative fald i antallet af inhalerede virusbelastede mikrodråber sammenlignes i løbet af fem timers klasser med kun intermitterende belægning, og når den intermitterende belægning kombineres med naturlig ventilation (åbne vinduer) i pauserne. Antallet af inhalerede virusbelastede mikrodråber i sagen uden forbudt belægning, hvis det anvendes, og en reference. Den intermitterende belægning fører til næsten 38% reduktion af inhalerede mikrodråber og op til 48%, når det kombineres med naturlig ventilation i pauserne.



Figur 5. Reduktion af antallet af luftbårne virusbelastede mikrodåber med intermitterende belægning og øget naturlig ventilation

På den anden side siger nogle undersøgelser [11][12], at stigende luftmængder ikke nødvendigvis er en effektiv metode, hvis forurenede stoffer frigøres kontinuerligt på et bestemt sted, og koncentrationen er uensartet i rummet, og den komplekse strømningsinteraktion omkring menneskekroppen ikke har en lineær korrelation med en ændring af luftningerne. Derfor bør luftmængder ikke bruges som den eneste indikator for ventilationsydelse ved reduktion af luftbåren infektion.

3. Differenstryk

Transport af patogener mellem lokaler (som kontorer) kan reduceres ved hjælp af fysiske og aerodynamiske luft barrierer. Etablering af (midlertidigt) tæt adskillelse mellem lokaler som sikrer ingen luftstrøm fra tilstødende lokaler, er eksempel på en fysisk barriere som kan være en optimal løsning. Sådanne fysiske barrierer kan være to lokaler som er adskilt med (glas)væg og som har separat adgang fra det fri. Alternativ løsning som er mindre effektiv men mere brugbart for standard byggeri, er etablering af svag aerodynamisk luftbarriere af tilstrækkelig luftstrøm fra "ikke inficeret buffer" zone mod "inficeret" lokaler. Sådanne konfigurationer resulterer i et højere statisk tryk i den "ikke inficeret" område i forhold til tilstødende område. Således kan trykforskel mellem lokalerne være en effektiv indikator for etablering af en ordentlig aerodynamisk luftbarriere. Den generelle tommelfingerregel er at der skal bruges positivt differensstryk for at holde "forurenende stoffer" ude af et område og undertryk for at fange "forurenende stoffer" og forhindre dem i at forurene omgivende områder.

Konceptet om differensstryk mellem lokaler bruges i renrum og indeslutnings faciliteter og kan godt implementeres med succes også for kontor eller lign. som midlertidigt eller fast løsning. Eksempel for sådan løsning er etablering af "ren" zone på kontor etage som er ikke tilgængeligt til mennesker og hvor der kan reduceres fraluft. Dvs. der etableres overtryk mod nabo kontorlokaler hvor der skal tilsvarende reduceres fraluft så luftbalancen opnås. På den måde kan der sikres nødvendigt luftstrøm mod kontorområde som kan forhindre udslip af patogener. Etablering af "ikke tæt" dobbelt plastik skillevæg hvor der indblæses "ren" luft i væg kan være alternativ løsning. Tilstrækkelig luftstrøm gennem lækage under lukket dør er også eksempel på etablering af trykforskel mellem to lokaler. Eksemplerne viser at det er nødvendigt at opdele lokalerne med dør, væg eller lign så der kan sikres nødvendigt luftstrøm "passerer" gennem kontrolleret lækage. Standarden ISO 14644-4 [13] som dækker renrums faciliteter anbefaler en mindste trykforskel på 5-20 Pa. Trykforskellen skal være af tilstrækkelig størrelse til at sikre indeslutning og

forebyggelse af tilbageførsel, men bør ikke være så høj, at det skaber turbulensproblemer. Man skal huske at det er luftmængde og ikke differenstryk som danner en aerodynamisk luft barriere og som forhindrer udslip når differenstrykket mellem lokalerne forsvinder ved fx døråbning.

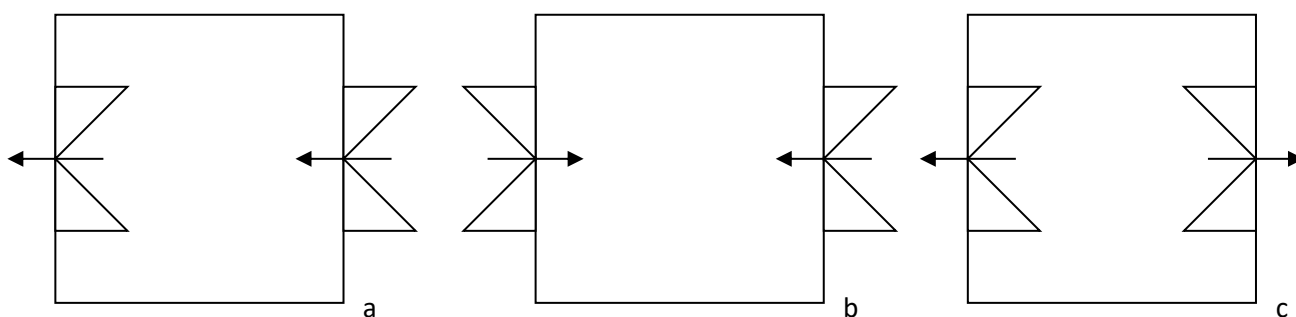
Rumdifferenstryk kan bruges alene eller i kombination med andre indeslutningskontrolteknikker og -koncepter, såsom en HEPA-filtrering eller luftsluse. Luftsluse kan være vigtige komponenter i opsætning og vedligeholdelse af tryk-kaskadesystemer. En luftsluse er et rum eller lokale, som forhindrer direkte adgang til/fra et lokale. Slusen sikrer at differenstrykket ikke forsvinder sammenlignet med situation hvor der er åbent døren mellem lokalerne.

WHO Technical Report 937 [14] klassificerer luftsluser med forskellig trykkaskade som:

"Cascade" luftsluse: højt tryk på den ene side af luftslusen og lavt tryk på den anden.

"Sink" luftsluse: lavt tryk inde i luftslusen og højt tryk på begge ydre sider

"Bubble" luftsluse: højt tryk inden i luftslusen og lavt tryk på begge ydre sider



Figur 6. Examples of cascade airlock. The arrow shows the leakage air flow.

En kombination mellem to af de tre typer sluser kan også bruges efter behov. For et kontorbyggeri hvor der ønskes at alle kontor holdes "patogene"- fri vil etablering af "cascade" luftsluse med luftstrøm fra kontor (et højere statisk tryk) mod gangen bliver løsning som beskytter dem der er på kontor men ikke omvendt. Dvs. potentielt kan patogener transporteres fra en syg person i et kontor mod korridor og resten af bygningen. Etablering af ekstra "boble" luftsluse vil forhindre udslip fra kontoret eller korridoren. Stadigvæk kan der teoretisk skete transport af patogener fra korridoren mod sluse ved åbent dør hvis luftstrømmen er ikke nok. Alle døre og dørlukker skal designes sådan at der sikres at etableret differenstryk mellem lokalerne skubber ikke døren i forkert retning så åbnes døren.

Reference

- [1] REHVA COVID-19 guidance document v4.0. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations.
- [2] B. Stephens, "HVAC filtration and the Wells-Riley approach to assessing risks of infectious airborne diseases," 2013.
- [3] A. Mikszewski, G. Buonanno, L. Stabile, and A. Pacitto, "Airborne Infection Risk Calculator User's Manual Version 2.1," 2020. [Online]. Available: <https://cires.colorado.edu/news/covid-19-airborne-transmission-tool-available>.
- [4] J. 2020 U. <https://tinyurl.com/r7w9ke>. [accessed 2020-05-29] WHO. 2020. Infection prevention and control during health care when novel coronavirus (nCoV) infection is suspected: interim guidance, "Infection prevention and control during health care when COVID-19 is suspected," *Who*, no. i, pp. 1–5, 2020, [Online]. Available: <https://apps.who.int/iris/rest/bitstreams/1272420/retrieve>.
- [5] ASHRAE, *ASHRAE/ASHE Standard 170-2017, ventilation of health care facilities*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, 2017.
- [6] A. A. Aliabadi, S. N. Rogak, K. H. Bartlett, and S. I. Green, "Preventing Airborne Disease Transmission: Review of Methods for Ventilation Design in Health Care Facilities," *Adv. Prev. Med.*, vol. 2011, pp. 1–21, 2011, doi: 10.4061/2011/124064.
- [7] ISO, *ISO 17772-1:2017 Energy performance of buildings – Indoor environmental quality – Part 1 : Indoor environmental input parameters for the design and assessment of energy performance of*. ISO, 2017.
- [8] D. Standard, *DS/EN 16798-1: 2019 Energy performance of buildings – Ventilation for buildings – Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and a*. 2019.
- [9] World Health Organization, "Considerations for public health and social measures in the workplace in the context of COVID-19," *World Heal. Organ.*, no. May, pp. 1–7, 2020, [Online]. Available: <https://www.who.int/publications-detail/risk->.
- [10] A. K. Melikov, Z. T. Ai, and D. G. Markov, "Intermittent occupancy combined with ventilation: An efficient strategy for the reduction of airborne transmission indoors," *Sci. Total Environ.*, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140908.
- [11] K. Grosskopf, "P396: Balancing ventilation and energy use in hospitals: a case study of bioaerosol transport in healthcare environments," *Antimicrob. Resist. Infect. Control*, vol. 2, no. S1, pp. 25–28, Jun. 2013, doi: 10.1186/2047-2994-2-s1-p396.
- [12] Z. D. Bolashikov, A. K. Melikov, W. Kierat, Z. Popioek, and M. Brand, "Exposure of health care workers and occupants to coughed airborne pathogens in a double-bed hospital patient room with overhead mixing ventilation," in *HVAC and R Research*, Aug. 2012, vol. 18, no. 4, pp. 602–615, doi: 10.1080/10789669.2012.682692.
- [13] ISO, *ISO 14644-4: 2001 Cleanrooms and associated controlled environments — Part 4: Design, construction and start-up*. 2001.
- [14] WHO, "WHO Technical Report 937: WHO Expert Committe on Specifications for Pharmaceutical Preparations," 2015.

Del 5- Målemetoder

Introduktion

For bedre at forstå de bagvedliggende mekanismer for virustransmission igennem luften og hvordan man foretager en opsamling på bedst mulig måde som både præserverer og opsamler virus i de rigtige størrelsesfraktioner, har vi lavet et litteraturstudie af metoder til opsamling af luftbåren virus. Vi inkluderede 153 artikler, som omhandlede forskellige former for virusopsamling i perioden, se figur 1. Vi fandt forskellige former for opsamlingsmetoder, som er blevet brugt igennem årene, hvilket indeholdt impingere, impactorer, cykloner, filterbaserede opsamlinger, elektrostatisk præcipitation og endelig vandbaserede kondensationsmetoder. De sidste udnytter, at man kan øge størrelsen af partikler i luften ved hjælp af vandtåge. Langt den største del af studierne benyttede en cyklon eller impactor metoder.



Figure 1: Virus opsamling metoder anvendt i det fundne studier

De nye og mest interessante metoder som elektrostatisk præcipitation og de vandbaserede kondensationsmetoder er blevet udviklet for at forbedre virus' overlevelseschancer i opsamlingsituationen. Moderne epidemiologi behøver en undersøgelse af virus' levedygtighed i luften for at kunne bekræfte tilstedeværelsen af levende og derfor infektiøse virus i luften. Overfor denne opsamlingsstype står metoder, der er mere ødelæggende for virus og således for det meste kun finder spor af, at der har været virus tilstede i luften. Dette er overvejende RNA fragmenter som ikke nødvendigvis vil komme fra levende virus, men også kan være rester af tidligere levende virus, som er gået til grunde i miljøet, inden eller under opsamlingen. I de sidste fem år har den hyppigste undersøgte virus været SARS-CoV-2 skarpt efterfulgt af influenzavirus. De fleste studier brugte RTPCR og QPCR såvel som dobbelt digitalt PCR baseret metode for at lave analyser af det opsamlede materiale og kun ganske få studier har været i stand til at bestemme levedygtigheden af virus i luften (1-4).

Dråbe og luftbåren mikrodråbe-transmission er nogle af de vigtigste smitteveje for respiratoriske virus. Den luftbårne transmission er vanskelig at forebygge, pga. at virus er tilstede mange steder i miljøet og viruspartikler pga. deres ringe størrelse ofte cirkulerer i lang tid i luften (5). Koncentrationen af virus i luften er ofte lav og betragtes for det meste som insufficient til at forårsage infektion. Der mangler dog viden på dette vigtige punkt, idet der er en mangel på metoder, som er gode til at opsamle virus på en skånsom måde. De ideelle metoder vil betyde, at man kan dyrke og undersøge for levedygtighed af de virus, som forefindes i luften. Dette er specielt vigtigt når man skal forebygge smitte blandt personer med kompromitteret immunforsvar, fx kritisk syge patienter, patienter med kroniske sygdomme eller under behandling der fører til nedsat immunforsvar. Dette gælder også patienter med kardiovaskulære eller respiratoriske sygdomme (6). De senere års pandemier har tydeliggjort behovet for at kunne måle virus i luften og bestemme levedygtigheden af virus for på bedst mulig måde at kunne forebygge spredning af infektionerne under disse udbrud som senest illustreret ved pandemien med SARS-CoV-2.

På trods af disse åbenbare behov for at kunne måle levende virus i luften, er der endnu ikke konsensus om hvilken metode for opsamling, dyrkning og bestemmelse af virus, som er den optimale. De fleste opsamlingsmetodologier er afhængige af i) den aerodynamiske diameter af den luftbårne partikel, ii) de adhesionsmæssige forhold af partiklerne, iii) de Brownske bevægelser iv) de temperaturmæssige gradienter og v) inertien af partiklerne (7). Luftbårne partikler hæfter sig på en hvilken som helst overflade, som de kommer i kontakt med, og vi vil i denne gennemgang af litteraturen forsøge at opsummere artikler som beskriver de forskellige virusopsamlingsmetoder.

Opsamlingsmetoder

På grund af luftvejenes beskaffenhed med deres anatomiske og fysiologiske funktion har størelsen af luftbårne partikler stor betydning for virus-deponeringen. Da deponering af partikler afhænger af partiklernes aerodynamiske diameter, har man altid haft fokus på at måle virus i forskellige størrelsesfraktioner. De fleste måle instrumenter er designet mhp., at man får fat i de fineste partikler, som er i stand til at trænge ned i de dybere luftveje. Aerosol-opsamlerne bliver i det følgende bedømt på deres effektivitet i forhold til:

1. Fysisk effektivitet som er ratioen af den mængde af opsamlede partikler, der opsamles i forhold til en kendte mængde af partikler i miljøet
2. Biologisk effektivitet som er et mål for den fraktion af den biologiske aktive virus, der er tilbage efter opsamlingen.

For øjeblikket er der en lang række forskellige opsamlingsmetoder til dette formål. Målet med opsamling er at få en biologisk opsamling, som gør det muligt at analysere og i sidste ende detektere levende virus eller virus-RNA i luften. Der er adskillige muligheder tilgængelige for virus som f.eks. SARS-CoV-2 og influenza og i figur 1 præsenterer vi, hvilke metoder der blev brugt i studier publiceret efter januar 2015 og her kan man tydeligt se, at cykloner og filtermetoder er de dominerende efterfulgt af impactorerne og impingerne, hvorimod de mere moderne metoder som vandbaseret kondensation og elektrostatisk præcipitation er lidt sjældnere og først ved at blive benyttet i øjeblikket.

Impactorer og cykloner er baseret på medieafhængige analyser. Fordi de er simple og deres effektivitet er høj kan de opsamle partikler af alle størrelser, eventuelt størrelsesopdelt. På samme måde er den væskebaserede cyklon i stand til at have medie direkte i opsamlingsmaterialet således at virus bliver overført til dyrkningsmediet direkte fra luften og kan bruges sammen med f.eks. en Andersen cascade

impactor. NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) i USA har fremstillet en bioaerosol sampler, som indeholder en impactor med to stadier efterfulgt af et filter, som kan opsamle al materialet fra luften i de forskellige størrelsesfraktioner (8).

Afarter af cykloner med vekslende held i forhold til at bestemme levende virus i luften(9-13). Cykloner har været brugt en del i forbindelse med overvågningen af luftvejsvirus i hospitaler under fugle- og svineinflenzavirus udbrud. I denne forbindelse har det vist sig, at den amerikanske NIOSH-opsamler har været den mest effektive til at indsamle to grunde. Dels kan opsamleren bruges direkte af personen, således at opsamleren sidder i indåndingszonen og derudover er selve systemet optimeret i forhold til de rigtige partikelstørrelser (8).

Impingere er væskebaserede opsamlingsmetoder hvor man bobler luften igennem en væske for at opsamle partikler aerosoliseret i luften direkte i dyrkningsmediet. Fordelen ved at opsamle direkte i det medie man vil dyrke virus i senere er, at overlevelsen af virus forventes at være større. En af ulemperne ved impingerne er, at de har en lav tilbageholdelsesgrad af partikler i den størrelsesorden som levende virus har. Man har derfor forsøgt på forskellig vis at ændre luftstrømningerne inde i selve impingerne ved at ændre i indblæsningsvinklen af luftstrømmen i forhold til væskeoverfladen. Nogle af disse justerede impingere har vist sig mere velegnede til at opsamle partikler, men samtidig har de højere hastigheder i luftstrømmen ført til, at virus bliver inaktiveret ved selve opsamlingsmetoden, hvorfor det er problematisk hvis man bruger impingerne i forhold til at opsamle levende virus til senere dyrkning.

Filtre foretrækkes når impactorer eller impingere ikke er så effektive, dvs. for partikler som er mindre end 500 nm. I disse tilfælde foretrækker man at bruge filtermetoder, som kan opsamle disse meget små partikler i aerosolen. Filterbaserede opsamlingsmetoder er også foretrukket pga. deres mange forskellige håndteringsmuligheder. Samtidig er den lette måde at administrere dem på, samt at de kan være personbåren fordel for studierne. Filterne fanger bioaerosol partikler i membranen. Man kan efterfølgende opløse partiklerne i en væskepræparation før analyserne. Man kan også eksaminere partiklerne direkte under et mikroskop. På trods af den almindelige brug af filtermetoder til at opsamle coronavirus-partikler, er der alligevel en del begrænsninger. Specielt er deres evne til at opsamle levende viruspartikler ikke god, idet de har en destruktiv påvirkning på selvstændige viruspartikler, som er proportional med den opsamlingstid der er nødvendig. På den anden side bibringer filtrene en meget høj opsamlingseffektivitet for partikler, så hvis man ikke er afhængig af levedygtighed eller analyse af levende viruspartikler, er filteret en god måde at opsamle virusrelaterede partikler som f.eks. mRNA i miljøet (14).

Vandbaserede kondensationsmetoder er en ny opsamlingsmetode, hvor virus bliver ført igennem et rør, hvor der tilføres en vandtåge, vandtågen fører til en øgning af partiklernes størrelse, hvorefter de kan kondenseres i en opsamler. Sådanne metoder er blevet testet i forhold til laboratoriestudier og et enkelt studie på et studenterhospital (3). Denne opsamlingsmetode har ført til en meget højere opsamlings-effektivitet, ca. 10 gange i forhold til biosampleren og modelstudier har vist, at ved opsamling af partikler fra helt små (30 nm) og op til 10 mikrometer er opsamlingseffektiviteten over 90%. I feltstudier i et studenterhelsecenter opsamlede forskerne luftbåren virus i højere mængder end hvad der blev opsamlet samme sted med en biosampler. De vandbaserede kondensationsmetoder er således bedre end alt hvad er leveret af de normale samplers til opsamling af levende virus. Opsamlingseffektiviteten for luftbåren virus ligger i eksperimentelle studier på 0,24 til 1,8 % af total levende virus, og i forhold til det totale virus mellem 18 og 80%, hvilket er en størrelsesorden bedre end f.eks. SKC biosampleren. Endvidere viser

højere luftfugtighed sig at føre til en signifikant øget opsamling af virus med disse nye vandbaserede metoder, hvor det ikke fører til nogen ekstra opsamling på SKC samplern.

Vandbaserede opsamlingsmetoder er således effektive fra partikler ned til 8 nm og op til 10 mikrometer og samtidig fører de til, at man opsamler mere levende virus. På den anden side har disse samplere problemer med, at de er meget store og tunge. Derfor kan de ikke være personbårne og de kræver uddannelse for at fungere optimalt i feltsituationer.

Tabel 1 styrker og svagheder ved de forskellige opsamlingsmetoder

Ref	Type	Styrker	Begrænsninger
1	Impaktorer & Cycloner	- Opsamler viruses i forskellige partikel størrelser - Effektiv for store partikler	- Tab til opsamlern - Virus inaktiveres v opsamlingen - Lav effektivitet for små virus partikler
2	Væske impingere	- Forøger viruses overlevelse - Intet behov for at ekstrahere viruses fra overflade el. filter	- Tab til opsamler eller indløb - Lav effektivitet for små virus partikler
3	Filtre	- Effektiv for partikler 20 nm til 10 µm og større - Let at bruge	Virus deaktiveres under opsamlingen pga dehydrering eller ve ekstraktion fra filter.
4	Elektrostatisk Præcipitator	- Størrelsesafhængig opsamlings effektivitet - Energiøkonomisk	- Lav effektivitet for små virus partikler < 1µm - O₃ prod. deaktiverer virus
5	Vandbaseret kondensation	- Effektiv for partikler 8 nm til 10 µm og større - Bevarer levende virus	- Fylder meget - Kompliceret at bruge

Virusopsamlinger og transportmedium

Virusopsamling i biosamplere kan være til forskellige medier. I de studier vi har gennemgået er der brugt destilleret vand, fysiologisk saltvand, fosfat buffer saltvand, vækstmedie og pepton vand og Dulbecco's modificerede eagle's medium. Medierne blev brugt både med og uden antibiotika, f.eks. streptomycin eller penicillin. Nogle er desuden forsynet med et antiskummiddel som fx isoamyl alkohol specielt til impinger systemer. For filtermetoderne findes der vandopløselige geler og filtre som består af gelatine,

som opløses, når de lægges ned på et vækstmedium. Filtrene kan være polytetrafluoroetylen (teflon), cellulose eller nitrat, og disse filtre sættes ofte i seriel forbindelse ved luftafgangen afgang fra impingere og impactorer, således at de opsamler den fraktion af partiklerne, som passerer uden at blive opsamlet i Impingeren eller impactoren. Den metode som oftest anbefales til opsamling af virus er fysiologisk saltvand med fosfat buffer (16).

Opsamlingstid og flow rate

I forbindelse med opsamlingstid og flow rate viser de mange studier, der er foretaget med virusopsamling, at man har adopteret samplingstiden ud fra erfaring med opsamlingsmetoderne i forhold til bakterier eller til støv. Således veksler flow rate fra under 2 liter pr. minut til helt op til 1133 liter pr. minut og tiderne for opsamling varierer fra få minutter til halve dage med en kortere opsamlingstid ved de højere flow rater. For de nye vandbaserede opsamlingsmetoder med kondensation har man vist, at det mest effektive er 7-8 liter pr. minut igennem vækstrøret, hvor man opnår den bedste opsamling af levende virus.

Vækstmedie

I de studier der foreligger p.t. er typen af vækstmedium afhængig af hvilken virus der er tale om og der er ikke nogen entydig konsensus om, hvilken type af vækstmedium der vil være det mest optimale. Der mangler stadigvæk arbejde på dette felt for at få en ensartet opsamling mellem studier og derfor også en ensartet vækst af virus som opsamling.

Transport og analyse af opsamlet materiale

Stort set alle studier valgte at transportere det opsamlede materiale til laboratoriet for yderligere analyse under is. Hvis der var brug for yderligere opbevaring inden analysen, blev det opsamlede materiale overført til en minus 80 graders fryser.

Diskussion

For bedre at forstå hvorledes virustransmission sker igennem luften er det nødvendigt med en nøjagtig prøvetagning af luftbårne vira. Denne proces er vanskelig, idet det er en balance mellem udtagning af tilstrækkelig store mængder luft til at kunne detektere virus og samtidig sørge for at virus ikke uddør underprøvetagningen. Det er afgørende, for mange studier, at prøvetagningen gør det muligt at opsamle virus og bevare levende virus i prøverne. Vi gennemgik over 153 artikler fra januar 2015 til januar 2021 for at forstå de metoder, der i øjeblikket anvendes til aerosolprøvetagning mhp. at bestemme luftbåren virus. Vi fandt forskellige typer opsamlingsmetoder brugt gennem årene, nemlig impingere, impactorer, cykloner, filtre, elektrostatiske precipitatorer og vandbaserede kondensationsmetoder. Størstedelen af undersøgelserne anvendte cykloner og impactorer, som er mindre velegnede til at holde virus levende. Nye opsamlingsmetoder som elektrostatisk udfældning og de vandbaserede kondensationsmetoder, som kan anvendes til virusprøvetagning i luft, anbefales idet disse er bedre i stand til at holde virus levedygtig under opsamlingen. Den hyppigst undersøgte virus i de seneste fem år var SARS-CoV-2 efterfulgt af influenzavirus. De fleste undersøgelser anvendte RT-PCR, q-PCR og dråbe-digital-PCR-baseret detektionsmetode (ddPCR) til at analysere prøver for virusgenomet, hvorimod meget få vurderede om der var levende virus med bevaret infektivitet i luften.

Konklusion

Det er vigtigt, når man planlægger studier af luftbåren virus, at man benytter en metode, der er velegnet til det aktuelle forskningsspørgsmål. Specielt gælder dette for undersøgelse af levende virus, hvor der kræves specielle målemetoder. De klassiske metoder kan alle benyttes til bestemmelse af virusrelaterede partikler, med mulighed for at størrelsesbestemme partiklerne i indsamlingsfasen.

References

1. Kim S-H, Chang SY, Sung M, Park JH, Bin Kim H, Lee H, et al. Extensive Viable Middle East Respiratory Syndrome (MERS) Coronavirus Contamination in Air and Surrounding Environment in MERS Isolation Wards. *Clin Infect Dis*. 2016;63(3):363-9.
2. Liu Y, Ning Z, Chen Y, Guo M, Liu Y, Gali NK, et al. Aerodynamic analysis of SARS-CoV-2 in two Wuhan hospitals. *Nature*. 2020;582(7813):557-60.
3. Pan M, Bonny TS, Loeb J, Jiang X, Lednicky JA, Eiguren-Fernandez A, et al. Collection of viable aerosolized influenza virus and other respiratory viruses in a student health care center through water-based condensation growth. *Mosphere*. 2017;2(5).
4. Walls HJ, Ensor DS, Harvey LA, Kim JH, Chartier RT, Hering SV, et al. Generation and sampling of nanoscale infectious viral aerosols. *Aerosol Science and Technology*. 2016;50(8):802-11.
5. Nikitin N, Petrova E, Trifonova E, Karpova O. Influenza virus aerosols in the air and their infectiousness. *Advances in virology*. 2014;2014.
6. Hall CB. The spread of influenza and other respiratory viruses: complexities and conjectures. *Clinical infectious diseases: an official publication of the Infectious Diseases Society of America*. 2007;45(3):353.
7. Verreault D, Moineau S, Duchaine C. Methods for sampling of airborne viruses. *Microbiology and molecular biology reviews*. 2008;72(3):413-44.
8. O'Brien KM, Nonnenmann MW. Airborne influenza A is detected in the personal breathing zone of swine veterinarians. *PloS one*. 2016;11(2):e0149083.
9. Lei H, Ye F, Liu X, Huang Z, Ling S, Jiang Z, et al. SARS-CoV-2 environmental contamination associated with persistently infected COVID-19 patients. *Influenza and other respiratory viruses*. 2020;14(6):688-99.
10. Binder RA, Alarja NA, Robie ER, Kochev KE, Xiu L, Rocha-Melogno L, et al. Environmental and Aerosolized Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus 2 Among Hospitalized Coronavirus Disease 2019 Patients. *The Journal of Infectious Diseases*. 2020;222(11):1798-806.
11. Ge X-Y, Pu Y, Liao C-H, Huang W-F, Zeng Q, Zhou H, et al. Evaluation of the exposure risk of SARS-CoV-2 in different hospital environment. *Sustainable cities and society*. 2020;61:102413.
12. Lane MA, Brownsword EA, Morgan JS, Babiker A, Vanairsdale SA, Lyon GM, et al. Bioaerosol sampling of a ventilated patient with COVID-19. *American Journal of Infection Control*. 2020;48(12):1540-2.
13. Coleman KK, Nguyen TT, Yadana S, Hansen-Estruch C, Lindsley WG, Gray GC. Bioaerosol sampling for respiratory viruses in Singapore's mass rapid transit network. *Scientific reports*. 2018;8(1):1-7.

14. Pan M, Lednicky JA, Wu CY. Collection, particle sizing and detection of airborne viruses. *Journal of applied microbiology*. 2019;127(6):1596-611.
15. Jiang X, Pan M, Hering SV, Lednicky JA, Wu CY, Fan ZH. Use of RNA amplification and electrophoresis for studying virus aerosol collection efficiency and their comparison with plaque assays. *Electrophoresis*. 2016;37(19):2574-80.
16. Yu H, Afshar-Mohajer N, Theodore AD, Lednicky JA, Fan ZH, Wu C-Y. An efficient virus aerosol sampler enabled by adiabatic expansion. *Journal of aerosol science*. 2018;117:74-84.

Del 5: Målemetoder relateret til luftbårne smitte

5.2 Ventilationstekniske målemetoder

Generel

Måling af luftbårne smitte relateret til ventilation er almindelig og kombineres med målinger af lufttemperatur, hastighed, relativ fugtighed, CO₂ osv. For at identificere indendørs miljø og eksponering af menneske. Målingerne i forbindelse med luftbårne transmission inkluderer generering af luftbårne mikrodråber, karakterisering af udåndede luftstrømme og dråber, måling af deres transport i bygningen, mellem rum, inden for enkelte rum og i ventilationssystemet. De mest sofistikerede metoder, der typisk anvendes under laboratorieforhold, inkluderer også eksponeringsvurdering ved målinger i luft indåndet af termiske dukker med kunstig lunger. Sporgas bruges oftest til at simulere luftbårne mikrodråber med en størrelse mindre end 5 µm. Disse målinger er relativt lette, hurtige og med tilstrækkelig nøjagtighed. Multikanal gasanalyser kan bruges til at udføre samtidige målinger af sporgas koncentration i flere punkter og således til at vurdere volumens og tidsmæssige ændringer i transporten af sporgas. Målinger baseret på transport af partikler er også almindelige. I dette tilfælde genereres typisk monodisperse partikler med forskellig størrelse, og deres antal og koncentration måles. I nogle tilfælde, for eksempel når eksponering af mennesker for mikrodråber genereret på grund af hoste undersøges, polydisperse partikler anvendes. Flow-visualisering er en enkel metode til at forstå luftfordelingen i rum og mellem rum og bruges til hurtig vurdering af potentialet for eksponering for luftbårne partikler.

Indhold i sektionen: Ventilation og transmission af patogener i luften - dannelse af patogener, transport af patogener og eksponering for patogener. Ventilationsmålemetoder relateret til luftbårne transmission af patogener (inklusive COVID-19). Eksempler. Praktiske overvejelser.

Luftbårne smitte af patogener og relaterede ventilationsmålinger

Processen med luftbårne smitte inkluderer følgende faser: generering og transport af mikrodråber med vira, eksponering og infektion. Disse trin diskuteres kort i det følgende med fokus på de nødvendige ventilationsmålinger for at reducere risikoen for luftbårne smitte.

Generating

Som allerede diskuteret i de foregående kapitler under vejtrækning genereres og udvises partikler (dråber) af forskellig størrelse (0,05-500 µm) fyldt med vira, især af asymptomatiske og præ-symptomatiske inficerede mennesker (Lindsley et al. 2012, Lee et al., 2019, Leung 2020). Størrelsen af et betydeligt antal partikler er mindre end 10 µm. Under normal menneskelig tale hastigheden af generet partikler er positivt korreleret med lydstyrken (amplitude) af vokalisering (Asadi et al. (2020). Hastigheden af den udåndede strømning under vejtrækning er forskellig mellem mennesker og er blevet målt i området 1- 2 m/s (Ai et al. 2019, Xu et al. 2015, Tang et al. 2013, Xie et al. 2009). Udåndet flow har højere hastighed under samtale, hoste og nysen. På basis af eksperimentelle resultater og teoretiske modeller Lee (2020) rapporterede, at minimumsstørrelsen af en åndedrætspartikel, der kan indeholde SARS-CoV-2, beregnes til ca. 4,7 µm. Med tiden størrelsen af partiklerne bliver mindre på grund af fordampning af vand på partikeloverfladerne. Dette resultat (skal undersøges nærmere) er vigtig for de ventilationsmålinger, der diskuteres i det følgende.

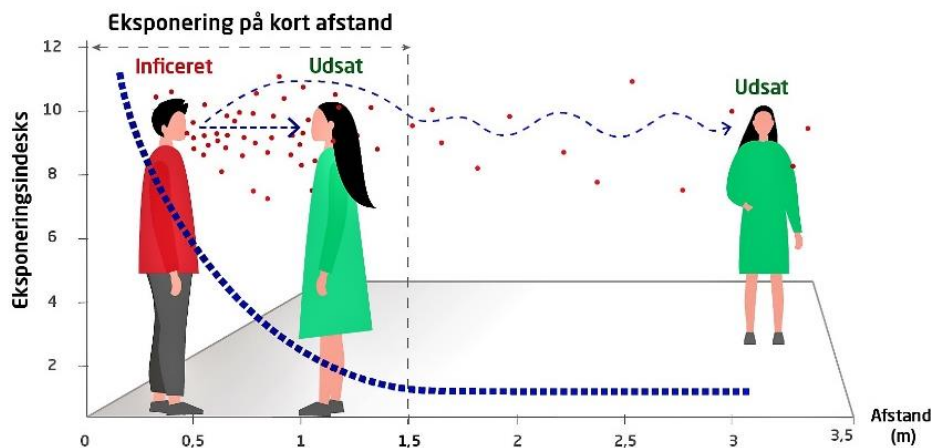
Transport

Processen af mekanisk eller naturlig ventilation genererer luftbevægelser i rum. Luftbevægelse på grund af termiskstrømninger genereret af opvarmede/kolde genstande findes også i rum uden ventilation. Luftbevægelsen transporterer åndedrætspartikler genereret af mennesker. Afstanden, hvor partiklerne med forskellig størrelse vil blive transporteret, og den tid de vil blive i luften, afhænger af luftstrømskarakteristika (hastighed, retning, turbulens, temperatur, fugtighed osv.). Partikelstørrelse og hastighed de udvises (dvs. type respiratorisk aktivitet), kropsholdning af den person der genererer partiklerne, individuelle forskelle mellem mennesker osv. Partiklerne kan transporteres over længere afstande i mekanisk ventilerede rum med en gennemsnitlig hastighed i den opholdszone på ca. 0,2 m/s (Hanzawa et al. 1897) sammenlignet med i de fleste boliger, hvor hastigheden er lavere, ca. 0,05 - 0,1 m/s (Melikov et al. 1988). I en vis afstand lander de større partikler på overflader (gulv, møbler krop osv.). De små partikler kunne forblive i luften i flere timer (Friedlander 2000). De luftbårne partikler kan inhaleres af andre mennesker og til sidst overføre infektion (Lee 2020). Viden om luftstrømskarakteristika i rum hjælper således med at vurdere transporten af luftbårne åndedrætspartikler og potentialet for indånding af partiklerne af andre mennesker, inden de fjernes fra rummet.

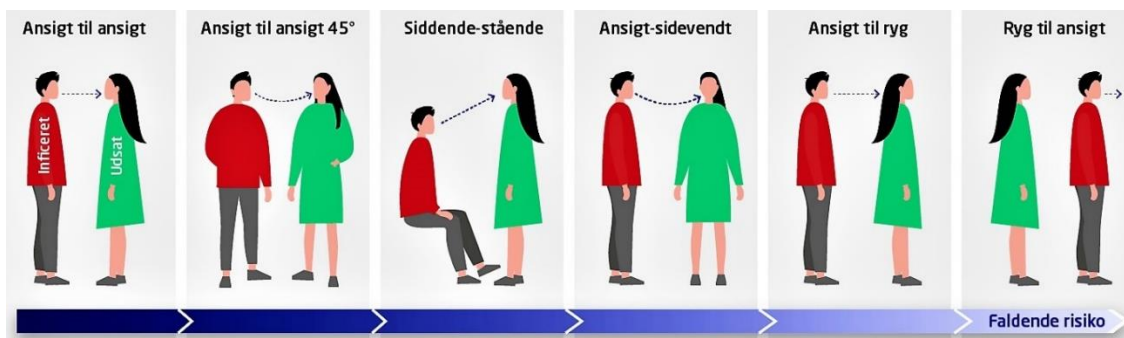
Eksposering

Infektion afhænger af eksposering (inhaleret dosis af partikler med vira) og tid. Med hensyn til afstanden mellem inficeret og eksponeret person kan der defineres kortafstand eksposering for store og små partikler og eksposering over lang afstand hovedsageligt for små luftbårne partikler. Resultater af forskellige undersøgelser, opsummeret og forenklet i fig. 1, afslører at under typiske indendørs omgivelser forekommer kortafstand eksposeringen op til 1,5 m afstand mellem inficerede og udsatte personer (Bjørn og Nielsen 2002, Liu et al. 2017, Ai og Melikov 2018). Over 1,5-2 m afstand er langafstand eksposering dominerende. Kortafstand eksposering er meget højere end langafstand eksposering. Kortafstand eksposering afhænger af den komplekse interaktion mellem den frie konvektionsstrømning omkring den "inficerede" og "modtagelige" personer (Olmedo et al. 2012, Olmedo et al. 2013, Liu et al. 2014, Nielsen et al. 2014, Melikov 2015, Licina et al. 2016, Zukowska et al. 2012), den vejtrækningsstrømning (Ai et al. 2019), strømning genereret af baggrundsventilation (Cermak og Melikov 2006, Nielsen et al. 2008, Olmedo et al. 2013, Sun og Zhai 2020, Ai et al. 2019), placeringen og orienteringen af de "inficerede" og "modtagelige" personer (fig. 2) samt andre faktorer (Nielsen et al. 2012, Liu et al. 2014, Olmedo et al. 2013, Liu et al. 2017, Ai og Melikov 2018). Baggrundsventilation har stor betydning for langafstand eksposering. Det er vigtigt, hvor meget den rene ventilationsluft blandes med den lukkede rumluft. Dette er dog ikke altid tilfældet i praksis (Ai et al. 2019). Det er også et spørgsmål om at øget ventilation (dvs øget tilføjelse af udeluft) genererer høj hastighed, som ikke er acceptabel af mennesker (Nielsen 2009).

Ovenstående diskussion afslører, at eksposering over langafstand kan vurderes ved relativt enkle ventilationsmålinger, mens vurdering af eksposering over kortafstand vil kræve sofistikerede målinger som er præsenteret senere i dette afsnit af rapporten.



Figur 1. Eksponering som funktion af afstanden mellem inficerede og udsatte personer (Ai and Melikov 2018, DTU Byg Analyse 1 2020).



Figur 2. På kort afstand indendørs (under 1,5 meter) er risikoen for luftbåren infektion bl.a. afhængig af, hvordan udsatte personer og inficerede er placeret i forhold til hinanden (Ai et al., 2019; DTU Byg Analyse 1 2020).

Infektion

Luftbåren smitter sker, når virusbelastede partikler sætter sig på slimhinder. Smitter transmissionseffektiviteten påvirkes af indendørs (og udendørs) sæsonmæssige miljøfaktorer. Lufttemperatur og relativ fugtighed påvirker luftvejsvirusens stabilitet og overførbare i luften (Moriyama et al. 2020, Lee 2020). En af funktionerne af næsen er at "konditionere" den inhalerede luft, dvs. at varme og fugte den. Luften er dog mindre konditioneret ved indånding gennem munden (i tilfælde af talende mennesker, tilstoppet næse osv.). En virus, der kommer ind i luftvejene, skal først finde epitelceller for at invadere værten. Slimlag dækker cellerne og fælder effektivt virussen, inden den kan komme ind i værtscellen. Inhalationsluftens temperatur, fugtighed og strømningshastighed påvirker masseoverførslen i de øvre luftveje og kan forårsage dehydrering af slimlaget. Under denne betingelse udsættes cellerne for de inhalerede vira. Dehydrering vil være minimal, når den inhalerede luftes relative fugtighed er høj (over 80%) og dens temperatur på 37 ° C (tæt på kroppens kernetemperatur).

Ovenstående beskrivelse er meget forenklet, men den viser, at rumluftens temperatur og fugtighed er vigtig for transmission af infektion. Deres måling kan hjælpe eksponeringsvurderingen.

Forudsigelse af smitterisiko

Under konstant andre forhold afhænger eksponeringen over lang afstand af ventilationsstrømmen. Forøgelse af ventilationsstrømmen reducerer risikoen for luftbåren smitte. Derfor er det under pandemi vigtigt at øge tilførslen af ren luft til rum langt over komfortkravene i standarderne. Flere modeller er blevet

udviklet til at forudsige risikoen for lang afstand eksponering. Blandt andre parametre viden om ventilations luftmængde er nødvendig. Vigtigheden af luftmængden og eksponeringstid for smitterisikoen er dokumenteret i COVID-19-vejledninger (REHVA 2020) og er ikke i fokus i dette afsnit af rapporten. Usikkerheden ved forudsigelserne kan være stor på grund af begrænset viden om flere af de nødvendige parametre. En vigtig begrænsning af forudsigelserne er antagelsen om fuldt luftblanding i rum, som ofte ikke er opfyldt i praksis (Melikov 2016). Derfor nøjagtig målinger af ventilationsluftmængde og forureningsfordeling i rum er nødvendigt. For nylig er mere avancerede modeller er udviklet. Modellerne tag hensyn af luft-og forurening i rum (Zhang og Lin 2021, Shao og Li 2020, Liang et al 2021).

Resumé af nødvendige ventilationsmålinger

Baseret på ovenstående diskussion kan følgende ventilationsmålinger i rum relateret til luftbåren smitter af patogener (inklusive COVID-19) defineres:

- Ventilationsluftmængde
- Lufttemperatur og relativ fugtighed
- Visualisering af luftbevægelse i rum
- Luftstrømningsegenskaber inklusive hastighed, retning og turbulens
- Koncentration af luftbårne partikler.

I den følgende diskussion er kun teknikker, der er udbredt under laboratorie- og feltmålinger, inkluderet. Når det er relevant, kort diskuteres avancerede måle metoder.

Ventilationsmålinger: parametre, metoder og instrumenter

Ventilationsluftmængde

Måling af volumetrisk eller massestrøm for luft gennem et ventilation system er en af de metoder, der anvendes i praksis. Metoden er baseret på måling af: trykforskel (Venturi og dyse flowmålere), forskydning af flowvolumen, hastighedsmåling på tværs af kanaler ved gennemkørsel af transducere (Pito-rør, termisk anemometer osv.), lydbølgetransmittans (ultralyds flowmåler) osv. Luftstrømsmålehætter bruges til at bestemme ventilationsluftmængden ved luftforsyningsarmatur. Bestemmelse af ventilationsstrømning baseret på måling af sporgasskoncentration i kanaler og i rum (build-up, constant and decay methods) er også meget udbredt. Disse metoder er godt beskrevet i litteraturen (Awbi 2016). Nogle af metoderne er standardiserede (ASTM E741 - 11 2017, ASTM D 6245 2018). Derfor vil de ikke blive diskuteret yderligere i denne rapport.

Måling af lufttemperatur og relativ fugtighed

Temperatur er et mål for molekylerne kinetiske energi. Det måles inden for og er forbundet med et relativt lille volumen eller med et område. Lufttemperatur i rum er en skalær egenskab, der svinger i tid og er forskellig fra punkt til punkt. Typisk er temperatursvingningerne i den besatte zone i lokaler lave (Melikov et al. 1997). Derfor er viden om middelværdier i tidstemperatur tilstrækkelig til at karakterisere termiske forhold i et rum. Fordeling af lufttemperatur i rum afhænger af ventilationsluftstrømmen, termiskstrømninger genereret af varme/kolde genstande og deres interaktion. Derfor er målinger kun på et punkt i rum ofte ikke tilstrækkelige. Lufttemperaturmåling i fire højder (0,1, 0,6, 1,1 og 1,7 m) over gulvniveau anbefales i standarderne (ISO-standard 7726, ASHRAE-standard 55). Når rumluftfordeling undersøges, anbefales målinger i adskillige punkter (ASHRAE Standard 113 2013). Temperaturmålinger kan udføres på et stort antal punkter med flere temperaturtransducere tilsluttet til et flerkanals termometer.

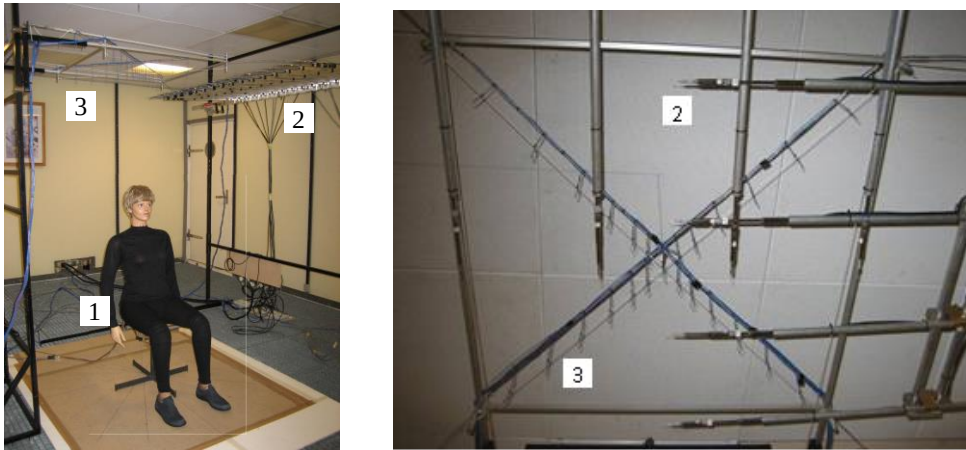


Fig. 3. Måling af opadgående termisk strømning over termisk dukke: 1 - termisk dukke, 2 - arm af traverserende system med lufthastighedsfølere og termoelementer, 3 - system med 29-termoelementer for temperatur målinger (Zukowska et al. 2010).

Temperaturmålinger i åndedrætszonen sammen med lufthastigheds- og koncentrationsmålinger hjælper med at forstå luftstrømsinteraktionen og dermed spredningen af udåndet luft, der kan blive inficeret. I dette tilfælde er der relativt store og hurtige temperaturfluktuationer (vejtrækning er forbigående). Viden om øjeblikkelig og middeltemperatur samt dens standardafvigelse er vigtig. Brug af termometre med kort responstid ($<0,2$ s) er påkrævet. Eksempler på sådanne målinger er illustreret i figur 3.

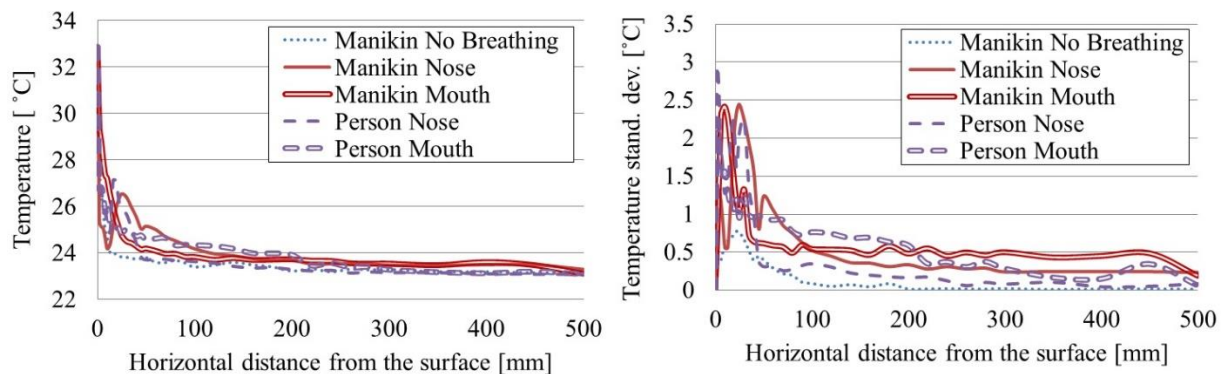


Fig. 4 Gennemsnitlig lufttemperatur (til venstre) og standardafvigelse af lufttemperaturfluktuationer (højre) fordeling i åndedrætszonen for en åndedrætsdukke og et menneske sammenlignes (Licina et al. 2015)

Temperatur måles ved indvirkning på væskeegenskaber (volumetrisk termisk ekspansion, elektrisk modstand, termoelektricitet). Modstandstermometre anvendes til målinger inden for indendørs miljø. Målingerne er baseret på veldefineret forhold mellem temperatur og elektrisk modstand hos udvalgte metaller (platin, nikkel) eller halvledere med negativ (NTC) eller positiv (PTC) temperaturkarakteristik. Elektromagnetisk kraft genereres, når to forskellige metaller (for eksempel jern/konstantan, kobber/konstantan osv.) er i kontakt. Den elektromagnetiske kraft afhænger af metal og kontakttemperatur. Der findes spændingsforskel mellem to kontaktpunkter med forskellig temperatur. Spændingsforskellen er direkte mål for temperaturforskellen i de to kryds.

Under laboratoriemålinger anvendes flerkanalets termometre. Under feltmålinger bruges ofte en-kanals termometre til at udføre målinger i flere punkter i lokaler. Imidlertid anvendes i nogle tilfælde multikanaltermometre også under feltundersøgelser til at udføre målinger i flere anbefalede i standardhøjder. Typisk måles fugtighed i et referencepunkt i lokaler.

Fugtighedsmålinger er baseret på absorptions-, fordampnings- og kondensprincipper. Nogle af måleinstrumenterne er hårhygrometer (ændring i dimensioner af naturligt eller syntetisk materiale som reaktion på ændringer i fugtighed), våd-og-tør pærepsykrometer (baseret på to identiske termometre, hvoraf den ene har en fugtig væge, der omgiver sin pære), elektrolytisk hygrometer (baseret på Faradays lov om elektrolyser), capacitive, resistive og impedanshygrometre (baseret på måling af kapacitans, impedans eller modstand, når hygroskopisk medium er klemmt mellem to elektrisk ledende lag, hvoraf den ene er permeabel for vanddamp) osv. Måling af fugtighed er beskrevet i litteraturen og kravene til måleinstrumenter er defineret i standarderne (ISO 7726 1998). Disse vil ikke blive diskuteret i denne rapport.

Visualisering af rumluftbevægelse

I nogle rum eller zoner i rum har luftstrømmen et stabilt fordeling. I sådanne tilfælde kan visualisering bruges til at få hurtig forståelse af den mulige transportvej for udåndede aerosoler. Teknikken er baseret på anvendelse af væske (f.eks. Propylenglykol) til at generere tåge og detektere og "markere" luftstrømmen, visualisere turbulens og strømningsretning og potentiel recirkulationszoner. Tågen er giftfri, bakteriefri og nedbrydes fuldstændigt, f.eks. i kuldioxid og vand. Tågen kan tilføjes til luften, der tilføres fra diffusorerne (fig. 5) eller ethvert punkt i et rum. Metoden kan bruges til at visualisere opdriftsstrømme, såsom fri konvektionstrøm omkring menneskets krop, termisk strømning over kroppen, vejtrækningsstrøm (fig. 6) såvel som interaktion mellem disse strømninger. Laserlys bruges ofte til at opnå bedre visualisering. En vigtig overvejelse er at bruge tågemaskiner, der ikke genererer varme og luftstrømning der forstyrrer målingerne.

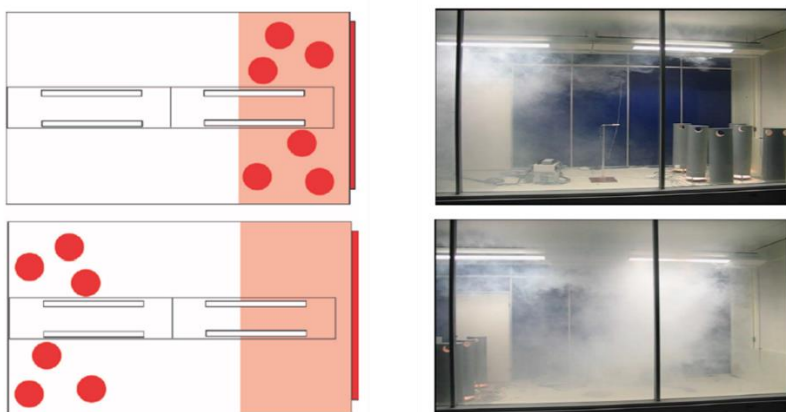


Fig. 5. Røg tilsættes i den indblæsnings ventilationsluft. Øverst: stærk opdrift, som genereres af et opvarmet vindue og opvarmede cylindre (simulerer beboere, der sidder i nærheden af vinduet) afleder strømmen fra køle-baffler til den modsatte side af rummet. Bund: blanding opnås, når varmebelastningen spredes på de to sider af rummet.



Fig. 6. Visualisering af luft der udåndes gennem munden af åndedrætsdukke.

Andre metoder, der er mest egnede til anvendelse under laboratorieforhold, er Schlieren optisk teknik (Settler 1998), termografi (Homma et al. 1987) osv. Den optiske flowvisualiseringsteknik fører en lysstråle gennem strømmen og undersøger ændringer forårsaget af temperaturforskelle. Dette er muligt, fordi det optiske brydningsindeks for luft varierer lineært med temperaturen. Eksempler på visualisering med denne teknik er vist i fig. 7. Denne metode er anvendelig til at visualisere den komplekse luftstrømsinteraktion i tilfælde af kortvarig eksponering for respiratoriske patogener.



Fig. 7. Schlieren-fotografier i fuld skala: a) person b) stående pige (Settles 1997).

Målinger af lufthastighed

Luftstrømning findes i mekanisk og naturligt ventilerede rum. Luftbevægelse, typisk svag, er til stede i rum uden ventilation på grund af termisk strømninger og infiltration. Som allerede diskuteret transporterer luftstrømmen omkring en inficeret person genererede luftbårne virusbelastede dråber væk, hvilket øger risikoen for smitter til andre mennesker. Derfor er hastighed, temperatur og forurening (gas og partikler) koncentration er vigtige strømningsegenskaber, der skal kendes. Måling af lufttemperatur var allerede diskuteret. Fokus for diskussionen i dette afsnit vil være på hastighedsmålinger. Partikel og gas målinger vil blive diskuteret i det følgende afsnit.

Hastighed defineres som ændringshastigheden (tidsderivat) for fortrængning af væske. Det er hastighed i en bestemt retning. Hastighed er således en vektormængde, hvorimod fart er en skalarmængde. I rum (såvel som udendørs) svinger størrelsen og hastighedsretningen i tid, dvs. det er stokastisk parameter. For

at beskrive og sammenligne strømme på en enkel måde er middelhastighed (V_m), standardafvigelse af hastighed (SD_v) og turbulensintensitet (Tu) defineret (fig. 8). Den øjeblikkelige hastighed i gennemsnit beregnet i tiden definerer gennemsnitshastigheden, udsvingene for den øjeblikkelige hastighed omkring gennemsnitshastigheden definerer standardafvigelsen af hastigheden og standardafvigelsen divideret med den gennemsnitlige hastighed definerer turbulensintensiteten. Det er vigtigt at bemærke, at disse parametre i rum er forskellige fra punkt til punkt og i tid.

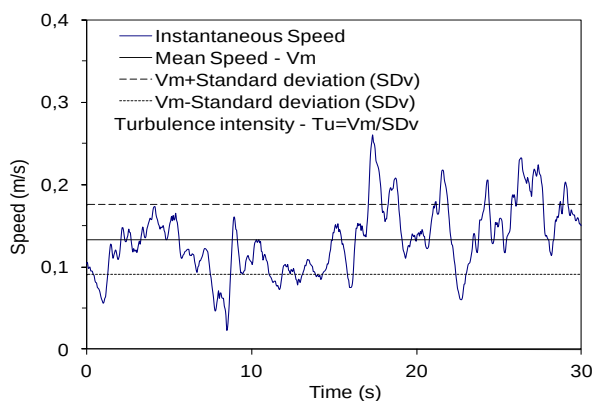


Fig. 8 Definition af grundlæggende lufthastighedsegenskaber, der er vigtige for transport af udåndede luftbårne dråber.

I dag lufthastighed (hastighed) måles til identifikation af termisk komfort, luftfordeling i rum og transport af forurening (inklusive aerosoler) ved hjælp af lavhastigheds termo-anemometre (LVTA) med hastighedsføler der ikke er følsom på strømnings retning (figur 9). Typisk måler instrumenterne hastigheden i området 0,05 - 5 m/s. Der anvendes også Transducere med temperaturfølere der måler lufttemperaturen i området 10 - 35 ° C. Skitse af transducere med forskellig design, der anvendes til måling med lav hastighed, er vist i figur 10. Kugleformede hastighedssensorer (opvarmet sensor) har di metre mindre end få millimeter. De opvarmes elektrisk 10-30 ° C over lufttemperaturen. Den anden sensor måler lufttemperaturen, og den bruges til temperaturkompensation. Typisk sikrer CTA (konstant temperatur anemometer) tilstand instrumenternes hurtige respons. Den nødvendige mængde termisk energi til overophedning af en sfærisk sensor afhænger af lufthastigheden. Udgangssignalet fra LVTA'er afhænger ikke lineært af hastigheden. Hver hastighedssonde skal kalibreres individuelt i en vindtunnel med lav hastighed, og kalibreringskurven skal lagres i instrumentet for at konvertere signalet til hastigheden. Automatisk lufttemperaturkompensation bruges til langsomt at ændre hastighedssensortemperaturen og holde anemometersignalet uafhængigt af lufttemperaturændringerne. Størrelsen af hastighedsføleren skal optimeres for at opnå en hurtig respons og en acceptabel lav påvirkning af naturlig konvektion fra hastighedsføleren. Nøjagtigheden af lufthastighedsmåling ved hjælp af LVTA'er er et ret komplekst spørgsmål. Fejl i måling af lufthastighed kan skyldes naturlig konvektion, retningsfølsomhed for hastighedssensoren, frekvensrespons, kalibrering, konvertering og reproducerbarhed, hastighedsgradient, temperaturkompensation, temperaturgradient, lufttemperaturudsving, variationer i barometertryk, fugtighedsvariationer osv. Forskning (Melikov et al. 2007, Popiolek et al. 2007) har vist, at ved hjælp af LVTA'er kan den gennemsnitlige lufthastighed måles med en nøjagtighed på $\pm (0,025 + 0,04va)$, hvilket er bedre end den nøjagtighed, der kræves i ISO7726-standarden (1998).

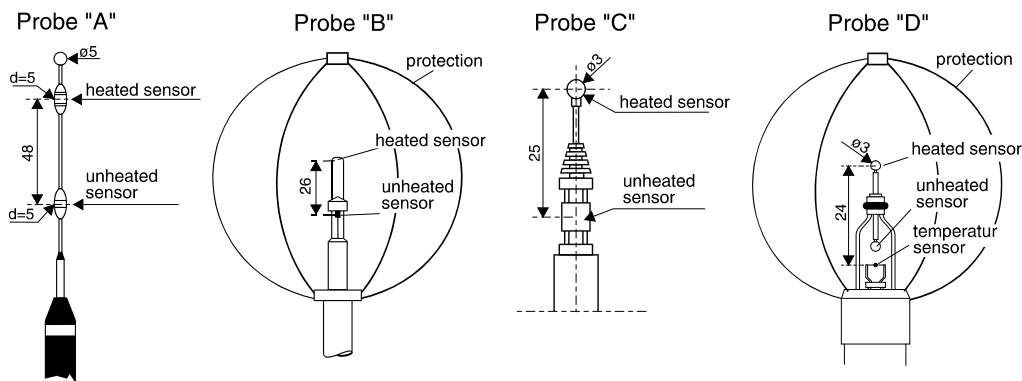


Fig. 9 Transducere af forskellig udformning anvendt med termiske anemometre med lav hastighed

Til meget hurtig hastigheds målinger (normalt under feltmålinger) anvendes anemometre med en transducer. Anemometre med flere transducere måler på samme tid hastighed og temperatur på flere punkter. Disse anemometre anvendes under laboratorieundersøgelser såvel som under feltmålinger (fig. 10).



Fig. 10 Lavhastighedsanemometer med flere transducer anvendes til måling omkring lufttilførselsarmatur og b) under feltmålinger (4 hastigheds- og temperaturtransducere er fastgjort til armen på en vogn med forskellige måleinstrumenter).

Soniske anemometre bruges også til at udføre hastighedsmålinger indendørs. Lufthastighed måles ved transmission og modtagelse af lydssignaler i to ortogonale retninger. Signaler transmitteret mod strømningsretning modtages på kortere tid end signal transmitteret langs strømmen. Forskellen i transmissionstiden er et direkte mål for flowhastigheden. Hurtige hastighedsændringer i en, to eller tre retninger måles. Et eksempel på lydtransducer er vist i fig. 11. Instrumentet reagerer hurtigt på hastighedsændringer, da der ikke er nogen bevægelige dele, der kommer i dynamisk ligevægt med luftstrømmen. Sonisk anemometer kan også måle lufttemperaturen, når signalet behandles i overensstemmelse hermed. Den hurtige reaktion og detektion af strømningsretningen er fordele ved denne metode. Ulempen ved metoden er sensorens størrelse (ca. 25 mm). På grund af størrelsen er soniske anemometre ikke egnede til måling i strømme med store hastighedsgradienter. En anden ulempe ved disse vindmålere er, at de ikke måler lufttemperaturen.

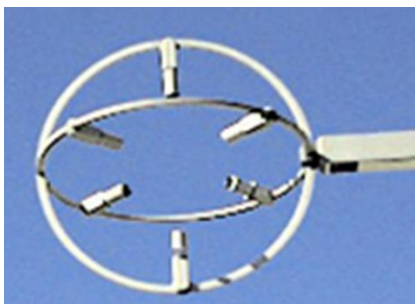


Fig. 11 Transducer af sonisk anemometer

I forhold til transport af patogener i rum giver målinger med anemometre med lav hastighed og soniske anemometre vigtig information til vurdering af afstanden åndedrætspartikler af forskellig størrelse kan rejse og den tid, de forbliver suspenderet i luften.

For at karakterisere den udåndede luftstrømning, strømmen omkring menneskekroppen og strømningen i rummet og deres interaktion anvendes Schlieren-fotografering og Partikelbillede Velocimetry (PIV) og punkt målinger udføres med Laser Doppler-anemometre (LDA) (Licina et al. 2015, Finkelstein et al. 1996, Melikov and Zhou 1996). Disse vil ikke blive diskuteret detaljeret.

Målinger af koncentration af luftvejsbårne partikler

Koncentrationen af luftbårne åndedrætspartikler i luften er en af de vigtige parametre til forudsigelse af risikoen for luftbåren smitter. Koncentrationsmålinger under stationær forhold (langvarig eksponering) og transient forhold (kortvarig eksponering) er vigtige. Målet med målingerne kan være at bestemme den øjeblikkelige koncentration eller det gennemsnitlige koncentrationsniveau over en bestemt periode (dag, uge, måned). Valget af et passende instrument og dets karakteristika afhænger af formålet med målingen. F.eks. målinger relateret til risikovurdering i tilfælde af kortvarig eksponering, hvor den transient vejtrækningsstrømning er vigtig, vil kræve brug af instrumenter med hurtig responstid, mens eksponering i lang afstand kan udføres med relativt langsomme målinger. Prøveudtagningstiden er også vigtig at overveje. En anden vigtig overvejelse er den nødvendige datapræcision og målenøjagtighed. Præcisionen giver lignende resultater under flere målinger, mens nøjagtigheden beskriver, hvor tæt den målte koncentration er på den reelle koncentration.

Partikler

Undersøgelse af partikler i indendørs miljøer kan dække målinger af partikelkoncentration defineret ved antallet af partikler i et luftvolumen (typisk i cm^3) eller identifikation af partiklen massekoncentration i en luftprøve. For de udåndede dråber anvendes måleteknikker til at karakterisere størrelsesfordelingen og koncentrationen af dråbernes tørre rester, samt teknikker der kan måle dråbestørrelse og hastighed forskellige steder i luftstrømningsfeltet. Udviklingen af dråbestørrelse og hastighed væk fra kilden er endnu ikke grundigt eksperimentelt undersøgt. Talrige instrumenter til partikelmålinger er tilgængelige og anvendes. Direkte gravimetrisk målinger bruges til at bestemme massekoncentration på industrielle arbejdspladser, hvor indeluften kan indeholde en stor mængde suspenderede partikler. Optiske partikelinstrumenter er de mest anvendte instrumenter til at bestemme både antallet og massekoncentrationen af partiklerne i den indendørs luft. De er konstrueret af en lyskilde (typisk en laserdiode), et målekammer, en pumpe, der trækker luften gennem kammeret, og en lysdetektor. Detektoren måler enten den mængde lys, der er blokeret af partiklen, eller måler den mængde lys, der spredes væk fra den retningsbestemte lyskilde. Partikler kan tælles og dimensioneres på samme tid. Instrumenterne er typisk håndholdte, lette og batteridrevne.

Princippet om lysspredning af mikrodåber bruges også til at bestemme aerosolmassekonzentrationen. Svaret er lineært, det vil sige for en monodispers aerosol, en partikel spreder en fast mængde af lys; to partikler spreder dobbelt så meget lys; og 10 partikler spreder 10 gange så meget lys. Det spredte lys afhænger af partikelstørrelsen, som er specielt kalibreret.

Partikeltællere med filtre til partikler af forskellig størrelse (0,5, 0,7, 1, 3 osv. μm) er tilgængelige. Instrumenterne har forskellige koncentrationsgrænser (antal partikler/ cm^3) og tælleeffektivitet afhængigt af partiklernes størrelse. Ofte anvendes partikelgeneratorer under undersøgelser. Typisk genereres monodisperse partikler med forskellig størrelse, og deres antal og koncentration måles. I nogle tilfælde, for eksempel når eksponering af mennesker for mikrodåber genereret på grund af hoste undersøges, genereres og måles polydisperse partikler (Wan et al. 2008).

At udføre eksperimenter med partikler er udfordrende på grund af partiklernes komplekse natur og meget variable størrelser. Instrumenterne måler i et enkelt punkt. For at opnå god forståelse af partikeltransporten skal der således udføres lang tid og gentagne målinger, især under ikke-stationære forhold. Det er ofte praksis at udskifte partikelmålingerne med sporstofmålinger. Fordelene ved kun at bruge sporgas i eksponeringsmålinger er den nemme og billige opsætning, muligheden for prøveudtagning mange steder og den relativt enkle behandling af de målte data. På den anden side kan gassen ikke bruges som en kompleks erstatning for partikler i alle størrelser på grund af de forskellige fysiske kræfter, der virker på dem. Desuden har partikler forskellige morfologier og former, hvilket gør forenklingen af brugen af sporgas som surrogat endnu vanskeligere. Kun få undersøgelser har foretaget direkte sammenligninger af sporgas og partikeladfærd i ventilerede rum. Zhang et al. (2009) fandt ud af, at fordelingen af SF₆-sporgas og 0,7 μm partikler i en luftkondensering fuldskala passagerfly kabine mock-up var ens. Noakes et al. (2009), simuleret et hospitaliseringsrum med opblandingsluftfordeling (10 luftskifter i timen (10 ACH)), viste god overensstemmelse mellem opførslen af N₂O-sporgas og 3-5 μm partikler, som begge blev frigivet fra en opvarmet cylinder (ligner en patient i sengen på hospitalets isolationsrum). Beato-Arribas et al. (2015) rapporterede, at CO₂-sporgas og aerosoliseret *Bacillus Subtilis*-bakterier er sammenlignelige i deres distribution i en enkelt isolationshospital mock-up ventileret ved 12 ACH. Bivolarova et al. (2017) rapporterede, at N₂O-gaskonzentration opstod som en pålidelig forudsigelse for eksponering for monodisperse partikler i tre størrelser (0,07, 0,7 og 3,5 μm) alle partikler i forskellig størrelse blev målt ved vejtrækningszonen for en termodukke, der lignede en siddende beboer i et kontorværelse. De rapporterede også, at en ændring i ventilationsluftmængde ikke påvirkede forskellen i koncentrationsfordeling mellem sporgas og større partikler. Forøgelse af rumoverfladearealet påvirkede ikke ligheden i dispersionen af aerosolpartiklerne og sporgassen. Resultaterne af de ovennævnte henviste undersøgelser afslører, at sporgas kan anvendes til at indikere transport af udåndede virusbelastede luftbårne aerosoler med en størrelse op til 10 μm .

Målinger af sporgas koncentration

Konzentration af sporgas er resultat af en massebalance. Under forudsætning af stationære forhold, tilførselsventilationsluften er ren, dvs. koncentrationen af sporgas $C_v = 0$, og sorption finder ikke sted den gennemsnitlige koncentration i et rum, C , beregnes som forholdet mellem emissionshastigheden for luftbårne partikler, G og ventilationen luftmængde, Q :

$$C = G / Q$$

Når kilden, dvs. den inficerede person, fjernes fra rummet, henfald af den oprindelige koncentration (C_0) kan beregnes ud fra følgende ligning:

$$C(t) = C_0 e^{-(Q/V)t}$$

Hvor V er rumvolumen og t er forløbet tid.

De fleste modeller i litteraturen om vurdering af eksponeringsrisiko opnås ved konstant forureningskoncentration, dvs. under stationær forhold. Under transient forhold, såsom variabel luftstrømningshastighed, ændringer i de genererede luftbårne partikler, når infektoren forlader rummet osv., beskriver den målte koncentration kun på det tidspunkt, hvor målingerne foregår. Derfor skal der foretages målinger på stedet over et bestemt tidsrum.

Elektrokemiske sensorer, halvledersensorer, katalytisk brændbare sensorer, spektroskopi, nær infrarød spektroskopi (NIRS), fotoakustisk spektrometri, gaskromatografi, massespektrometri anvendes til at udføre gaskoncentrationsmålinger (Corgnati et al. 2011). Instrumenter med en lille tidskonstant bør bruges til at vurdere eksponering under transient forhold, for eksempel kortvarig eksponering (Kierat et al. 2018, Ai et al. 2019).

Udåndet CO₂ som proxy for respiratoriske patogener (inklusive COVID-19)

I rum er mennesker den vigtigste kilde til CO₂. CO₂ er blevet foreslået som en praktisk proxy for overførsel af infektionssygdomme i luftvejene, fordi det udåndes sammen med virusbelastede aerosoler (Rudnik og Milton 2003). Fremgangsmåden er attraktiv, fordi indendørs CO₂-målinger af lavprissensorer udføres i dag. Peng og Jimenez (2020) afledte analytiske udtryk af CO₂-baserede risikovurderinger og anvende dem i forskellige typiske indendørsmiljøer. Denne fremgangsmåde skal dog anvendes med forsigtighed af følgende årsager. For det første er store usikkerheder på grund af ukendt virusudåndingsmængde til stede i forudsigelserne. En anden begrænsning er relateret til usikkerheden ved CO₂-målingerne på grund af deres pålidelighed, herunder den lave nøjagtighed af de anvendte sensorer og store forskelle i aflæsninger afhængigt af placeringen i rum, hvor sensoren er placeret. En anden vigtig begrænsning af metoden er antallet af kilder, dvs. inficerede personer, der er til stede i rummet.

Den evaluering af risiko for luftbåren smitter baseret på målinger af sporgas er særlig nyttig inden for byggede miljøer (Zhang og Lin 2021). I et fuldskala rumeksperimenter udføres målinger af sporgas frigivet på stedet for en inficeret person. Forskellige sporingsgasser kan frigives flere steder samtidigt for at spare tid og undersøge vigtigheden af placeringen af den inficerede person.

Målinger med åndedræts termisk manikin

Åndedrætsdukker bruges til at udføre målinger af luftbåren smitter og eksponering (Brohus og Nielsen 1996; Bjørn og Nielsen 2002, Melikov et al. 2002, 2003). Dukkerne er designet til at ligne en gennemsnitsstørrelse person. Kunstige lunger bruges til at simulere menneskelig vejtrækning (Brohus og Nielsen 1996, Bjørn 1999, Melikov et al. 2000, Melikov og Kaczmarczyk 2007). For at udføre nøjagtige målinger og realistisk evaluering og vurdering skal dukkens design og egenskaber overholde visse krav.

En termisk dukke har influens på luftfordelingen i et rum som en hindring og en termisk kilde. Det er muligt at undersøge luftstrømfordelingen omkring dukkens krop, varmetabet fra kroppen og den inhalerede luftkvalitet. Dukker med mandlige og kvindelige kropsformer anvendes. Kropsformen, kropsholdningen og placeringen af den termiske dukke har en effekt på luftstrømfordelingen omkring kroppen og luftlaget mellem tøj (hvis dukken er klædt) og legemsoverfladen. Dette påvirker nøjagtigheden af varmetab og måling af inhaleret luftkvalitet udført med dukken (Zukowska et al. 2012, Licina et al. 2014).

Da eksponering af personer er påvirket af kroppens position og grænselaget omkring kroppen, anbefales det altid at måle denne værdi med en dukke. Eksponeringen er en værdi opnået som en del af den integrerede strømning omkring kroppen (figur 19, Murakami 2004).

Kroppen af dukkerne, der bruges til indendørs miljø og ventilationsmålinger, består af forskellige antal individuelt kontrollerede kropssegmenter og gør det muligt at vurdere de lokale effekter af ikke-ensartede termiske miljøer på mennesker. Afhængigt af behovet kan dukken ligne stående eller siddende eller begge stillinger (fig. 12). Dukken skal muliggøre ændringer i kropsholdning og positionering (fleksibilitet i ben og arme, lænet frem og tilbage, siddende og stående osv.) For at imitere realistisk folk, der udfører forskellige typer arbejde, kørsel osv. Fire tilstande kan være anvendt til styring af en termisk dukke: (1) komforttilstand holder varmetabet og overfladetemperaturen af dukken, der ligner det tørre varmetab og hudoverfladetemperaturen hos en gennemsnitlig person, der er behagelig i det termiske miljø, der undersøges; (2) konstant overfladetemperatur for hele dukkens krop (typisk 34 ° C); (3) konstant overfladetemperatur, men forskellig for kropssegmenterne; og (4) konstant varme flux fra dukkens krop. Komforttilstand anbefales til på realistisk vis at simulere den frie konvektionsstrømning over-kroppen og den termiske strømning over menneskekroppen.

Simulering af menneskelig åndedræt med en kunstig lunge gør det muligt at studere inhaleret luftkvalitet. Åndedrætssimuleringen er vigtig for at undersøge transport og eksponering for luftbårne luftvejspartikler (Ai et al. 2019a). Korrekt simulering af åndedrætsfrekvens, cyklus (indånding, udånding og pause) og tilstand (udånding/indånding fra mund/næse) samt partikel/gaskoncentration, temperatur og fugtighed i udåndingsluften er mulig (Melikov et al. 2004a). En termodukke med en forenklet kropsform og vejtrækning begrænset til udånding kan bruges som forureningskilde, når man studerer forureningstransport mellem mennesker (Bjørn 1999). Det er vigtigt at bemærke, at mens vejtrækningsfunktionen er vigtig for at studere transport af udåndet luft mellem mennesker, kan eksponeringen for forurening, der genereres langt fra åndedrætsområdet for den eksponerede person, undersøges uden vejtrækningssimulering, bare målinger tæt på munden / næsen (Melikov og Kaczmarczyk 2007). I dette tilfælde er luft indsamlet over overlæben i en afstand på 0,01 m eller tættere på ansigtet tilstrækkelig til nøjagtige målinger af temperatur, fugtighed og forurenende koncentration i den inhalerede luft (Melikov og Kaczmarczyk 2007). Størrelsen og formen af næse- og mundåbningerne har indflydelse på målingerne og skal standardiseres for at sammenligne de opnåede resultater med forskellige dukker. Følgende egenskaber ved dukkens næse og mund foreslås for at genskabe en realistisk menneskelig model: udånding gennem næsen skal generere to stråler symmetriske til et lodret plan med en vinkel på 30 ° imellem dem, og disse skal skrå mod brystet ved 45 ° fra et vandret plan gennem næsespidsen; udånding fra munden skal generere en vandret stråle; størrelsen af hver næseboråbning skal være 50,2 mm² (diameter 8 mm); mundåbningen skal være tæt på en semi-ellipsoid form med et areal på 100,4 mm² (Melikov 2007). På nuværende tidspunkt giver de mest sofistikerede dukker mulighed for måling af partikel- og gaskoncentration, temperatur og fugtighed i luften, der indåndes af dukken (Melikov og Kaczmarczyk 2007). Denne funktion gør det muligt at vurdere inhaleret luftkvalitet såvel som eksponering (Melikov et al. 2007).

Selvom mund og næse skal standardiseres i termiske dukker, er det vigtigt at overveje, at disse to randbetingelser for flow og luftbåren smitter mellem mennesker kan have andre karakteristiske værdier. Strømningsretningen fra næse og især mundområdet og udåndingsretningen kan være meget forskellig fra person til person og variabel under vejtrækning og snak, sang osv. (Xu et al. 2015, Berlanga et al. 2020)

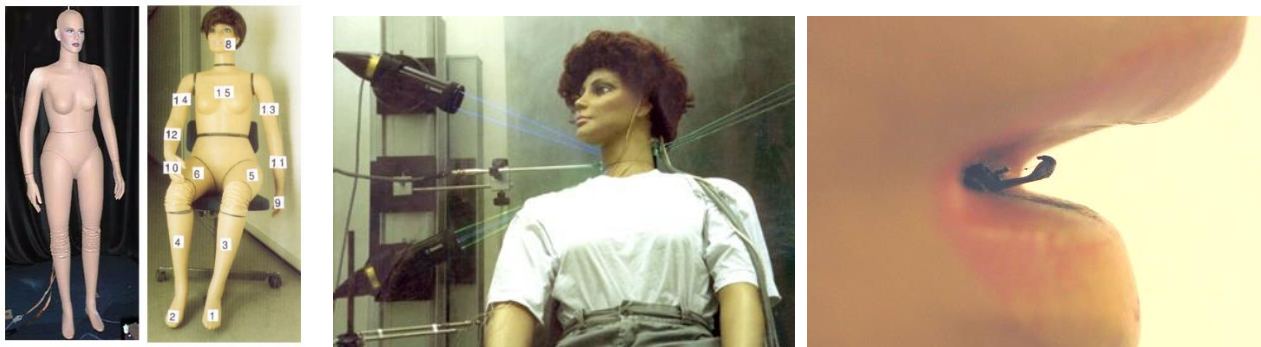


Fig. 12 Åndedræts termisk dukke: a) forskellig kropsholdning; b) Laser Doppler-målinger af grænselaget omkring kroppen; c) temperatur-, fugtigheds- og gasprøvetagningssensorer installeres i munden.

For at simulere realistiske luftstrømninger, der genereres af menneske, anvendes ofte opvarmede genstande med forenklet form (cylindre osv.) Og opvarmede kroppe af forskellig design som ses i fig. 13 under laboratorie- og feltmålinger til at etablere luftfordelingsforhold tæt på virkeligheden. Kroppe, der er forbundet med kunstig lunge, kan bruges til at studere med acceptabel nøjagtighed smitter over lang rækkevidde, men er ikke passende til at studere nøjagtigt kortafstands eksponering.

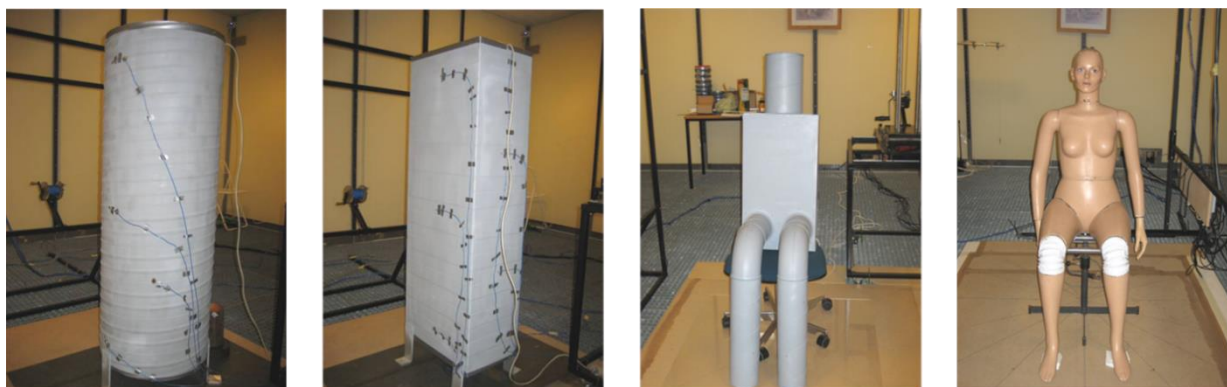


Fig. 13 Simulatorer af menneskelige krop med et overfladeareal svarende til arealet af en gennemsnitlig person (f.eks. $1,7 \text{ m}^2$) og genererer den samme varme på 75 - 80 W, dvs. tørt varmetab fra gennemsnitlig person, der udfører stillesiddende kontorarbejde (Zukowska et al. 2007).

Termiske dukker er et kraftfuldt værktøj til at undersøge luftbåren transmission og eksponering. De bruges under laboratorieundersøgelser, hvor rumforhold, der er realistiske for praksis, simuleres og arkiveres målinger (figur 14).

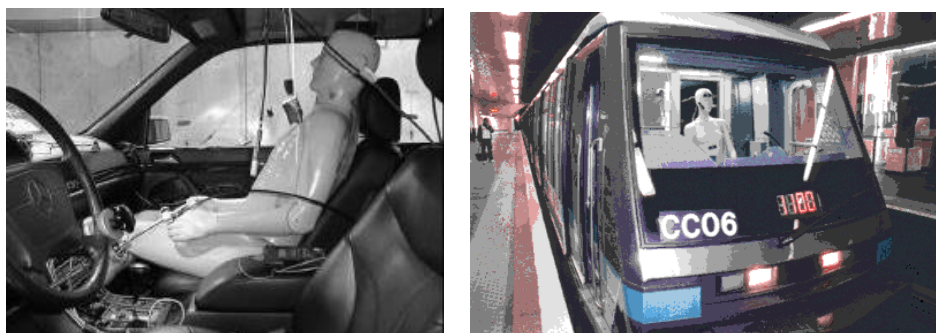


Fig. 14 Termisk dukke, der bruges til at studere miljø i en personbil (til venstre) og i en metrovogn (til højre).

Brug af termiske dukker under laboratorieundersøgelser giver enorme muligheder for at undersøge eksponering for forskellig forurening, herunder transport og eksponering for udåndet luft. Eksempelvis kan eksponering for forurening genereret af byggematerialer, menneskelige krops bioeffluenter og udåndet luft undersøges på samme tid. Til dette formål måles koncentrationen af forskellige sporgasser, der bruges til at simulere forskellig forurening, i luften, der indåndes af dukkerne, og bruges til at vurdere eksponeringen (fig. 15).

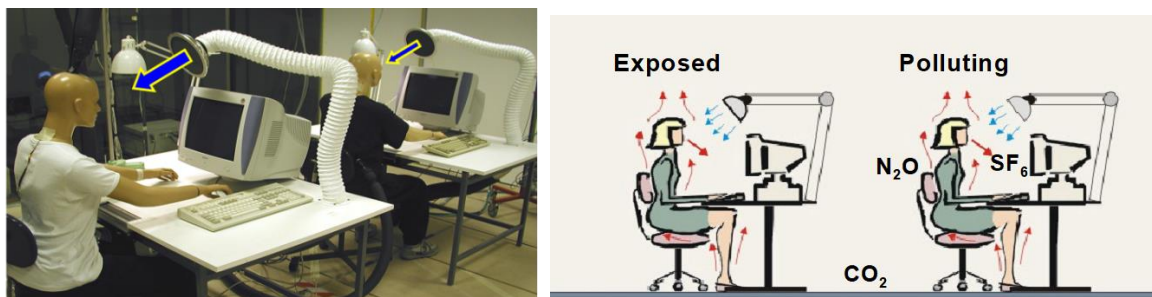


Fig. 15 Kontorrum. To åndedræt termisk dukke simulerer mennesker. Sporgas, SF₆ blandes med luften, der udåndes af frontdukken for at simulere inficeret person, sporgas N₂O frigives fra armhulerne på dukken, simulerer bioeffluenter, og CO₂ frigøres fra gulvet for at simulere forurening fra byggematerialer. Eksponering af dukken, der sidder på bagsiden, for den simulerede forurening undersøges under forskellige ventilationsmetoder; personlig ventilation er vist på billedet (Melikov 2015).

References

- 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, DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12589>.
- Ai Z.T., Huang, T., Melikov, A.K. 2019a. Airborne transmission of exhaled droplet nuclei between occupants in a room with horizontal air distribution in: *Building and Environment*, vol: 163, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106328>
- Ai Z., Hashimoto K., Melikov A.K. 2019a. Airborne transmission between room occupants during short term events: Measurement and evaluation. *Indoor Air* 29:563–576.
- Asadi, S., Wexler, A.S., Cappa, C.D. et al. Aerosol emission and superemission during human speech increase with voice loudness. *Sci Rep* 9, 2348 (2019). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-38808-z>
- ASTM E741 – 11. 2017. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution. American Society for Testing and Materials.
- ASTM D 6245. 2018. Standard Guide for Using Indoor Carbon Dioxide Concentrations to Evaluate Indoor Air Quality and Ventilation, American Society for Testing and Materials.
- ASHRAE Standard 113-2013: Method of Testing for Room Air Diffusion (ASHRAE/ANSI Approved), ASHRAE, Atlanta, USA, 2013
- Awbi H.B. *Ventilation of Buildings*, 2016, Spon Press (Taylor and Francis Group), ISBN 0-415-27056-1, 522 Pages.
- Beat-Arribas B, McDonagh A, Noakes CJ, Sleigh PA. Assessing the near-patient infection risk in isolation rooms. *Proceedings of Healthy Buildings 2015, ISIAQ International Conference, Eindhoven, the Netherlands, May 18-20, paper #537*.
- Bivolarova, M., Ondraček J., Melikov A., Ždímal V. 2017. A comparison between tracer gas and aerosol distribution indoors: the impact of ventilation rate, interaction of airflows, and presence of objects, *Indoor Air Journal*, 27 (6), 1201-1212.
- Berlanga, F, Liu, L, Nielsen, PV, Jensen, RL, Olmedo, I & Adana, MRD 2020, 'Influence of the geometry of the airways on the characterization of exhalation flows. Comparison between two different airway complexity levels performing two different breathing functions', *Sustainable Cities and Society*, vol. 53, no. February 2020, 101874. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101874>

- Bjørn E (1999) Simulation of human respiration with breathing thermal manikins. In: Proceedings of the 3rd international meeting on thermal manikin testing 3IMM, Stockholm, Sweden, 12–13 October 1999.
- Bjørn, E & Nielsen, PV 2002, 'Dispersal of Exhaled Air and Personal Exposure in Displacement Ventilated Rooms', *Indoor Air Online*, bind 12, nr. 3, s. 147-164. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0668.2002.08126.x>
- Brohus H, Nielsen PV (1996) Personal exposure in displacement ventilated rooms. *Indoor Air* 6:157–167
- Cermak, R., Melikov, A.K., Forejt, L., Kovar, O., 2006, Performance of personalized ventilation in conjunction with mixing and displacement ventilation, *HVAC&R Research*, vol.12, no.2, pp.295-311.
- Cermak, R., and Melikov, A., 2006, Air quality and thermal comfort in an office with underfloor, mixing and displacement ventilation, *International Journal of Ventilation*, vol. 5, no.3, pp. 323-332.
- Clark, K.E.; Celik, I.; et al. Quantity and size distribution of cough-generated aerosol particles produced by influenza patients during and after illness. *J. Occup. Environ. Hyg.* 2012, 9, 443–449.
- Corgnati, S.P., Da Silva, M.G., Ansaldi, R., Asadi E., Costa, Jose Joaquim, Filippi M., Kaczmarczyk J., Melikov A.K., Olesen B.W., Popiolek Z., Wargocki, P., *Indoor Climate Quality Assessment, REHVA Guidebook, REHVA 2011*, p. 118.
- Finkelstein, W., Melikov, A., Sefker, T., Langkilde, G., 1996, Laser Doppler measurements of airflow characteristics in rooms with mechanical ventilation, *Proceedings of Indoor Air'96*, July 21-26 1996, Nagoya, Japan, vol.1, pp.785-790.
- Friedlander, S.K. *Smoke, Dust, and Haze: Fundamentals of Aerosol Dynamics*, 2nd ed.; Oxford University Press: New York, NY, USA, 2000.
- Hanzawa, H., Melikov, A.K., Fanger, P.O., 1987, Airflow characteristics in the occupied zone of ventilated spaces. *ASHRAE Transactions*, Vol.93, Part 1, pp.524-539.
- ISO. 1998. ISO 7726, International Standard: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring physical quantities. International Organization for Standardization.
- Johnson, G.R.; Morawska, L.; Ristovski, Z.D.; Hargreaves, M.; Mengersen, K.; Chao, C.Y.H.; Wan, M.P.; Li, Y.;
- Kierat W., Bivolarova M., Zavrl E., Popiolek Z., Melikov A. 2018. Accurate assessment of exposure using tracer gas measurements. *Building and Environment* 131, 163–173.
- Lee, J.; Yoo, D.; Ryu, S.; Ham, S.; Lee, K.; Yeo, M.; Min, K.; Yoon, C. Quantity, size distribution, and characteristics of cough-generated aerosol produced by patients with an upper respiratory tract infection. *Aerosol Air Qual. Res.* 2019, 19, 840–853.
- Lee, B. Minimum sizes of respiratory particles carrying SARS-CoV-2 and the possibility of aerosol generation. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2020, 17(19), pp. 6960
- Leung, N.H.L., Chu, D.K.W., Shiu, E.Y.C. et al. Respiratory virus shedding in exhaled breath and efficacy of face masks. *Nat Med* 26, 676–680 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41591-020-0843-2>
- Lindsley, W.G.; Pearce, T.A.; Hudnall, J.B.; Davis, K.A.; Davis, S.M.; Fisher, M.A.; Khakoo, R.; Palmer, J.E.;
- Licina, D., Tham, K. W., Melikov, A. K. & Sekhar, C. 2016. Airflow characteristics and pollution distribution around a thermal manikin - Impact of specific personal and indoor environmental factors. *ASHRAE Transactions, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, Vol. 122, p. 366-379 14 p.
- Licina, D., Melikov, A.K., Sekhar, C., Tham, K.W. 2015. Air temperature investigation in microenvironment around a human body, *Building and Environment*, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.014>, 92: 39-47.
- Licina, D., Pantelic, J., Melikov, A.K., Sekhar, C., Tham, K.W. 2014. Experimental investigation of the human convective boundary layer in a quiescent indoor environment, *Building and Environment*, 75, 79-91.
- Licina, D., Melikov, A., Pantelic, J., Sekhar, C. and Tham K.W. 2015. Human convection flow in spaces with and without ventilation: Personal exposure to floor released particles and cough released droplets, *Indoor Air*, 25(6):672-82, doi:10.1111/ina.12177.
- Licina, D., Melikov, A.K., Sekhar, C., Tham, K.W. 2015. Human convective boundary layer and its interaction with room ventilation flow, *Indoor Air*, doi:10.1111/ina.12120, 25(1): 21–35, 2015.

- Liu, L., Nielsen, P. V., Jensen, R. L., Xu, C., & Li, Y. (2014). Interpersonal Transport of Droplet Nuclei among Three Manikins in a Full-Scale Test Room. *ASHRAE Transactions*, 120.
- L. Liu, Y. Li, P. V. Nielsen, J. Wei, and R. L. Jensen, "Short-range airborne transmission of expiratory droplets between two people," *Indoor Air*, vol. 27, no. 2, pp. 452–462, 2017.
- Liang C., Jiang S., Shao X., Wang H., Yan S., Yang Z. and Li X. 2021. Is it safe to reopen theaters during the COVID-19 pandemic?. *Frontiers in Built Environment*, 04 March 2021, doi: 10.3389/fbuilt.2021.637277
- Melikov, A.K., Hanzawa, H., Fanger, P.O., 1988, Airflow characteristics in the occupied zone of heated spaces without mechanical ventilation. *ASHRAE Transactions*, Vol. 94, Part 1, pp.52-70.
- Melikov, 2020. DTU Byg Analyse 1-2020. DTU Byg, Danmarks Tekniske Universitet.
- Melikov A, Cermak R, Mayer M (2002) Personalized ventilation: evaluation of different air terminal devices. *Energy Buildings* 34:829–836
- Melikov A, Kaczmarczyk J, Cygan L (2000) Indoor air quality assessment by a "breathing" thermal manikin. In: Awbi H (ed) *Air distribution in rooms: proceedings of Roomvent 2000*, vol I. Elsevier, London, pp 101–106
- Melikov, A. and Kaczmarczyk, J., 2007, Indoor air quality assessment by a breathing thermal manikin, *Indoor Air*, vol.17, No.1, pp.50-59.
- Melikov, A.K., Dimitrov, N., Pavlov, G., 2007, Ventilation Effectiveness and Perceived Air Quality, *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms - Roomvent 2007*, Helsinki, C05, paper 1298.
- Melikov A., Popiołek Z., Silva M., Care I., Sefker T. 2007 "Accuracy limitations for low-velocity measurements and draft assessment in rooms" - *HVAC&R Res.* vol. 13, nr 6, s. 971-986.
- Melikov, A.K., Zhou, G., 1996, Air movement at the neck of the human body, *Proceedings of Indoor Air'96*, July 21-26 1996, Nagoya, Japan, vol.1, pp.209-214.
- Melikov, A.K. 2016. Advanced air distribution: improving health and comfort while reducing energy use, *Indoor Air*, 26 (1): 112–124, doi:10.1111/ina.12206.
- Melikov, A.K., Krhger, U., Zhou, G., Madsen, T.L., Langkilde, G., 1997, Air temperature fluctuations in rooms, *Building and Environment*, vol. 32, No.2, pp.101-114.
- Melikov, A.K. 2015. Human body micro-environment: The benefits of controlling airflow interaction, *Building and Environment* 91: 70-77.
- Moriyama, m., Hugentobler, W.J., Iwasaki A. Seasonality of Respiratory Viral Infections, *Annu. Rev. Virol.* 2020. 7:83–101.
- Murakami S, Analysis and design of micro-climate around the human body with respiration by CFD, *Indoor Air* 2004; 14 (Suppl 7): 144–156
- Nielsen P.V., Winther F.V., Buus M., and Thilageswaran M. Contaminant Flow in the Microenvironment between People under Different Ventilation Conditions, *ASHRAE Trans.*, pp. 632–640, 2008.
- Nielsen P.V., Olmedo I., De Adana M.R., Grzelecki P., and Jensen R.L. Airborne cross-infection risk between two people standing in surroundings with a vertical temperature gradient, *HVAC R Res.*, vol. 18, no. 4, pp. 552–561, 2012.
- Nielsen, PV, Zajas, JJ, Litewnicki, M & Jensen, RL 2014, 'Breathing and Cross-Infection Risk in the Microenvironment around People', *ASHRAE Transactions*, bind 120.
- Nielsen P.V. Control of airborne infectious diseases in ventilated spaces. *J. R. Soc. Interface*, vol. 6, no. SUPPL. 6, 2009, doi: 10.1098/rsif.2009.0228.focus.
- Noakes CJ, Fletcher LA, Sleigh PA, Booth WB, Beato-Arribas B, Tomlinson N. Comparison of tracer techniques for evaluating the behaviour of bioaerosols in hospital isolation rooms. *Proceedings of Healthy Buildings. 2009; 9th international conference and exhibition*, Syracuse, NY, USA. Paper #504.
- Olmedo, I, Nielsen, PV, Adana, MRD, Jensen, RL & Grzelecki, P 2012, 'Distribution of Exhaled Contaminants and Personal Exposure in a Room using Three Different Air Distribution Strategies', *Indoor Air*, bind 22, nr. 1, s. 64–76. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2011.00736.x>

Olmedo, I, Nielsen, PV, Adana, MRD & Jensen, RL 2013, 'The Risk of Airborne Cross-Infection in a Room with Vertical Low-Velocity Ventilation', *Indoor Air Online*, bind 23, nr. 1, s. 62-73.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00794.x>

Peng, Z. and Jimenez, J.L. 2020, Exhaled CO₂ as COVID-19 infection risk proxy for different indoor environments and activities, *medRxiv*, doi: <https://doi.org/10.1101/2020.09.09.20191676>, September 10, 2020.

Popiołek Z., Jorgensen F., Melikov A., Silva M., Kierat W. 2007: "Assessment of uncertainty in measurements with low velocity thermal anemometers" - *Int. J. Vent.* vol. 6 nr 2, s. 113-128.

REHVA COVID-19 guidance document: How to operate HVAC and other building service systems to prevent the spread of the coronavirus (SARS-CoV-2) disease (COVID-19) in workplaces, August 3, 2020, REHVA Brussels.

Rudnik, S.N. and Milton, D.K. 2003. Risk of indoor airborne infection transmission estimated from carbon dioxide concentration. *Indoor Air*, 13: 237-245.

Settles, G. Visualizing full-scale ventilation airflows. *Ashrae Journal* July 1997.

Sun C. and Zhai Z. The efficacy of social distance and ventilation effectiveness in preventing COVID-19 transmission. *Sustainable Cities and Society* 2020, 62, 102390.

Shao X. and Li X. 2020. COVID-19 transmission in the first presidential debate in 2020. *Phys. Fluids* 32, 115125 (2020); doi: 10.1063/5.0032847.

Tang JW, Noakes CJ, Nielsen PV, et al. Observing and quantifying airflows in the infection control of aerosol- and airborne-transmitted diseases: an overview of approaches. *J Hosp Infect.* 2011;77:213-222.

Tang JW, Nicolle AD, Klettner CA, et al. Airflow dynamics of human jets: sneezing and breathing – potential sources of infectious aerosols. *PloS One.* 2013; 8(4): e59970.

Wan, M.P., Chao, C.Y.H., Sze To, G.N., Fang, L., Melikov, A., 2008, An Experimental Study on the Fate of Expiratory Droplets in Aircraft Cabin, *Proceedings of the 11th International conference on Indoor Air Quality and Climate - Indoor Air 2008*, 17-22 August 2008, Copenhagen, Paper ID: 161.

Xie X, Li Y, Sun H, Liu L. Exhaled droplets due to talking and coughing. *J R Soc Interface.* 2009; 6: S703-714.

Xie, X.; Katoshevski, D.; et al. Modality of human expired aerosol size distributions. *J. Aerosol Sci.* 2011, 42,839–851.

Xu, C, Nielsen, PV, Gong, G, Liu, L & Jensen, RL 2015, 'Measuring the exhaled breath of a manikin and human subjects', *Indoor Air*, vol. 25, no. 2, pp. 188-197. <https://doi.org/10.1111/ina.12129>

Zhang S. and Lin Z. 2021. Dilution-based evaluation of airborne infection risk - Thorough expansion of Wells-Riley model. *Building and Environment*, 194, 107674.

Zukowska D., Melikov A. and Popiolek Z. 2012. Impact of personal factors and furniture arrangement on the thermal plume above a sitting occupant. *Building and Environment*, 49, pp. 104 - 116.

Zukowska, D., Melikov, A.K., Popiolek, Z., 2007, Thermal plume above a simulated sitting person with different complexity of body geometry, *Proceedings of the 10th International Conference on Air Distribution in Rooms - Roomvent 2007*, Helsinki, Co2, paper 1016.

Zhang Z, Chen X, Mazumdar S, Zhang TF, Chen QY. Experimental and numerical investigation of airflow and contaminant transport in an airliner cabin mockup. *Build Environ.* 2009;44:85-94.

Del 6 - Resumé:

Efter SARS-CoV-2 virus første gang blev identificeret i Wuhan i december 2019 og sidenhen spredte sig som en steppebrand over hele verden, har verdenssamfundets medicinske specialister og ventilationsspecialister kommet med en lang række anbefalinger omkring hvordan vi skulle forholde os både i hospitalsvæsnet, i offentlige bygninger, offentlig transport, offentligt udendørs og privat generelt.

Retningslinjerne har været mange og ikke altid lige lette at forstå og tolke. Menneskeheden har siden december 2019 stået overfor en stor udfordring, med at inddæmme, begrænse og slå denne Covid-19 pandemi ned.

For at forstå hvad der reelt er sket, kræver det en dyb forståelse af sygdommen, dens måde at opføre sig på, reproducere sig og sprede sig på. Der har været meget og der er stadig stor uenighed omkring hvordan smitten med Covid-19 spredt sig dels gennem luften, via materialer og kontakt mellem mennesker.

I et forsøg på at dæmme op for denne uenighed og skabe et fælles rum af forståelse mellem de essentielle parter, har vi derfor i dette projekt sat en gruppe af de dygtigste specialister sammen indenfor medicin, ventilation og arkitektur i Danmark.

Den vigtigste grundsten for at kunne håndtere en virus som Covid-19, samt at inddæmme og begrænse smitten er en grundig forståelse af denne virus, hvordan virus opfører sig, reproducerer (formerer) sig og smitter.

I praksis og når fokus er på smitte *mellem* mennesker, er det oftest virus, som har den altovervejende betydning. Fokus er på virus som årsag til luftvejsinfektioner, hvad enten disse virus giver anledning til lokale mindre udbrud, til landsdækkende udbrud/epidemier eller til verdensomspændende pandemier.

I modsætning til de fleste bakterier og svampe har virus et krav om tilstedeværelse af levende celler, som de kan trænge ind i og udnytte til formering. Virus kan i forskellig grad overleve i omgivelserne, men ikke formere sig uden for levende celler. Virus vil via specifikke overfladekomponenter koble sig til receptorer på modtager-cellen, trænge ind i cellen og overtage dens produktionsapparat.

Virus' størrelse i sig selv (ca. 35-350 nm) har ikke betydning for, om de kan trænge ned i de dybe luftveje ($\leq 5 \mu\text{m}$); det har derimod størrelsen af den partikel, som virus transporteres på.

Forskellige virus har forskellig tolerans over for fysiske faktorer som luftfugtighed, temperatur og UV-bestråling. Dertil kommer faktorer som, tilstedeværelse af (beskyttende) organisk materiale, fx luftvejssekret. Er overflader ujævne med riller, sprækker og sammenføjninger, vanskeliggøres effektiv rengøring, og virus vil kunne beskyttes mod udtørring, desinfektion og UV-bestråling. For de fleste luftvejsvirus er den typiske overlevelsestid fra timer til dage. For SARS-CoV-2 regnes med en praktisk overlevelsestid på 48-72 timer, selv om laboratorieforsøg har vist længere overlevelsestider. For nogle virusinfektioners vedkommende er der sæsonvariation, for andre ikke. Der kan desuden være forskel på den typiske forekomst, som er afhængig af hvilken klimatisk region, man befinder sig i (tempereret eller tropisk klima).

Smitteperioden kan være fra før symptomstart, tidligt under symptomerne eller først længere henne i sygdomsforløbet. Smitterisikoen kan aftage, når/hvis der dannes neutraliserende antistoffer hos den smittede. Antallet af virus som er nødvendige for at fremkalde infektion (inokulum) kan være kendt, eller som det er tilfældet for SARS-CoV-19, endnu ukendt. Antallet af virus som den modtagelige udsættes for (dvs. graden af eksposition) kan måske påvirke infektionens sværhedsgrad, hvilket er velkendt fra observationer af mæslinger.

Symptomer og sygdommens spredning i kroppen kan afhænge af, hvor de receptorer er lokaliseret, som virus skal hæfte sig til.

I traditionel infektionshygiejnisk sammenhæng anvender vi i Danmark følgende kategorier, som principielt er baseret på nogle fysiske kriterier (hvordan kommer smitten/mikroorganismen fra A til B).

Man skal være opmærksom på, at forskellige smitteveje kan være kategoriseret lidt forskelligt i forskellige guidelines:

- **Kontaktsmitte:** Inddeles i direkte og indirekte kontaktsmitte. Direkte kontaktsmitte sker mellem to personers hud eller slimhinder, fx gennem kys, sex eller fødsel (smitte fra mor til barn). Indirekte kontaktsmitte sker, hvor overflader, kontaktpunkter og/eller hænder er mellemlid mellem den der bærer smitten og smittemodtageren. Smitten vil typisk med hænderne blive ført til øjne, næse eller mund med risiko for at give infektion i øjne, øvre/nedre luftveje eller mave-tarmkanal.
- **Dråbesmitte:** Her er der tale om store dråber (størrelsesorden $\geq 100 \mu\text{m}$) som transporteres til smittemodtageren ved afstande på $\leq 1 \text{ m}$.
- **Aerosolsmitte (luftbåren):** Her taler vi om dråber som opstår ved f.eks. sang og fysisk aktivitet (størrelsesorden $10\text{nm} < x < 1 \mu\text{m}$)
- **Luftbåren smitte:**
 - **Dråbekernesmitte:** Smitte hvor mikroorganismen transporteres gennem luft i form af partikler, som er indtørrede (evaporated) dråber (størrelsesorden $< 10 \mu\text{m}$)
- **Støvbåren smitte:** Smitte hvor mikroorganismen kan sedimentere på overflader og/eller transporteres gennem luft på støvpartikler (størrelsesorden $10\text{-}100 \mu\text{m}$)
- **Smitte via vehikler ("transportmidler")** - fækooral smitte, insektbåren, fødevarebåren, vandbåren, inokulationssmitte (blod, medicin).

I forbindelse med ovennævnte kategorisering er der viden om, at der ved host, nys, tale, sang, råb, fysisk aktivitet, vejtrækning osv. udskilles et spektrum af dråber i forskellige størrelser. I praksis, når det gælder specifikke infektioner, inddrages erfaringer med netop de sygdomme og fx kategoriserer smittevejen for en given infektion/mikroorganisme baseret på viden om væsentligste (hyppigste) smittevej, reproduktionstal R_0 (det antal personer som én person kan smitte i en ikke-immun befolkning) og hvilke forholdsregler, som har effekt.

I visse tilfælde kan nogle bakterier og svampe også transporteres gennem luften og give anledning til luftvejsinfektioner eller alvorlige infektioner med luftvejene som indgangsport. Det vil dog oftest dreje sig om mindre, lokale ophobninger af infektioner, som kan være forårsaget af problemer i forbindelse med f.eks. bygningernes konstruktion og indretning, vand- og ventilationsinstallationer eller vedligehold, eller ved renovering/opførsel af nybyggeri tæt på bygninger med immunsvækkede personer (hospitaller). Det kan således dreje sig om:

- **Legionærsygdom** (bakterien *Legionella*, via aerosoler fra fejlkonstruerede eller dårligt vedligeholdte luftkonditioneringsanlæg, forstøvningsanlæg, fontæner og brusebade),
- **Q-feber** (bakterien *Coxiella burnetii*) transporteret i form af indtørrede bakterier i støv fra døde inficerede dyr over større eller mindre afstande),
- **Cryptokokkose** (gærsvampen *Cryptococcus neoformans* fra fugleafføring, fx pga. duer tæt på bygningers luftindtag) og
- **Aspergillose** (sporer fra skimmelsvampen *Aspergillus* kan frigives i forbindelse med nedrivning og bygningskonstruktion i tilslutning til eksisterende hospitalsbygninger, transporteres gennem luften

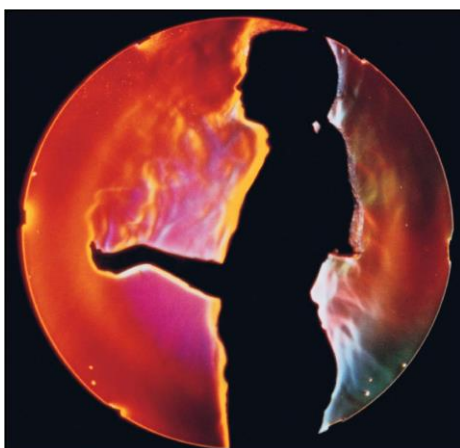
ind til immunsvækkede patienter) /SSI sygdomsleksikon, sundhed.dk, NIR Nybygning, National guidelines for the prevention of nosocomial aspergillosis 2018/.

Det skal understreges, at disse infektioner i det store billede er relativt sjældent forekommende.

Normalt taler man om tre smitteveje for luftvejs sygdomme, nemlig dråbe spredning, luftbåren spredning og spredning ved kontakt. Dråbespredning og luftbåren spredning foregår igennem luften. De to former er delvis blevet defineret og adskilte som smitteformer, fordi visse sygdomme kan relateres klart til en af de to former og delvis af historiske grunde.

Dråbeinfektion sker via store dråber, som direkte deponeres i øjne, næse, mund og luftveje på den modtagende person. De store udåndingsdråber ($>100\text{ }\mu\text{m}$) indeholder vand mm. samt eventuelle bakterier eller virus, og de kan normalt kun bevæge sig i en afstand op til 1–2 m på grund af en relativ stor masse.

Forsøg med partikler (ISO 12103-1 kalibrerede partikler i størrelsesområdet 1 – 200 μm) viser at nogle dråber/partikler i størrelsesområdet 15 – 30 μm også spredes ud i rummet i stedet for at falde imod gulvet. Årsagen er sandsynligvis at dråber også udåndes ved meget lav horisontal retning i slutningen af en udånding, tale eller host. Derfor kan de indfanges i det vertikale termiske grænselag omkring personen og føres op og ud i rummet. Se figur 1.



Figur. 1. Schlieren-fotografier i fuld skala: stående pige (Settles 1997).

Luftbåren smittespredning kan foregå via mikrodråber, der er mindre end 100 μm i diameter. Mikrodråber kan være luftbårne i flere timer og bevæge sig over store afstande på grund af deres lille størrelse og dermed lave faldhastighed. I et typisk indendørsmiljø kan en 5 μm mikrodråbe tilbagelægge langt mere end 10 m alt afhængig af luftstrømningsmønsteret i rummet, hvis den udløses 1,5 m over gulvet.

Enkeltstående hændelser som nys og hoste vil typisk generere en vortex strømning, og koncentrationen vil også i dette tilfælde falde langs strømmingen på grund af opblanding af luften. Tale og sang vil give en strømning, som er sammensat af pulserende stråler og markante vortex strømninger. Tale og sang kan være en stor kilde til dråber og mikrodråber, og der kan argumenteres for at anvende mundbind for at stoppe dette lokale smitteniveau eller ved at sprede dråberne i en større volumen. Yderligere er der udført undersøgelser af de forskellige sprogs/sætningers evne til at transportere mikrodråber.

Man anser ofte smittespredningen for at være lavere udendørs end indendørs. En undersøgelse af ca. 300 smittespredningstilfælde i Kina først på året 2020 kunne kun påvise to tilfælde der involverede udendørs smittespredning. Dette resultat bliver ofte citeret, som en indikering af en rimelig sikker beskyttelse ved udendørs ophold. Flere rapporter viser, at der er mindre smitterisiko udendørs end indendørs. Dog kan smittetransmission forekomme udendørs afhængig af vindens styrke og retning samt om folk bærer ansigtsmasker.

Ved udendørs ophold, hvor man deltager i festivaler, sportsbegivenheder mm, og hvor man er mange og står tæt, har naturligvis ikke denne kinesiske påviste sikkerhed. Det vil være naturligt at betragte smittespredningen, der kan opstå i disse situationer, på samme niveau som ved indendørs ophold i samme tæthed og varighed. Ved rolige vejr situationer med en temperatur tæt på komforttemperatur vil der opstå en strømningssituation omkring en del af en gruppe, der vil være meget lig, den situation gruppen vil have, hvis den opholdt sig indendørs.

Det er tydeligt af ovenstående, at smittespredning er et yderst kompliceret begreb, og der er et utal af faktorer, som spiller ind i smittespredning. Der er selvfølgelig taget udgangspunkt i de nuværende kendte virus og bakterielle situationer, men hvad kommer der i fremtiden, og hvordan vil en ny virus og/eller bakterie opføre sig ift. smitte, spredning, reproduktion, mutationer etc. Det er et spørgsmål vi ikke kan svare på.

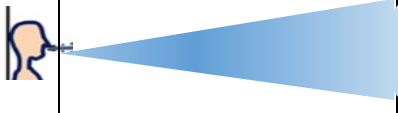
Vi har i projektgruppen derfor opstillet en model for, hvordan smittespredning sker, se figur 2. Modellen er opstillet ud fra tilgængelig information, ekspertise og kompromis i projektgruppen. Modellen er ikke videnskabeligt bekræftet:

Smitte gennem luft – forskellige benævnelser afhængig af sektor

Baggrunden for omstående skema er:

- 1) at der anvendes forskellige betegnelser, afhængigt af om man er forankret i:
 - Den ventilationstekniske/ indeklimateorienterede sektor (rådgivere, Ingeniører, miljømedicinere & forskere), hvor man er afhængig af viden om partikelstørrelser, partikelkoncentrationer, ventilationssystemer, vejrforhold, krav til indeklimate, arbejdsmiljø og energiforhold samt evt. arbejdsopgaver, for at kunne projektere, drifte, vedligeholde og evt. udbedre ventilationssystemer eller supplere med ekstra tiltag. Tiltag, både for komfort og for at mindske spredning af forurening, herunder smittebærende partikler.
 - Den kliniske sektor, hvor man er afhængig af få, let forståelige kategorier for at forebygge smitte, hvor følgende personer opholder sig:
 - De (mest syge) inficerede personer (indlægges med infektion),
 - De sårbare pga. anden sygdom eller behandling (udsat for infektion) samt
 - Personale (hensyn til arbejdsmiljø og til risikoen for at viderebringe smitte til patienter, kolleger og familie) og
 - Besøgende.
- 2) sammen med teksten i rapporten at skabe forståelse for betydningen af, at der for nogle virusbetingede luftvejsinfektioner er én eller to betydelige smitemåder, for andre er der mere end

to (bl.a. gennem luften) – og praktisk viden og erfaring om konkrete infektioner har betydning for, hvilken vægt man skal tillægge nedenstående kategorier af smitte gennem luften.

Koncentration af potentielt infektiøse partikler			
Partikelstørrelse	Alle partikler > 0 µm En fordeling, der strækker sig fra dråber til mikrodråber. Afhængig af lufthastighed, luftretning, luftfugtighed, temperatur og smittekilde (inkl. infektionens natur)	Partikler (overvejende < 100 µm)	Partikler (overvejende < 5 µm)
Afstand fra smittekilde i praksis	Nærfelt	Fjernfelt	
	Typisk op til 1.5-2 m	> 1.5-2 ≤ 8 m inden for det samme rum med personer, som smitter	> 8 m uden for det rum hvor en person, der smitter, befinder sig. Evt. gennem ventilationsanlæg og/eller i store rum.
Aktuelle benævnelser - ventilationssektor	Luftbåren smitte		
	Dråbesmitte	Mikrodråbesmitte	
Aktuelle benævnelser - sundhedssektor	Dråbesmitte	Aerosolsmitte*	Dråbekernesmitte eller luftbåren smitte
Fælles forslag, anvendt i denne rapport**	Kortdistance-smitte	Mellemdistance-smitte	Langdistance-smitte

Figur 2. Oversigt over koncentration af potentiel infektiøse partikler (Danvak Covid-19 projektgruppe -2021)

* Ikke tidligere anvendt som smitemåde-kategori i denne kontekst (men er anvendt i forbindelse med procedurer for instrumentering eller behandling i patientens luftveje eller inden for forskellige ikke-personrelaterede områder, hvor der dannes væskeformige aerosoler med potentiel smitterisiko).

**Anvendt i rapporten for at sikre fælles forståelse i forbindelse med læsningen.

Ud over ovenstående vil også støv med varierende partikelstørrelse kunne lægge sig på overflader, og hvis disse partikler kan frigøres fra overfladen pga. bl.a. luftstrømme (ventilation, personbevægelser i rummet mm.), kan de transporteres gennem luften, i afstande fra udgangspunktet, der igen afhænger af luftstrømme og partikelstørrelse.

Smittespredning – afhængig af mange faktorer

Et er HELT klart – det der spiller ind i en smittespredning, er naturvidenskabelige elementer, såsom tyngdekraften, termisk stråling, luftens strømning etc. og her kan vi måske benytte os af tekniske løsninger for at mindske smittespredning. Hertil kommer menneskets adfærdsmønstre, som varierer efter hvordan vores sociale arv er, demografi, vores samfunds opbygning og velfærd etc.

Vi kan ikke ændre på hvordan naturen opfører sig og hvordan en virus muterer. Vi skal derfor finde andre måder, hvorpå vi kan begrænse og/eller helt eliminere mulighederne for at en farlig virus spreder sig.

Her kan vi f.eks. tage fat på, hvordan vi mennesker opfører os og eventuelt ændre på denne adfærd.

Ser vi tilbage i tiden har menneskeheden tidligere oplevet pandemier, f.eks. pesten tilbage i 1710. Kong Frederik IV. nedsatte en sundhedskommission, indførte rejseforbud og etablerede karantænestationer for at standse smittespredningen. Man blev også klar over at byernes indretning havde betydning for sundheden og smittespredning, f.eks. de åbne kloaker i bybilledet og byernes boliger var i ringe stand. Arkitektonisk var dette skelsættende og tilbage i midten af 1900-tallet vandt nye bygningstyper og indretning frem. Under den spanske syge i perioden 1918-20 indså man at god udsigt, frisk luft og god hygiejne var vigtig. I de velstillede boliger opsatte man en håndvask i entréen, som gæster skulle benytte sig af, inden man fik entré i huset – det var vigtigt at man havde rene hænder.

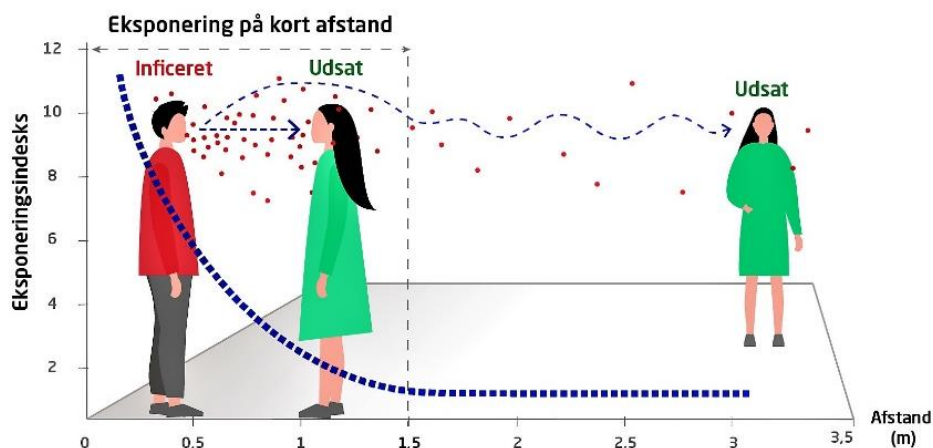
Hvad kan vi lære af historien, om hvordan vi indretter os, indretter vores byer og offentlige steder rent arkitektonisk? Ligeledes kan vi af den medicinske udredning se, at det er yderst vigtigt hvordan vi bevæger os i bygninger og i det offentlige rum. Vi bliver nødt til at bringe vores arkitektur i spil, hvor bevægelsesmønstre, nudging, ophold i lokaler og brugen af materialer tages grundigt op til overvejelse.

Vor tids urbanisering medfører naturligvis, at mange personer lever og opholder sig på ganske få m². Ligeledes har kvadratmeterudnyttelse været drivende for projektudviklingen af investeringsmæssige hensyn. Vi ser således mere og mere kompakt byggeri skyde op, da der er rift om de få kvadratmeter, der er til rådighed i de større byer.

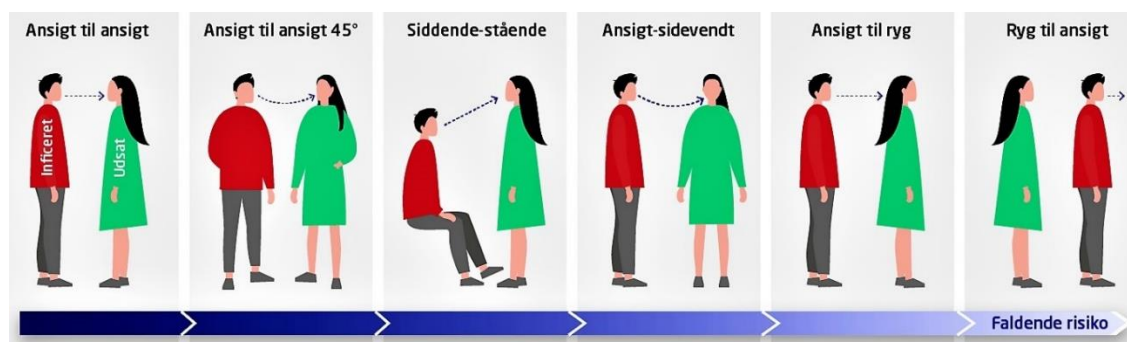
Alt dette medfører en række udfordringer for byggebranchen i en pandemitid, særligt når vi også skal forholde os til sundhedsmyndighedernes anbefalinger om afstand, hygiejne og luftkvalitet for øje.

Afstandskravene medfører en nødvendig gentænkning af den eksisterende bygningsmasses anvendelse, samtidig med at man må analysere, hvorledes den nuværende og eventuelt kommende pandemier vil påvirke fremtidens nybyggerier.

Det er af væsentlig betydning for risiko for infektion, hvordan personer er orienteret i forhold til hinanden, når man ser på smittespredning. Det er illustreret i omstående figur 3 og 4.



Figur 3. Eksponering som funktion af afstanden mellem inficerede og udsatte personer (Ai and Melikov 2018, DTU Byg Analyse 1 2020).



Figur 4. På kort afstand indendørs (under 1,5 meter) er risikoen for luftbåren infektion bl.a. afhængig af, hvordan udsatte personer og inficerede er placeret i forhold til hinanden (Ai et al., 2019; DTU Byg Analyse 1 2020).

Med udgangspunkt i ovenstående illustrationer er der blevet indført tiltag, der skal begrænse Covid-19 smittespredning og disse ses nu overalt i det eksisterende byggeri: Det være sig midlertidige og mere permanente løsninger. Man må antage, at muligheden for at tilvejebringe fleksible afstandskrav vil blive indarbejdet i de kommende nybyggerier, og evt. som ændringer i lovgivningen.

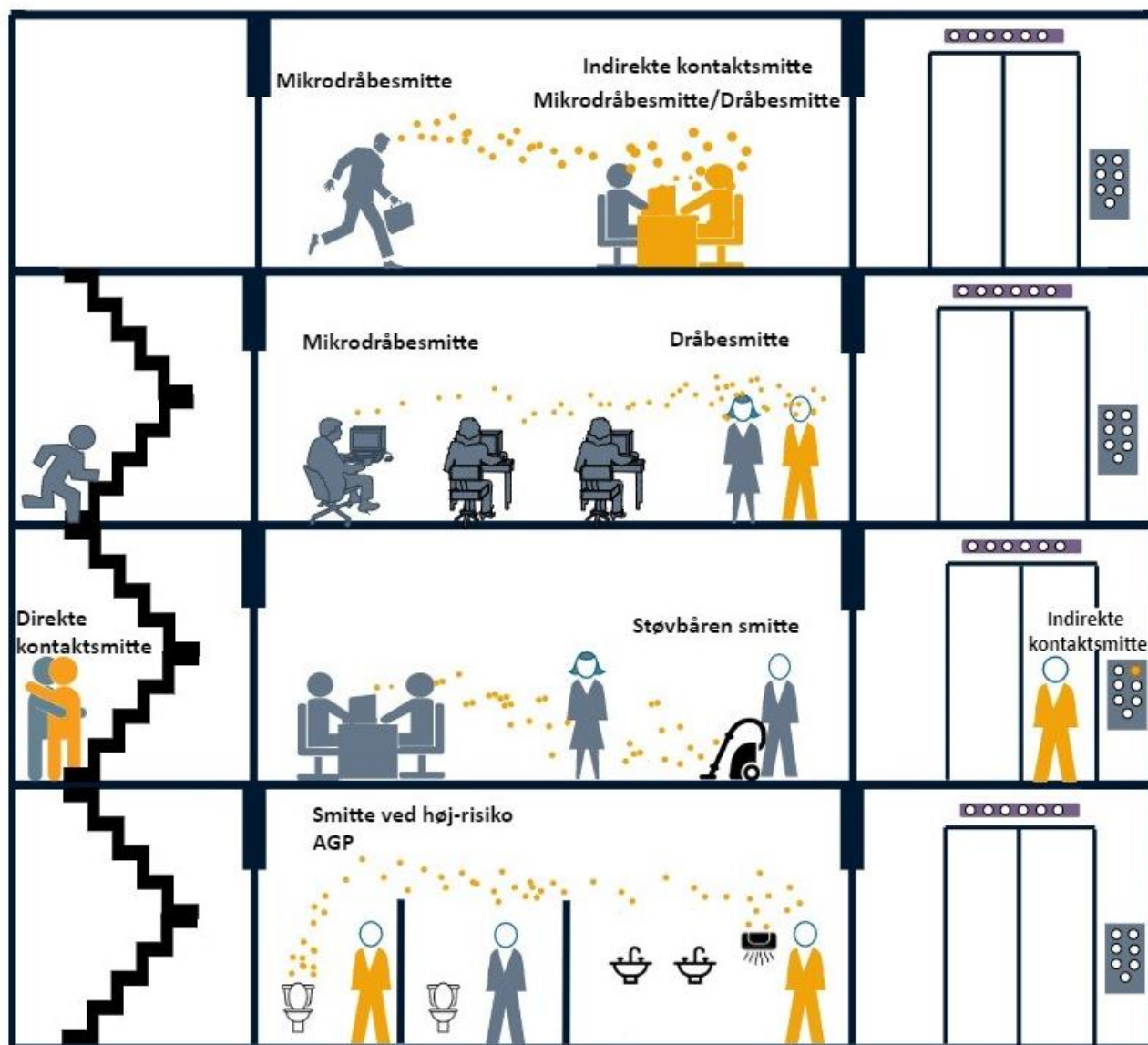
Person-flow i bygninger har stor betydning for smittebegrænsning, og her skal der nytænkning til. Her tænkes på bl.a. ensretning af person-flow, brug af elevatorer og trapper, færden i korridorer etc. Derudover kan de ændrede krav til bygningers anvendelse og indretning lede til, at eksisterende brandstrategi nødvendigvis må gentænkes. Hermed må der påregnes ikke ubetydelige økonomiske konsekvenser, ikke bare spatiale, men også tertiære. Midlertidige, bygningsintegrerede løsninger er et forsøg på at skabe større fysisk afstand mellem de tilstedeværende personer, som f.eks. markeringerne i gulvet og opsatte plexiglasskærme i forretninger og begrænsninger af antal personer pr. m². Udover person-flow skal indretningen af bygningerne eftertænkes så som zoneplaceringer ved indgange, hvor f.eks. håndvaske og/eller spritdispensere skal opsættes. Der skal tænkes i materialer, overflader, døre og dørhåndtag og ikke mindst de møbler, vi anvender. Vi kan se ud af den medicinske del af rapporten, at virus overlever længere på ujævne og ru overflader, disse bør således undgås. Ligeledes er der forskel på

virus overlevelse på træ, plast og metal overflader, men her skal der mere viden og forskning til for en bedre forståelse og indsigt.

Bygningens ydre fremtoning kan og vil også blive påvirket, idet vinduer og deres brug skal indgå i en smitte vurdering. Her tænkes på muligheden for at åbne vinduer og/eller vinduernes evne til at lukke UV stråler ind i bygningen.

Der skal ligeledes afses større arealer til tekniske installationer i en bygning, da det viser sig, at ventilationskravene kan stige og dermed behovet for større kanaler, indblæsning og udsugning.

Vi har i projektgruppen forsøgt at illustrere smittespredning i en bygning ved følgende illustration:



Figur 5. Smittespredningsscenarier i en bygning. (Danvak Covid-19 Projektgruppe illustration)
(AGP: Aerosol Generating Procedures → "Aerosol udviklende aktiviteter")

Smitte, bygningsdesign og adfærd

Med disse arkitektoniske, bygningsdesignmæssige og adfærdss indspark, kan vi se på den teknisk side af smittespredningen.

I Skandinavien bruger en person op mod 90 % af deres liv indendørs, og det er bredt anerkendt, at ventilation er en af de mest effektive måder at begrænse spredningen af smitsomme sygdomme i inde miljøer. Konklusionen er, at effektiv ventilation af bygninger er afgørende både i forhold til indeklima og reducere af risikoen for luftbåren smittespredning indendørs. Pointen er gyldig, også selvom det endnu ikke er bevist, at også SARS-CoV-2 er luftbåren. Den optimale systemløsning er at anvende mindre luft til at skabe højere luftkvalitet. Det er ligeledes vigtigt, at systemet i et givent rum automatisk sørger for, at luften skiftes ud. Derfor må det betragtes som rettidig omhu at øge fokus på at finde de ventilationstekniske løsninger, der kan sikre, at bygningerne får, velventilerede inde miljøer, sådan at beboere og brugere af bygninger kan beskyttes mod spredning af sygdom.

Ventilation er nødvendig for at holde mængden af luftbårne forurenende stoffer indendørs på et acceptabelt niveau. Dette kan gøres ved at fjerne forurenende stoffer. Disse kan være luftformige, fx fugt i form af vanddamp. Forurenende stoffer kan også forekomme i form af partikler. Partikler (aerosol, svævestøv) er faste eller flydende stoffer, som findes svævende i luften. Den forurenede luft transporteres ud af bygningen ved hjælp af ventilation.

Ventilation kan både udføres med behandlet og ubehandlet luft. Behandling af luft kan fx bestå i regulering af temperaturen og filtrering. Når man ventilerer en bygning, er der en strøm af luft til og fra bygningen, der også kan bruges til andre formål.

Hvis tilførsel af luftbårne forurenende stoffer til den indendørs luft ikke kan begrænses ved hjælp af kildekontrol, spredes forureningen hurtigt til hele luftmængden i et givent rum. Spredningen opstår både som et resultat af turbulent diffusion og af luftbevægelser. Resultatet er en generel stigning i indholdet af aktuel forurening i den indendørs luft. En almindelig måde at holde niveauet af luftbårne forurenende stoffer i den indendørs luft nede, er at skabe en fortynding af forureningen. En alternativ eller komplementær måde at mindske mængden af forurenende stoffer i indeluften, er at recirkulere indeluften gennem filtre, der er målrettet den type forurening, der ønskes frafiltreret.

For at være i stand til at erstatte luften i de bygninger, der skal ventileres, findes der tre forskellige ventilationsprincipper: naturlig ventilation, mekanisk ventilation og hybrid ventilation. (Hybrid ventilation kombinerer mekanisk og naturlig ventilation, efter behov.)

De tre typiske luftfordelingssystemer man arbejder med i Danmark, når det drejer sig om luftfordeling og fordeling af mikrodråber, er opblandingsventilation, fortrængningsventilation og diffus loftindblæsning. Der findes mange andre principper, men de fleste repræsenterer en variation af ovennævnte, og de er alle grundlagt på nogle forskellige fysiske effekter som:

- Opblanding af hele luftmassen ved impuls fra indblæsning
- Opblanding ved høj placering af luft med undertemperatur
- Termisk lagdeling ved lav placering af luftindblæsning
- Stempelstrømning i visse dele af luftfordelingen
- Lokal tilførsel af luft
- Lokal udsugning

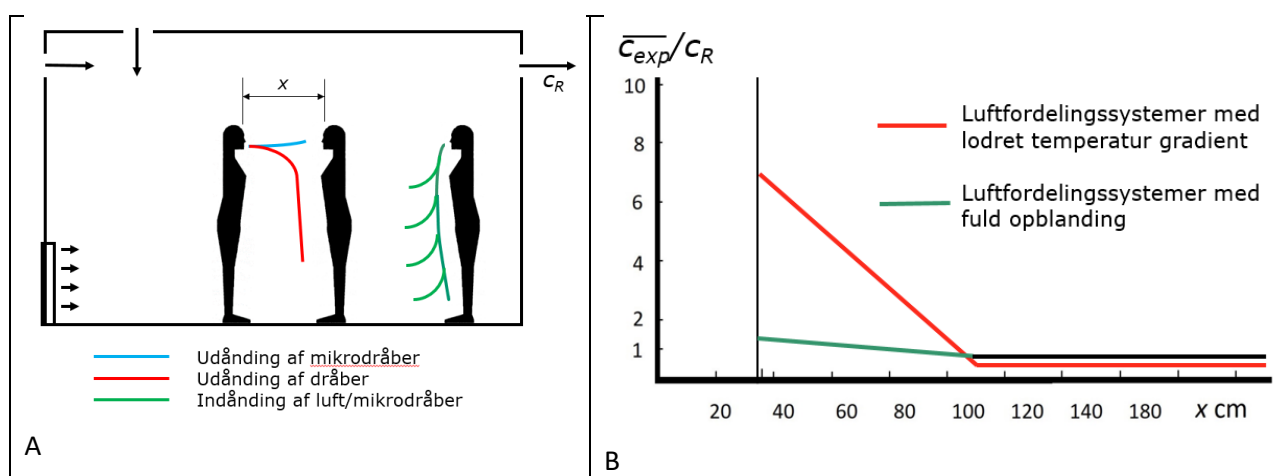
Systemer der skaber opblanding i alle drift situationer er simple systemer, der virker sikre i forbindelse med smittespredning. I princippet drejer det sig om at tilføre frisk luft til et lokale i en sådan grad, at koncentrationsniveauet af aerosoler er tilstrækkelig lavt således at en smitteoverførelse kan forhindres overalt i lokalet. I praksis opnås der ofte ikke en fuldstændig opblanding af den tilførte rene luft med den inficerede rumluft, og dette kan øge risikoen for luftbåren transmission.

For at få en oversigt over luftbåren smittespredning er det nødvendigt at se på situationen både ved kort afstand og ved længere afstand imellem de involverede personer. I kort afstand (smittespredning < 1.5 m) er de strømningsforhold der opstår i 'nærområdet' (micro-miljøet) omkring personer væsentlig for både dråbeinfektion og luftbåren smitteoverførelse. Strømningsforholdene er påvirket af luftfordelings princippet, rumgeometri og armaturernes placering, det vil sige:

- Temperaturer og vertikal temperaturfordeling tæt ved personerne
- Koncentrationsniveau tæt ved personerne
- Lufthastighed (størrelse og retning) tæt ved personerne
- Turbulensniveau tæt ved personerne

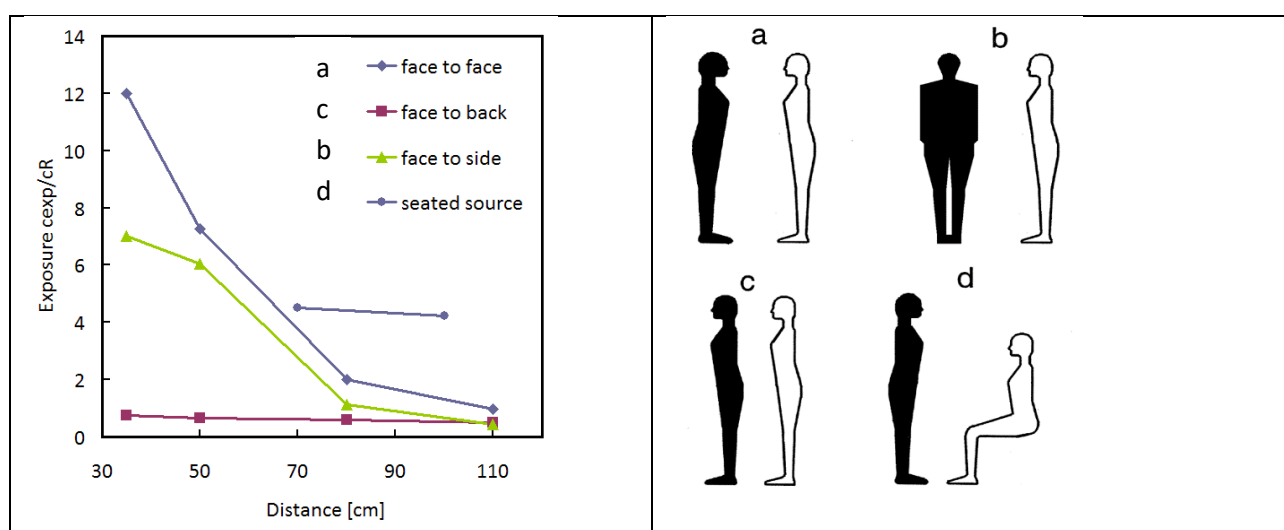
Smitteoverførelsen ved dråbe- og luftbåren aerosolspredning, er især styret af:

- Afstand imellem personerne
- Position, højde og orientering af personerne
- Aktivitetsniveau
- Luftbevægelse
- Åndingsfunktion (mund, næse, host, nys)
- Sang, råb
- Person antal
- Brug af mundbind



Figur 6. A) Overførelse af virus via luftbårne mikro dråber og dråber imellem to personer, der står over for hinanden. B) Den relative eksponering ved forskellig afstand imellem personerne.

Figur 6A skitserer strømningsforholdene tæt ved to personer. Det ses hvorledes udåndingen af mikrodråber fra en person (blå markering) kan strømme ind i en anden persons indåndingszone. Man kan også se, at der må være mange faktorer, som er af betydning, som for eksempel åndingsretning (mund, næse), person størrelse, mund geometri, aktivitetsniveau, temperatur, bevægelse, råb med mere. Hvis der opstilles en summering af resultater for mange forsøg med forskellige luftfordelingssystemer og samme termiske manikin, viser det sig, at der også vil være en indflydelse fra makro strømninger omkring personerne. Figur 6A viser ligeledes, hvordan indåndingen foran en person, der står i uforstyrrede omgivelser, indånder luft (grøn markering) fra hele højden af personen, da luften transporteres op til åndingszonen via den termiske opadgående strømning omkring personen. Figur 6A viser ligeledes hvordan dråber i princippet forløber uforstyrret af luftfordelingen og falder til jorden (rød markering). Dette er dog en tilnærmelse, som udfordres i den nye forskning.



Figur 7. Overførelse af virus via luftbårne aerosoler imellem to personer der står over for hinanden i forskellig afstand og i forskellig position. Fortrængnings ventilation.

Figur 7 viser, hvorledes overførelsen er størst, når personerne står ansigt til ansigt, medens den falder, når den person, der er i fare for at blive smittet, står med siden til. Den hvide figur illustrerer smitekilden, og den sorte figur illustrerer personen der smittes, Figur 7. Når personen vender ryggen til smitekilden, er det kun baggrundskoncentrationen af mikrodråber, der vil blive inhaleret. Der altså tale om en meget høj beskyttelse svarende til den påvirkning, der også er til stede for afstande større end 1,5 m.

Figur 7 viser desuden, den situation hvor den siddende smitekilde ved fortrængningsventilation danner et stratificeret lag med høj koncentration i større afstand imellem personerne. Dette resulterer i en høj eksponering uafhængig af afstand.

Genereringen af mikrodråber, og derfor eventuelle luftbårne virus, vokser afhængig af størrelsen af personens aktivitetsniveau og åndingsvolumen. Eksponeringen i en afstand af 0,35 m vokser til det dobbelte ved en forøgelse af aktivitetsniveauet fra stående afslappet tilstand (1,2 MET) til for eksempel at løfte pakker (2 MET). Betydningen af aktivitetsniveauet bør for eksempel betragtes i forbindelse med fitness rum, hvor 'work out' nemt kan forøge en smittet persons udløsning af virus med en faktor 10-20.

Brug af mundbind har været meget diskuteret i forbindelse med Covid-19 pandemien. Det er dog klart, at mundbind beskytter effektivt i kort afstand ved at nedbryde det strømningsmønster, der skabes tæt ved en person ved ånding, tale, sang, hoste og nys. I situationer hvor alle er påbudt at bære mundbind, vil der være sikkerhed for at smitekilder også bærer mundbind og dermed beskytter omgivelserne for dråbeinfektion og mikrodråber i den korte afstand. Denne beskyttelse består især i, at udåndingsstrålen brydes foran den person, der er smittet og derfor får en kortere rækkevidde.

Dråbeinfektion er en afgørende smitekilde i nærfeltet, se Figur 6A. Ved ånding, tale, råb og sang kan en person, der er smittet, udånde dråber der indeholder virus. Alt efter størrelse følger dråberne i princippet i en ballistik bane og lander på overflader, såsom gulvet og andre vandrette flader. Denne smittevej er i princippet ikke påvirket af ventilationen. Men i luftbevægelsen foregår der en fordampning af dråberne, og de mindre dråber mister hurtigt størrelse og kan overgå til luftbårne mikrodråber, som naturligvis er påvirket af ventilationen.

Dråber skal have en vis størrelse for at falde til gulvet i en ballistisk bane. En dråbe skal være større end 50-100 μm for at have en stor sandsynlighed for at lande 1-2 m fra den person, der er smitekilde. Lokal turbulens kan forlænge dens opholdstid i luften. Dråber af størrelsen 50-100 μm kan transporteres langt over 1-2 m, specielt ved at nyse eller hoste.

Ovenstående er vigtig at forstå, og derfor er figur 2 kreeret af projektgruppen.

Smittespredning, teknik og vedligehold

De tekniske systemer i en bygning kan have indflydelse på smittespredning, hvorfor valg af den korrekte luftrensning og en klar drifts- og vedligeholdelsesstrategi, er yderst afgørende.

Forekomsten af vira inde i bygninger kommer med større sandsynlighed indefra end udefra, også selvom meget tyder på, at vira kan overføres med luften. Filtre i ventilationssystemer og luftrensere med HEPA-filtre kan hjælpe med at reducere luftbårne og forurenende stoffer, herunder vira i en bygning eller i et rum og de kan forhindre overførsel af inficerede aerosoler til tilstødende lokaler. Dette forudsætter at de er installeret og anvendes korrekt. I sig selv er luftrensning, dekontaminering eller filtrering ikke nok til at beskytte personer mod eksponering af vira som eksempelvis Covid-19. En inficeret person vil altid forurene luften, hvis der ikke anvendes effektiv kildekontrol. Når luftrensning anvendes sammen med de af myndighederne udstedte retningslinjer, kan filtrering være en del af en plan for at reducere chancen for luftbåret indendørs transmission af infektiøse vira som SARS-CoV-2.

Varme-, ventilations- og klimaanlæg, vand og afløbssystemer, der er velholdt og betjent korrekt, bør ikke øge risikoen for virusoverførsel. Bygningstekniske systemer til både boliger og bygninger som f.eks. offentlige bygninger, skoler, hoteller, mm. skal inspiceres, vedligeholdes og rengøres regelmæssigt for at forhindre transmission af virus.

Korrekt drifts- og vedligeholdelsespraksis skal være til stede. Den skal give information og instruktion til vedligeholdelsespersonalet for korrekt udførelse af opgaverne. Standarder for installation og vedligeholdelse

af ventilationssystemer er altafgørende for at sikre, at de er effektive og bidrager til et helbreds-mæssigt sundt og godt indeklima. Vedligeholdelsespersonalet skal følge arbejds- og hygiejnepraksis i drifts- og vedligeholdelsesplanen, herunder alle nødvendige sikkerhedsforanstaltninger for minimering og mulig eksponering af patogener. Korrekt drifts- og vedligeholdelsespraksis skal beskytte både driftspersonalet og andre i bygningerne.

Måling af virus og virus spredning

Fundamentet for at kunne opdage, se og bedømme koncentrationen af vira og smittespredningsstyrken, er målemetoder. Her tænker vi både på medicinske og ventilationstekniske målemetoder.

Til bestemmelse af mikrobiologisk indhold i prøver fra indeklimaet er det vigtigt, når man planlægger studier af luftbåren virus eller bakterier, at man benytter en metode, der er velegnet til det aktuelle forskningsspørgsmål. Specielt gælder dette for undersøgelse af levende virus eller bakterier, hvor der kræves specielle målemetoder. De klassiske metoder til opsamling af støv, kan alle benyttes til bestemmelse af virus- og bakterierelaterede partikler vha. moderne DNA-baserede analysemetoder.

Ventilationstekniske målemetoder relateret til luftbåren smitte inkluderer målinger af mængden af tilført ventilationsluft, lufttryk samt fordeling af lufttemperatur, hastighed (størrelse, retning, turbulens), relativ fugtighed, CO₂ og partikler i rum. Termiske dukker med kunstige lunger anvendes for at generere luftstrømme og mikrodråber som er opstået ved bl.a. udånding, tale, hoste. Dukkens eksponering vurderes ved målinger af indåndet luft og partikler. Transport af udåndet luft (markeret med sporgas og partikler) i bygninger, mellem rum, inden for enkelte rum og i ventilationssystemet undersøges. Flow-visualisering er en enkel metode til at forstå luftfordelingen i rum og mellem rum og bruges til hurtig vurdering af potentialet for eksponering for luftbårne partikler.

Det er i projektgruppen konkluderet, at vi mangler betydelig forskning og væsentlig bedre værktøjer, for at kunne måle levende vira, bakterier og luftbåren smittespredning. Kortlægning af smittespredning forudsætter ligeledes en væsentlig bedre indsigt i hvordan forskellige virus inficerer et menneske. Der mangler yderligere forståelse, forskning og redskaber for at komme nærmere fuld gennemslagskraft af virus smitte.

Her skal vigtigheden af et tæt samarbejde på tværs af faglige specialer fremhæves, for at komme til resultater og løsninger, som fremadrettet kan være til stor værdi for samfundet.

Smitte, Forholdsregler og Aktioner

Projektet har forsøgt at skemalægge hvilke forholdsregler og aktioner der skal ved de definerede smittemåder.

SMITTE, FORHOLDSREGLER og AKTIONER				
Smittemåde	Hvordan sker smitten	Forholdsregler med effekt	Arkitektoniske løsninger	Tekniske løsninger
Direkte kontaktsmitte	Mellem to personers hud eller slimhinder	Isolation (enestue) Håndhygiejne Rengøring Evt. overtrækskittel/handsker	ingen	ingen
Indirekte kontaktsmitte	Via hænder eller overflader	Isolation (enestue) Håndhygiejne Rengøring Evt. overtrækskittel/handsker	Materialevalg Håndfrie løsninger Nudging	Kontaktløs aktivering UV-bestråling af genstande Luftfugtighed
Dråbesmitte	Dråber som rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**) inden for 1 m afstand (armslængde)	Isolation (enestue), Maske (kirurgisk)*** Øjenbeskyttelse***, Håndhygiejne Rengøring, Overtrækskittel/handsker Ansigtsskærme, Mundskærme	Indretning Personflow i bygning	Ventilation, Luftflow Luftfugtighed, Varme/køle metoder Vertikale skærme og lufttæpper
Luftbåren (mikrodråbesmitte)	Dråber som opstår ved sang, fysisk aktivitet	Isolation (enestue), Maske (kirurgisk)*** Øjenbeskyttelse***, Håndhygiejne Rengøring, Ansigtsskærme, Mundskærme	Indretning Personflow i bygning Nudging	Ventilation, højt luftsifte, se ***** Vertikale skærme og lufttæpper Luftfugtighed Varme/køle metoder
Luftbåren (dråbekernesmitte)	Dråbekerner som inhaleres og/eller rammer modtagerens ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation (slusestue) med undertryksventilation Åndedrætsværn FFP2/3 Øjenbeskyttelse Håndhygiejne Rengøring Overtrækskittel/handsker	Indretning Skærmopdeling Personflow i bygning Nudging	Ventilation Luftflow Luftfugtighed Varme/køle metoder
Smitte ved høj-risiko AGP*	Risiko for spektrum inkl. mikrodråber, som inhaleres og/eller rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation Åndedrætsværn FFP2/3 Øjenbeskyttelse Håndhygiejne Rengøring Overtrækskittel/handsker	Indretning Skærmopdeling Personflow i bygning Nudging	Ventilation Luftflow Luftfugtighed Varme/køle metoder
Smitte ved lav-risiko AGP*	Risiko for dråber, som rammer modtagers ansigtsregion (eller overflader**)	Isolation Maske (kirurgisk)*** Øjenbeskyttelse*** Håndhygiejne Rengøring Overtrækskittel/handsker	Indretning Personflow i bygning	Ventilation Luftflow Luftfugtighed Varme/køle metoder
Støvbåren smitte	Partikler bestående af støv, sedimenterede dråber, dråbekerner eller aerosoler, afstødte hudceller m.m. Kan resuspenderes i luft og sedimentere	Isolation (enestue) Håndhygiejne Rengøring Evt. overtrækskittel/handsker	Indretning Materiale valg Inventar valg Personflow i bygning	Luftflow Højt luftsifte, se*****

Figur 8. En samling af forholdsregler, arkitektoniske og tekniske løsninger relateret til et smitteområde. (Skemaet er udført af Danvak Covid-19 projektgruppen)

* AGP - Aerosol Generende Procedure

** Når sedimentation er sket på overflader, er der risiko for indirekte kontaktsmitte

*** Indenfor 1 m. afstand

**** Mikrodråber har vanskeligt ved at berøre overflader, men kan til gengæld føres dybt ned i lungerne

***** UV-bestråling i kanalsystem, HEPA filtre

Faktum er, at projektgruppen har været hundredvis af nationale og internationale artikler og Papers igennem. Det er tydeligt, at der indenfor medicinske-, arkitektoniske- og ventilationsområderne stadig mangler viden, for at kunne kreere bedre løsninger og dermed kunne imødekomme og nedbringe smitte ved fremtidige epidemier/pandemier.

Virus egenskaber bliver påvirket af forskellige fysiske faktorer, tilstedeværelse af organisk materiale og forskellige typer af overflader samt luftbevægelse, luftstrømninger og luftsifte. Nogle virusinfektioner ændrer sig i forhold til sæson, og der kan være forskelle forårsaget af klimatiske regioner og vejrforhold. I forbindelse med SARS-CoV-2's overlevelse og påvirkning er der gennemført en række studier, som har undersøgt effekten af forskellige miljøfaktorer. Men som nævnt ovenfor mangler der stadig viden om, hvordan miljøfaktorer påvirker virus.

Det ved vi – det ved vi ikke, hvad skal vi gøre i fremtiden?

Det ved vi om SARS-CoV-2:

Virus overlevelse begrænses ved stigende temperatur. Ved stuetemperatur (22°C) kan SARS-CoV-2 overleve 4-7 dage, mens den ved 4°C, -20°C og -80°C kan overleve i mere end 3 uger; temperatur på 55°C kan reducere overlevelse til 30 minutter. Forøget relativ fugtighed forkorter opholdstid for dråber i luften, som derfor falder hurtigere på jord. Bestråles virus med UV-lys dræbes den, og dette er måske årsagen til, at der opstår så få infektioner udendørs og risikoen for smitte er relativ lav, i forhold til når man befinder sig indendørs. Tilstedeværelse af (beskyttende) organisk materiale, fx luftvejssekret, forlænger overlevelse af virus. Virus overlever forskelligt på forskellige overflader og i luften. Halveringstiden i luften regnes til at være 1,5 time, dog meget længere på overflader, hvor virus kan overleve op til 72 timer afhængig af overfladetype, dog længst på rustfri stål og plastik. Overflader som er ujævne med riller, sprækker og sammenføjninger forlænger overlevelsestiden. Fordelingen af virus i et lokale afhænger af mange parametre, som fx geometri af lokalet, fordeling af varme- og kuldebelastning (temperatur gradienter), positionering af personer, retning og højdeniveau af ansigter, personens bevægelse og aktivitetsniveau så vel som luftfordelingssystemets indflydelse på mikro- og makro-miljøet. Risiko for infektion reduceres ved tilstrækkelig ventilation.

Det ved vi IKKE om SARS-CoV-2:

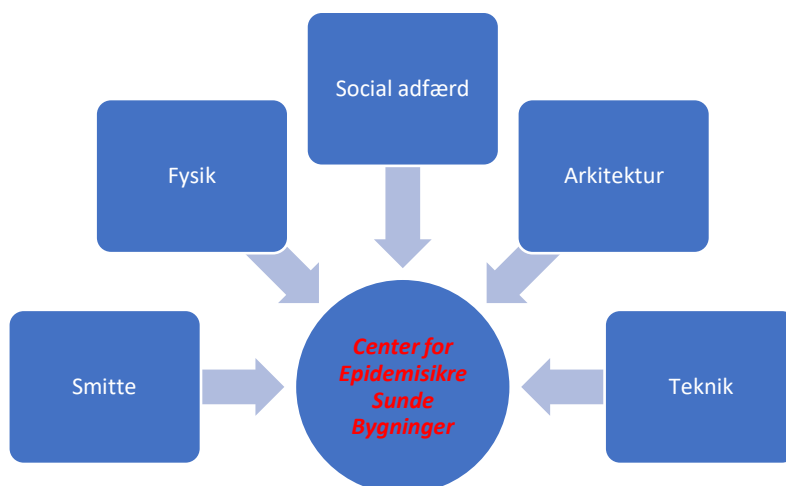
Der mangler stadigvæk viden omkring effekten af luftens fugtighed på overlevelse af virus. Der findes kun enkelte studier, som har undersøgt sammenspil af forskellige faktorer på virus overlevelse, mest UV og temperatur. Studier omkring overlevelse på overflader og i luften var i de fleste tilfælde udført under simple forhold vedr. de fysiske faktorer. De fleste studier, som har undersøgt effekten af luftfordeling, er blevet udført i laboratorier med åndende manikiner eller som modelstudier. Studier fra rigtige lokaler og bygninger er utilstrækkelige. Beregninger af udluftning er hovedsageligt baseret på modeller, som forudsætter god opblanding af luften, også i mikro-miljøet, hvilket sjældent er tilfældet. Der mangler viden om, hvor meget udluftning der skal til for nedsætning af smitte. Studier er baseret på Wells-Riley model som antager et kunstigt begreb som kaldes "quantum", som definerer en risiko for infektion og er ikke baseret på en dosis, som er nødvendigt til at fremkalde infektion.

Der mangler således teknisk-, adfærds- og medicinsk viden, for at vi i fremtiden kan designe, bygge og teknisk- og adfærds-mæssigt indrette bygninger til at modstå fremtidige epidemier/pandemier.

Under denne Covid-19 pandemi, har vi set hvilke økonomiske, psykiske og sociale omkostninger en pandemi kan have. Det er derfor tvingende nødvendigt at fortsætte arbejdet med at afdække de områder, vi mangler viden om og dermed i fællesskab og på tværs af fag, afdække hvad vi skal gøre for at være bedre forberedt til at håndtere en eventuel fremtidig epidemi/pandemi.

Vi vil derfor foreslå, at der dannes et fælles center, som favner alle relevante faglige kompetencer, og som kan arbejde videre på at finde løsninger til, hvordan vi som samfund skal forbedre bygninger, der kan tage højde for eventuel smitte – både i relation til eksisterende byggeri og nyt byggeri.

Projektgruppens forslag er et center der hedder: ”Center for Epidemiske Sunde Bygninger” – **CESBY**
Vi har illustreret dette i nedenstående figur 9:



Figur 9. Danvak Covid-19 projektgruppens illustration af hvilke områder der bør indgå i et fremtidigt forskningscenter for begrænsning af smitte i bygninger.

Del 7 - Konklusion:

Pandemier har historisk set ramt verden på forskellige måder. COVID-19 præsenteres som en global pandemi, og der er mange spekulationer om konsekvenserne af denne krise for menneskers hverdag, herunder hvordan det påvirker deres arbejdspladser. I denne rapport diskuterer projektgruppen Danvak Covid-19 flere af de mest relevante forsknings- og praksisemner inden for medicinsk, arkitektonisk og ventilationsmæssige spørgsmål, der sandsynligvis vil blive stærkt påvirkede af COVID-19. For hvert af disse emner skaber pandemikrisen nye udfordringer. Rapporten har taget udgangspunkt i den nuværende pandemi med SARS Cov-2, men formålet er at tage ved lære af den nuværende situation og dermed forberede os på fremtidige lignende situationer.

Under projektforløbet er spørgsmålet ”er SARS Cov-2 luftbåren eller ej”. Ved projektets afslutning er der stadig uenighed om den nye virus er luftbåren eller ej, men projektgruppen er kommet frem til, at det er et definitions- og nomenklaturproblem imellem faggrupper.

Der er blevet arbejdet på en fælles forståelse og et definitionsskema er fremkommet som der er generel enighed imellem faggrupperne om. Skemaet kan ses i figur 2 i Resuméet.

Skemaet er fremkommet ved en detaljeret fagteknisk gennemgang af problematikkerne, set ud fra de tre fagdiscipliner, hvilket kan læses i hovedrapporten.

Projektet har valgt at bibeholde den skrevne stil fra hver faggruppe og dermed har vi ikke strømlinet rapporten. Hermed kan man se forskellighederne i de enkelte fag.

Den vigtigste konklusion af samarbejdet er opdelingen af partikel størrelser i forhold til nær og fjernfelt. Opdelingen af de aktuelle anvendte benævnelser i den ventilationstekniske og den medicinske sektor samt enigheden om at benytte fællesbenævnelserne *kort-, mellem- og langdistance smitte*. At komme til denne enighed har været en lang og besværlig vej, da man specielt indenfor det medicinske fag felt skal tage hensyn til hele sundhedssektorens forhistorie og den måde man beskytter sundhedspersonalet mod smitte. Projektgruppen betragter derfor ovenstående som banebrydende.

Selve iagttagelsen af hvordan smitte sker imellem mennesker og her henvises til figur 3 og 4 i Executive summary og hvordan virus overlever, har haft en stor betydning for hvordan projektgruppen har diskuteret løsninger for begrænsning af smitte.

De fysiske forhold, virusbiologi, smitteegenskaber, materialer og måske vigtigst menneskelig adfærd er ALLE faktorer som spiller ind på hvordan en virus kan overleve, smitte og bringe samfundet ud af balance.

Rent historisk har vi set lignende situationer, man har tidligere indført tiltag for begrænsning af smitte, men vi har i dagens samfund desværre ikke videreført de gamle erfaringer. Den kraftige urbanisering og den tætte nærkontakt vi i dag har, gør at vi bliver meget sårbare overfor smitsomme vira.

Projektgruppen har elaboreret over tidligere benyttede tiltag og set på moderne måder at komme med løsninger på. Dette har resulteret i en oversigt (se figur 8 i Resuméet), der oplister hvad man kan gøre ved forskellige smitemåder, hvilke forholdsregler der skal tages og hvilke arkitektoniske- og ventilationsmæssige løsninger man kan benytte.

Menneskelig adfærd kan være meget svær at ændre på. Man kan dog benytte sig af værktøjer indenfor arkitekturen, som fx bygningsindretning, nudging, berøringsfri mekanismer etc.

For at yderligere at forebygge smitte kan man anvende tekniske løsninger. Derfor er alle kendte ventilationstekniske muligheder gennemgået med forslag til hvad man kan gøre omkring ventilation, luftmængder, luftfugtighed etc. Det er meget vigtigt at vi indfører nye krav til nybyg, så vi har forberedt

vores kommende bygninger til de periodevis forøgede ventilationsmængder, samt at vi under renoveringer ligeledes tilgodeser ventilationstekniske løsninger, som kan hjælpe med at begrænse smitte.

Vi ser desværre også at kontaminering af ventilationsanlæg meget ofte sker pga. ringe drift og vedligehold af anlæg, hvorfor der skal sættes stor fokus på dette område. Beskidte filtre eller ventilationskanaler er rene bomber under folkesundheden, samtidig med at energiforbruget ved dårligt driftede- eller vedligeholdte ventilationsanlæg er en unødigt energisluger.

Fundamentet for at kunne opdage, se og bedømme koncentrationen af vira og smittespredningsstyrken, er målemetoder. Her tænker vi både på medicinske og ventilationstekniske målemetoder. Det er i projektgruppen konkluderet at vi mangler betydelig forskning og væsentlig bedre værktøjer for at kunne måle smitte og smitte spredning. Rapporten gennemgår også dette.

Projektgruppen er derfor enige om, at der mangler yderligere undersøgelser og forskning indenfor både medicin, arkitektur og ventilation for at være bedre klædt på til fremtiden, men også menneskets adfærd skal inddrages i denne forskning. Projektgruppen foreslår derfor at der etableres et ”Center for Epidemiske Sunde BYgninger” (CESBY), (se figur 9 i Resumé). Her skal man samle medicinere, adfærdsforskere, arkitekter, fysikere, ventilations- og bygningsfolk og arbejdere videre på at finde fremtidens løsninger for hvordan vi skal indrette vores bygninger, påvirke menneskets adfærd og hvilke teknikker der skal fokuseres på. Alt dette som en ”folkesundhedens advokat” og for at skabe en balance i forhold til regeringens mål om CO₂- og energireduktion.

Vi ser også at dette center ”CESBY” skal hjælpe vores regering og styrelser til at komme med opdaterede love, regler, anvisninger og standarder, så vi får et sunder, bedre og energi- og klimamæssigt mere optimalt byggeri i Danmark. Med yderligere forskning indenfor de områder vi i denne projektgruppe har beskæftiget os med, kan vi måske nedsætte de årlige influenzaepidemier og forkølelse, som årligt koster den danske samfund milliarder i tabt arbejdsfortjeneste pga. sygdom og hospitalsindlæggelser. Det er her vigtigt at fastslå, at uden et tværgående forskningssamarbejde, vil vi aldrig lykkedes med at opnå de ønskede mål.

Vores rapport er meget lang og på visse områder teknisk meget kompliceret, hvorfor der er skrevet et kort Resumé. Ønsker man yderligere uddybning henvises der til hovedrapporten.

For at få synspunkter og nye ideer omkring vores rapports indhold, blev der afholdt en konsensuskonference med inviterede parter fra sundhedssektoren, rådgiverbranchen, bygningsejere, indeklimaforskningen og ventilationsbranchen. I rapportens bilag er der sammendrag af denne konference og konferencedeltagernes input.

Vigtige pointer:

1. Projektgruppen var etableret med forskere og specialister indenfor medicin, tekniske fag som ventilation og VVS samt arkitektur i Danmark.
2. Projektgruppen har opstillet en model for fælles definitioner for smittespredning som danner fælles sproglig forståelse mellem forskellige fagligheder indenfor dette område.
3. Projektgruppen har forsøgt at illustrere smittespredning i bygninger og viden som kan bruges til at identificere nye tekniske og arkitektoniske løsninger. De fysiske forhold, infektionsbiologi, smitteegenskaber, materialer, tekniske løsninger bl.a. ventilation og menneskelig adfærd inkl. person-flow i bygninger har stor betydning for smittespredning.

4. Projektgruppen har tydeliggjort, at der mangler viden omkring nogle af de fysiske forhold af betydning for overlevelse af virus. Der mangler således teknisk-, adfærds- og medicinsk viden, for at vi i fremtiden kan designe, bygge og indrette bygninger til at modstå nye pandemier.
5. Økonomiske, psykiske og sociale omkostninger i en pandemi er en anden vigtig parameter, som ikke blev en del af projektet, men dette bør have fokus i fremtidig forskning.
6. Projektgruppen anbefaler etablering af et tværfagligt "Center for Epidemiske Sunde Bygninger" (CESBY) indenfor infektionsmedicin, fysik, social adfærd, arkitektur og teknik for at imødekomme fremtidens behov for en lav smitterisiko – både i eksisterende byggeri og nybyggeri.

Alle deltagere i projektgruppen skal takkes for det store og dedikerede arbejde der er lagt i denne rapport. Langt over halvdelen af arbejdet er udført på frivillig basis og med økonomisk hjælp og støtte fra projektdeltagernes egne organisationer. Sidst men ikke mindst, skal der lyde en stor tak til Realdania for den økonomiske støtte til projektet, uden denne var vi ikke kommet i mål.

I et håb om at dette projekt må fortsætte efter ovenfor nævnte koncept og i fremtiden skabe nye trends og retningslinjer indenfor dansk byggeri, siger Danvak tusinde tak for samarbejdet.

Del 8 – Bilag 1: Konsensuskonference Referat

Emne: Danvak Covid-19 Konsensuskonference

Møde dato: 18. juni 2021

Møde sted: Tivoli Hotel og Conference Center

Til stede:	Alireza Afshari	Aalborg Universitet
	Anne Gade Iversen	Realдания
	Arsen Krikor Melikov	Danmarks Tekniske Universitet
	Bjarne W Olesen	Convenor
	Carsten Bjerregaard	COBBELSTONE
	Christian Nicolai Nielsen	Teknologisk Institut
	Claus Andreasson	Danvak
	Elsebeth Tvenstrup Jensen	Statens Serum Institut
	Johannes Utoft Christensen	Bolig og Planstyrelsen (BR)
	Johnny Henrik Nielsen	COBBELSTONE
	Jürgen Nickel Rambøll	Rambøll
	Kiril Georgiev Naydenov	Rambøll
	Lau Raffnsøe	Green Building Council
	Lene Anette Norberg	Kommunallægerne
	Li Rong	Aarhus Universitet
	Merete Bilde	AU Chemistry
	Merete Lyngbye	Teknologisk Institut
	Mette Dan-Weibel	Link Arkitektur A/S
	Mette Scheel-Hincke	Odense Kommunes børn- og ungelæger
	Niels Skals	Rambøll
	Pawel Wargocki	Danmarks Tekniske Universitet
	Per Højbjerg	VELTEK / NB Ventilation
	Steffen E. Maagaard	MOE-Rådgiver
	Sven Jensen Seiberg	Sweco
	Thomas Enghave Olsen	Danvak
	Tina Michelsen	Danvak
	Torben Sigsgaard	Århus Universitet

Referat

Dagens agenda var som følger:

08:30 – 09:00 Indskrivning og morgenmad

09:00 – 09:15 Velkommen og indledning af Claus Andreasson, Generalsekretær Danvak

09:15 – 09:35 Rapport del 1 – Medicinske og Virologiske gennemgang v. Elsebeth T. Jensen

09:35 – 09:50 Rapport del 2 – Bygningsindretning – materialer og logistik v. Mette Dan-Weibel

09:50 – 10:10 Rapport del 3 – Ventilation og indeklima v. Alireza Afshari

10:10 – 10:25 Kaffe samt telefon og mail tjek 😊

10:25 – 10:40 Rapport del 4 - Luftbåren infektionsrisiko og strategier til ventilationskontrol
v. Kiril G. Naydenov

10:40 – 10:55 Rapport del 5.1 – Opsamlingsmetoder af luftbåren virus v. Torben Sigsgaard

10:55 – 11:10 Rapport del 5.2 – Ventilationstekniske målemetoder v. Arsen Krikor Melikov

11:10 – 11:25 Introduktion af gruppe- og fælles diskussion v. Claus Andreasson

11:30 – 12:00 Gruppediskussion af rapportdele 1 til 5

12:00 – 12:45 Frokost samt telefon og mail tjek 😊

12:45 – 13:30 Fortsættelse af gruppediskussion af rapportdele 1 til 5 og ”post-it” opsætning

13:30 – 15:00 ”post-it” præsentation af Del-ansvarlige – fælles diskussion og feedback

15:00 – 15:10 Kaffe samt telefon og mail tjek 😊

15:10 – 15:40 Fælles brainstorm – Hvilke behov har vi for at undgå pandemier/hvad mangler vi?

15:40 – 15:50 Præsentation af en fælles konsensus statement og kommentarer v. Claus Andreasson

15:50 – 16:00 Danvak Covid-19 gruppens afsluttende bemærkninger/tak for i dag. v. Claus
Andreasson

Velkommen:

Formålet med konsensuskonferencen er at følge op på den foreløbige rapport som projektgruppe har skrevet. De inviterede deltagere havde fået den foreløbige rapport tilsendt og under konferencen skulle der ”brainstormes” over rapportens indhold og eventuelle manglende emner skulle tages op.

Rapport præsentationer:

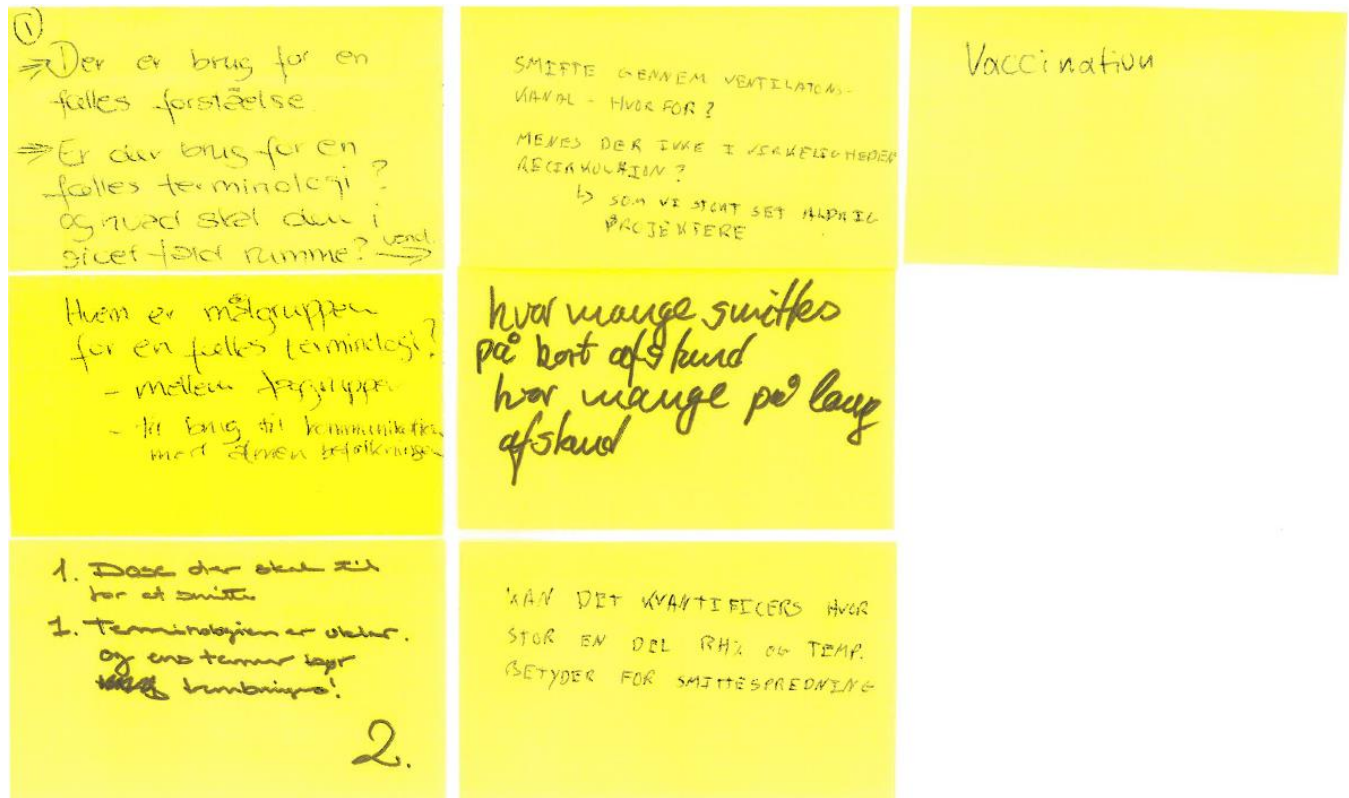
Hvert afsnit af rapporten blev kort præsenteret af den del-ansvarlige. Dette kan ses af agenda ovenfor. Der blev fremført i alt 6 del præsentationer.

Introduktion til gruppearbejde og fælles diskussion

For gennemførsel af gruppearbejde under konsensuskonferencen er alle blevet opdelt i grupper. Hver gruppe består af en blanding af personer fra de tre faggrupper (medicin, arkitektur, ventilation). Hver gruppe skal diskutere alle afsnit i rapporten og komme med forslag, indvendinger, forbedringer, nye tiltag etc. Når gruppearbejdet så er tilendebragt vil hver rapport del-ansvarlig gennemgå de kommentarer der er kommet til rapporten. For overordnede kommentarer blev der etableret en "fælles-tavle" hvor de overordnede kommentarer kunne noteres.

"Post-it" gennemgang af del-ansvarlige og diskussion

Del 1 - Medicinske og Virologiske: Delansvarlig – Elsebeth T. Jensen



DEL - 1

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

På post-it 1 → vend står der:

Hvem er målgruppen for en fælles terminologi?

– mellem faggrupper

– Til brug for kommunikation med almen befolkning

Yderligere forslag til Del 1 under diskussion:

- 1) Tabel over smitte i forskellige cases, fitness/klasseværelser/restauranter etc.
- 2) Involver styrelsen for patientsikkerhed
- 3) I hvilken kontekst bliver man smittet
- 4) Der mangler information omkring virus overlevelse (tid, omgivelsernes forhold så som temp./luftfugtighed/overflader etc.)

Del 2 - Bygningsindretning – materialer og logistik: Delansvarlig – Mette Dan-Weibel



DEL - 2

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

Yderligere forslag til Del 2 under diskussion:

- 1) Det berøringsfri samfund bør uddybes
- 2) Fleksibilitet i bygningsdesign. Man skal definere hvor fleksibiliteten skal være, hvor stor og hvad er prisen (fleksibilitet er dyr! Så det skal undersøges), men det er muligt mener gruppen.
- 3) Meget af dette er politisk bestemt – der skal politisk involvering ind over dette emne.
- 4) Økonomi er ikke adresseret – et meget vigtigt emne som bør undersøges.
- 5) Nudging kan bringe os langt – der ønskes uddybning af mulighederne for brug af nudging.
- 6) Et ønske om flere konkrete eksempler på løsninger

Del 3 – Ventilation og indeklimate: Delansvarlig – Arsen K. Melikov – indlæg af Alireza Afshari

Hvæd med støj? Er det en "komfort" eller skal tages højde for?	Fortrængningsventilation kan også bruges i opvarmings sæson, men ikke som opvarmingsystem	More om naturlig ventilation og hvordan det kan bruges
Hvordan skal/kun man vælge tiltag i ft. - energiforbrug - økonomi - ressourceforbrug entlæg drift	Hjælper generel ventilation på smitte i noroverdelt	3. 'Hvordan opnås mindre pladskrav under Anlæg.' • CO₂-personmeter
Prioritering af løsninger	Generel beregningsligning ved guideline til at beregne risici	Lovgivning og fx. udfordringer med veligehold af decentrale enheder i "privat sektor"

DEL - 3

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

VALIDERING/KONTROL AF
BEREGNINGS MODELLER

KAN VI I BRANCHEN STOLP PÅ
DEM OG ER DE INTERNATIONALT
ANERKENDT?

kap 3+4
skal måske
skrives som

Fremtidens
styring af
kontorventilation
under pandemier
(luftmængde, tryk,
behovsstyring, mv)

MEDELTIDIGE LUFTRENSERE / + HERA-FILTR
SÅ VI KAN HOLDE GÅRD I
SAMFUNDET.

Ventilation er
ikke kun komfort
men også virus,
fugt mv.

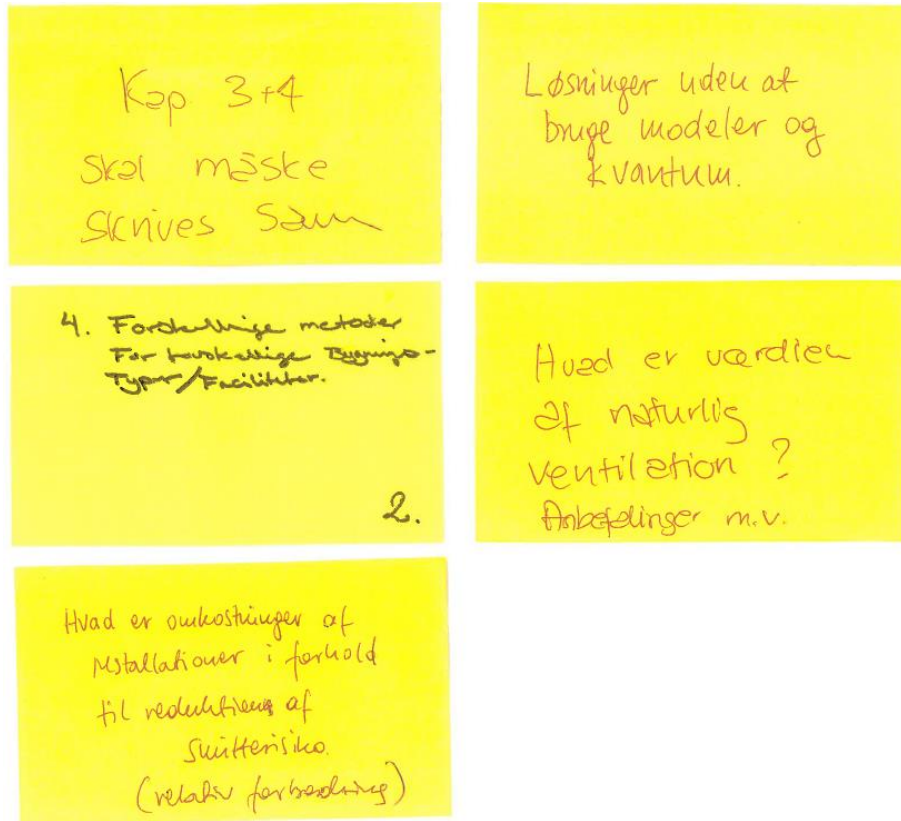
DEL - 3

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

Yderligere forslag til Del 3 under diskussion:

- 1) Smittespredning bliver ikke brugt i vores regler/standards i dag – dette bør ændres.
- 2) Naturlig ventilation – skelne mellem forskellige måder at fortage naturlig ventilation
- 3) SEL-faktoren bør sættes ud af kræft i en pandemi/epidemi situation – øget ventilation → øget energiforbrug

Del 4 – Luftbåren infektionsrisiko og strategier til ventilationskontrol: Delansvarlig Kiril G. Naydenov



Kap 3+4
Skal måske
skrives sam

Løsninger uden at
bruge modeller og
kvantum.

4. Fordelvisne metoder
for beregning af
Type 1/Faciliteter.
2.

Hvad er værdien
af naturlig
ventilation?
Anbefalinger m.v.

Hvad er omkostninger af
installationer i forhold
til reduktion af
smitterisiko.
(relativ forbedring)

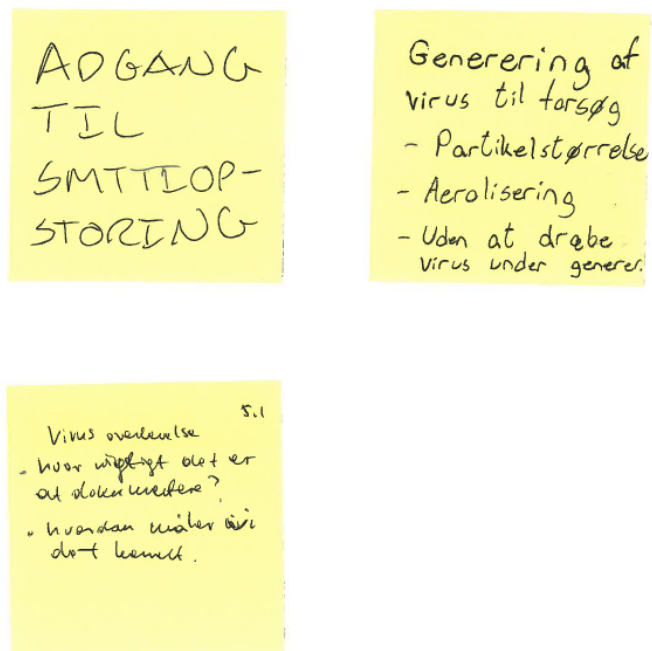
DEL - 4

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

Yderligere forslag til Del 4 under diskussion:

Ingen yderligere forslag.

Del 5.1 – Opsamlingsmetoder af luftbåren virus: Delansvarlig Torben Sigsgaard



DEL – 5.1

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

Yderligere forslag til Del 5.1 under diskussion:

Ingen yderligere forslag.

Del 5.2 – Ventilationstekniske målemetoder: Delansvarlig Arsen Krikor Melikov

5.2.
 • Tæling i ventilations
 rør
 = Stikrørløst
 = Stikke op
 • Simuleringer - andre?
 2.

er primært flere
 løsningsforslag →
 kan flyttes til kap 3

Hvilke ventilationsmidler
 anbefales i forbindelse
 med spredning af
 virus.
 5.2.

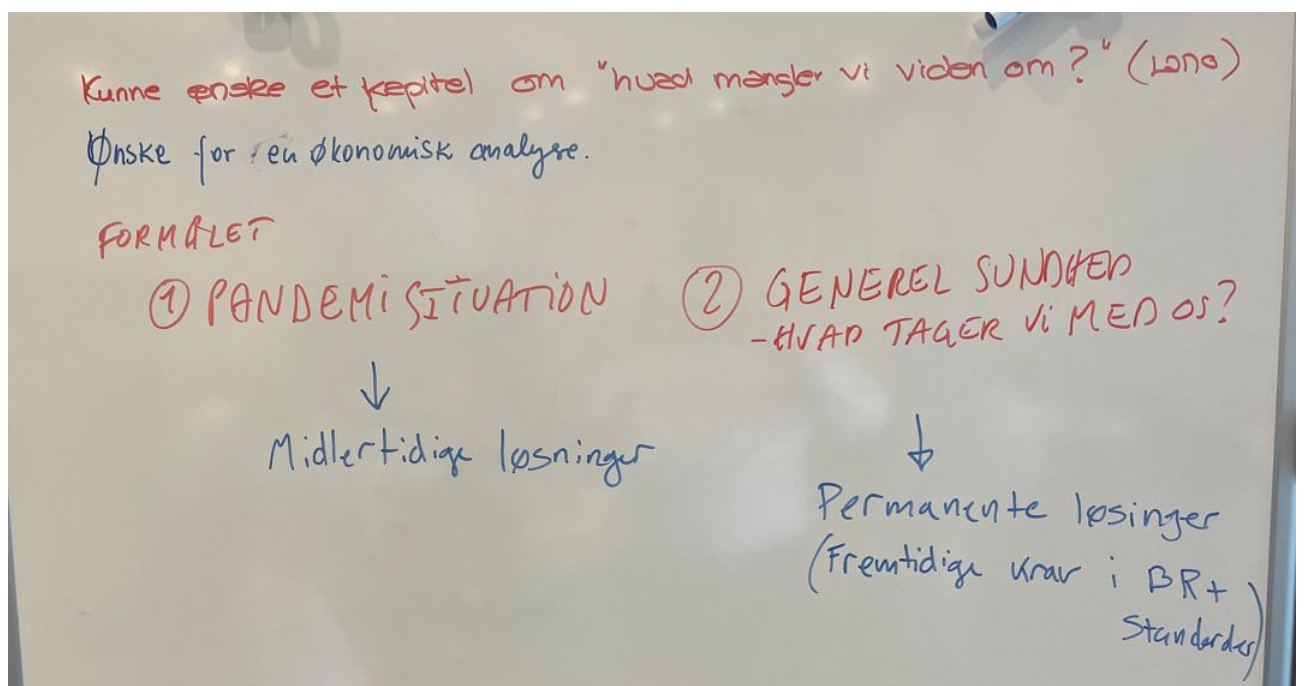
DEL – 5.2

DANVAK COVID-19 Konsensuskonference den 18. juni 2021 - Delkommentarer

Yderligere forslag til Del 5.2 under diskussion:

- 1) Kapitel har for meget personlig ventilation – bør være mere alsidig
- 2) TI – man bør samarbejde omkring de virus forsøg som foregår på TI

- Rapporten bør ikke have COVID-19, som hovedtema: Men smittespredning
- Bygnings R bør indeholde en omkøb/henvisning til smittespredning
- EN SAMLET KONKLUSION, SOM INDRAGER OG GERNE PRIORITERER DE FØRSKELLIGE DELE I RAPPORTEN. GERNE KONKRETE "CASES" SOM VISER, HVORDAN BYGNINGSINDRETNING KAN HAVE ADFÆRDSREGULERENDE BETYDNING I SUNDHEDSPERSPEKTIV, TAGER HØDDE FOR VENTILATION, AFSTANDE, FØRSKELLIGE SMITTERISICØ, OG GERNE ARBEJDSPLADSER/SKOLER/INSTITUTIONER VERSUS PRIVATE BOLIGER.
- Værktøjskassen til brug for kommende epidemier
- Certificerings ordning til Indeklima + Ventilation
- Sikre at rapporten er et blivende værktøj – inkl. økonomisk betragtning Gr 4
- DANVAK SKAL UDVIDES MED LÆGER OG ARKITEKTER



Kommentar til de overordnede punkter fra konsensuskonferencens deltagere – Claus Andreasson:

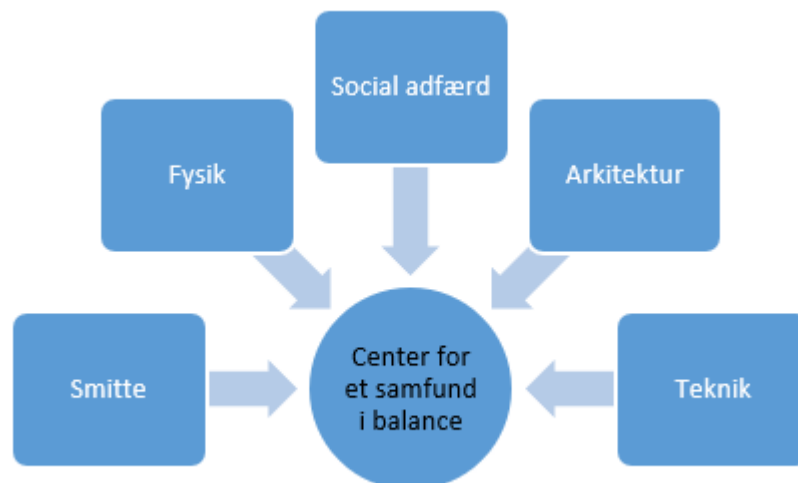
- 1) Meget enig i at rapportens titel bør ændres til en mere general titel – Projektet vil diskutere dette.
- 2) Danvak har en general holdning at der skal mere fokus på regler og standarder og en deregulering er IKKE optimal for vores byggeri i Danmark – hvilket gør at vi kun kan støtte et sådant forslag om at BR skal indeholde forhold omkring smittespredning.
- 3) Projektgruppen skal efter konsensuskonferencen påbegynde skrivningen af konklusionen. Vi vil tage disse anbefalinger med.
- 4) Det er uvist om vi direkte kan lave en værktøjskasse i dette projekt, men vil foreslå at et nyt projekt vil blive etableret og finansieret for at etablere en sådan værktøjskasse.
- 5) Vi kan ikke blive mere enige – der skal en certificeringsordning på plads omkring indeklima og ventilation – dette er ligeledes hvad Danvak arbejder henimod.
- 6) Der er mange områder hvor vi helt klart mangler viden. I vores konklusion vil vi forsøge at sammenfatte områder hvor der er manglende viden og yderligere forskning er påkrævet.
- 7) Tak for forslaget om at Danvak skal udvides til også at omfatte læger og arkitekter. Danvak er for ALLE der ønsker et bedre byggeri i Danmark og som interesserer sig for at vi kan komme med de bedste tekniske løsninger for indeklimaet, et sundt byggeri, et energivenligt og bæredygtigt byggeri. Så ALLE er velkomne til at melde sig ind i Danvak og være med i at gøre vores byggeri bedre.

Afslutning og kommentar til dagen

Claus Andreasson afsluttede dagen med en opsamling og hvad projektgruppen tænker omkring en rapport konklusion. Først og fremmest en stor tak til alle de inviterede og for deres fremmøde og meget aktive deltagelse. Projektgruppen sætter umådelig stor pris på alle de spændende diskussioner og de forslag som er kommet på tavlerne. Vi kan ikke indarbejde alle forslag, da projektet er i sin absolut sidste fase, men vi vil helt klart drage dagens diskussioner og forslag med ind i vores konklusion. Vi håber på at projektet kan fortsætte i en eller anden form, da vi langt fra er færdige og der er umådeligt meget arbejde at gøre endnu før vi kan se ind i et fremtidens byggeri som kan hjælpe med mindsning af smittespredning mellem mennesker, både under en epidemi og under en pandemi, men også i dagligdagen hvor din kollega måske er forkølet eller har influenza. Vi skal huske at enhver sygedag koster samfundet penge, tabt arbejde og er for personen de bliver ramt af sygdom ikke særlig behageligt. Vi skal for ALT i verden forsøge at forhindre sygdom og skabe et trygt, helbredsmæssigt sundt og samfundsmæssigt gunstigt indeklima i vores danske bygninger. Vi skal være trendsætter for resten af verden med vores løsninger.

Det vi i projektgruppen vil fokusere på i vores konklusion er:

- Den skal være forståelig for den almene befolkning
- Den skal kunne illustreres i billeder/tegninger
 - Illustration af smitte i en bygning
 - Skema der samler de forskellige parametre der har indflydelse på en smittetype
- Vi ønsker at give almen forståelse af smittespredning af virus
- Konklusion opbygges med
 - Smittespredning set ud fra et medicinsk synspunkt
 - Fysiske forhold der indvirker på smittespredning
 - Social adfærds indflydelse på smittespredning
 - Arkitektoniske forhold som kan minimere smittespredning
 - Tekniske løsninger som kan minimere smittespredning
 - Det ved vi / Det ved vi ikke!!!!!!
- Konklusion afsluttes med forslag om oprettelse af et "center" hvor alle "kræfter" samles for det videre arbejde, som illustreret nedenfor:



Projektgruppens holdning er at tages en af de 5 parametre ud af ligningen får vi ikke en løsning på hvordan vi får et dansk samfund i balance.

Tak for jeres tid, engagement og fremmøde – det sætter hele projektgruppe umådelig stor pris på. Efter sommerferien vil vi holde jer opdateret på rapporten. Rigtig god sommer til alle.