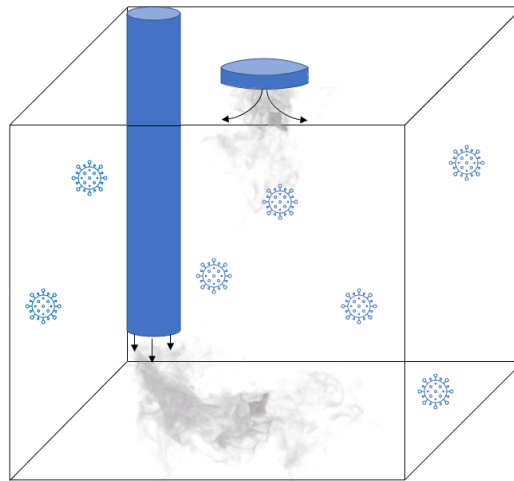


En experimentell simulering av luftdistributionens inverkan på spridningen av luftburna virus och bakterier

Laboratorieförsök med spårgas

Jasmina Balic & Stella Ericson

2023



Examensarbete, Grundnivå (kandidatexamen), 15 hp
Energisystem
Energisystemingenjör, Co-op

Handledare: Alan Kabanshi
Bitr. handledare: Arman Ameen
Examinator: Magnus Mattsson

Omslagsbild: Testrum med två olika tilluftsdon och virus i luften. Illustration: Jasmina Balic och Stella Ericson, 2023.

Sammanfattning

Detta examensarbete presenterar resultatet från en experimentell studie med syfte att undersöka sambandet mellan ventilation i kontor och smittspridning av luftburna virus och bakterier. Fokuset i studien har framför allt riktats mot coronaviruset och även avgränsats till att enbart studera omblandande-, och deplacerande ventilation under den experimentella delen. Studien genomfördes i ett testrum lokaliserat vid Högskolan i Gävle. Syftet för studien har varit att besvara hur exponeringen av luftburna smittämnen förändras i andningszonen när distributionen av tilluften ändras och om placering av smittkällan i sig har någon betydelse. Studien har även haft för avsikt att besvara vilken utav deplacerande eller omblandande ventilation som lämpar sig bäst vad gäller minimering av överföringssannolikheten från en smittad persons andning. För att besvara studiens frågeställningar genomfördes spårgasmätningar och parallellt med spårgasmätningarna granskades även lufthastigheter och temperaturer på flera positioner i rummet. För omblandande ventilation undersöktes två olika riktningar på tilluftstrålen, som valdes till vertikal och horisontell. För deplacerande ventilation undersöktes två olika inblåsningstemperaturer vilka var 21,3 °C och 16 °C.

Resultatet av studiens experimentella del visade att deplacerande ventilation hade en mindre överföringssannolikhet vid jämförelse med omblandande ventilation. Detta då överföringssannolikheten låg på 0,3–0,5 % för omblandande och 0,1–0,3 % för deplacerande, vilket visar att deplacerande ventilation generellt varit på en lägre nivå oavsett position av smittkällan. Att deplacerande ventilation har en mindre benägenhet att sprida infektioner vidare bland olika individer i samma rum bekräftas också av flera tidigare artiklar som studerat ämnet. Då omblandande ventilation undersöktes visade studiens experimentella del att resultatet vad gäller riktningen på tilluftstrålen hade en inverkan på överföringssannolikheten. Den vertikala tilluftstrålen påverkade forceringen mellan de termiska dockor som placerades framför varandra, vilket resulterade i en minskning på överföringssannolikheten mitt emot de två olika positionerna där de infekterade dockorna satt. För bägge ventilationssystemen - förutom vid vertikal riktning på tilluftstrålen vid omblandande ventilation - visade avståndet mellan smittkällan och frånluftsdonet ha en effekt på smittspridningen. Detta eftersom överföringssannolikheten varit lägre vid placeringen mitt emot smittkällan och diagonalt från smittkällan vilket är ett större avstånd än vad positionering bredvid smittkällan är. Vad gäller deplacerande ventilation har placeringen av smittkällan visat effekt då överföringssannolikheten varit lägre vid placering av smittkällan närmare frånluftsdonet samt att det minsta avståndet från smittkällan i det fallet haft lägst överföringssannolikhet.

Nyckelord: Andningszon, CO₂, Covid-19, Deplacerande ventilation, Omblandande ventilation, Spårgasmätningar, Termisk docka och Överföringssannolikhet.

Abstract

This thesis presents the results of an experimental study with the aim to investigate the connection between ventilation in offices and spread of airborne viruses and bacteria. The focus is on coronavirus and this thesis only investigates mixed ventilation and displacement ventilation in the experimental part. The study is done in a full scale mock up room located in Högskolan i Gävle. The aim of the study was to answer how the exposure of airborne diseases change in the breathing zone when the distribution of supply air changes and if placement of the source of infection has any affect. The study also aims to investigate if displacement or mixing ventilation is the best choice to minimize transfer probability from an infected persons breath. Tracer gas measurements was done to answer the main questions. The tracer gas measurements were studied parallel to measurements of air velocities and temperatures on several positions in the room. For mixing ventilation, the measurements were done for two different directions of supply air jet, vertical and horizontal. For displacement ventilation measurements are done for two different temperatures on the supply air which was 21,3 °C and 16 °C. The results of the experimental part of this study showed that displacement ventilation had a lower transfer probability between an infected person and a non-infected person when compared to mixing ventilation. The transfer probability was 0,3 – 0,5 % for mixing ventilation and 0,1 – 0,3 % for displacement ventilation, which shows that displacement ventilation is generally at a lower level than mixing ventilation regardless of the position of the source of infection. The result in this thesis is like results found in the literature review which also shows that displacement ventilation has a lower tendency to spread infections between persons in the same room. The result for mixing ventilation regarding the direction of the supply air jet showed an impact on the transfer probability. The vertical supply air jet was affecting the force of the breath jet between the thermal manikin placed in front of each other, which is done as part of reduction in the transfer probability at the two different positions for the same direction of the supply air jet. For both ventilation systems – except for the vertical direction of the supply air jet in the case of mixing ventilation - the distance between the source of infection and exhaust diffuser has been shown to have an impact on the transfer probability. This means the transfer probability was lower at the location opposite the source of infection and diagonally from the source of infection, which is a greater distance than the location next to the source of infection. In terms of displacement ventilation, the location of the source of infection has shown an effect as the transfer probability was lower when the source of infection was placed closer to the exhaust diffuser and that the minimum distance from the source of infection in that case was the lowest.

Keywords: Covid-19, CO₂, Breathing zone, Displacement ventilation, Mixing ventilation, Thermal doll, Tracer gas measurements and Transfer probability.

Förord

Detta examensarbete är det avslutande momentet på Energisystemsingenjörsutbildningen vid Högskolan i Gävle. Arbetsfördelningen har varit balanserad och rättvis där detta examensarbete utförts genom att ta vara på varandras styrkor och kompetenser. Kommunikationen mellan parterna har varit transparent och öppet vilket har bidragit till en bra arbetsmiljö med ömsesidig respekt och förtroende. Bägge parter idéer och åsikter har tagits i åtanke och tillsammans har lösningar hittats på problem som uppstått under arbetets gång.

Vi vill tacka våra handledare Alan Kabanshi och Arman Ameen för vägledning under arbetets gång. Ett stort tack till Mikael Sundberg som agerat bollplank, gett stöttning och visat engagemang under hela arbetet och för hjälp med kalibrering av instrument. Vi vill tacka Rickard Larsson för hjälp med installation och byte av ventilationssystemen. Vi vill även tacka Magnus Mattsson för att han låtit oss ta del av sin doktorsavhandling och visat intresse för vår studie.

Gävle, juni 2023

Jasmina Balic & Stella Ericson

Beteckningar

Symbol	Beskrivning	Enhet
l	Meter eller millimeter	m, mm
P_i	Tryck	Pa
T	Temperatur	°C
v	Lufthastighet	m/s
q	Luftflöde	l/s, L/min, ml/min
V	Volym	m ³ eller L
A	Area	m ²
n	Luftomsättning	h ⁻¹
P	Effekt	W
RH	Relativ luftfuktighet	%
h	Höjd	m
ø	Diameter	m
-	Aktivitetsnivå	met
-	Beklädnad	clo
C	Koldioxidhalt	PPM
ρ	Densitet	kg/m ³
c_p	Specifika värmekapacitet	J/kg°C
-	Överföringssannolikhet	%

Förkortningar

Tecken	Beskrivningar
CFD	Computational fluid dynamics
CO ₂	Koldioxid
N ₂ O	Lustgas

SF ₆	Svavelhexafluorid
LES	Large Eddy Simulation
HEPA	High Efficiency Particulate Air Filter
WHO	World Health Organisation
BBR	Boverkets Byggregler

Innehållsförteckning

Sammanfattning	iii
Abstract.....	v
Förord.....	vii
Beteckningar	ix
1 Introduktion	1
1.1 Bakgrund.....	1
1.1.1 Boverkets byggregler	2
1.1.2 AFS 2020:1	2
1.2 Litteraturstudie	2
1.2.1 Computational fluid dynamics (CFD)	5
1.2.2 Experimentella studier	6
1.2.3 Kombination av CFD och experiment.....	8
1.3 Syfte och problemformulering	11
1.4 Avgränsningar.....	11
1.5 Förfarande	11
2 Teori	12
2.1 Luftburna virus	12
2.1.1 Coronavirus	12
2.2 Ventilation.....	14
2.2.1 Deplacerande ventilation	14
2.2.2 Omblandande ventilation	15
2.3 Spårgas	15
2.3.1 Koldioxid som spårgas.....	16
2.4 Ekvationer	16
3 Metod.....	19
3.1 Objektbeskrivning.....	19
3.1.1 Ventilationssystem	21
3.2 Instrument.....	23
3.2.1 Avståndsmätning	23
3.2.2 Hastighet, temperatur och tryck.....	24
3.2.3 Spårgassystem.....	25
3.2.4 Termiska dockor	26
3.3 Procedur	27
3.3.1 Lufthastighetsmätning	27
3.3.2 Spårgasmätning	28
3.3.3 Temperaturmätning	30
3.3.4 Termisk komfort	30
3.4 Tillförlitlighet och dataanalys.....	30
4 Resultat.....	32
4.1 Omblandande ventilation	32
4.1.1 Luftastighetsmätning och temperaturer	32
4.1.2 Spårgasmätning	36

4.2	Deplacerande ventilation.....	36
4.2.1	Lufthastighetsmätning och temperaturer.....	37
4.2.2	Spårgasmätning	40
4.3	Termisk komfort	41
5	Diskussion.....	42
5.1	Resultatdiskussion, temperaturer och lufthastigheter.....	42
5.2	Resultatdiskussion, omblandande ventilation.....	43
5.3	Resultatdiskussion, deplacerande ventilation.....	44
5.4	Resultatdiskussion, termisk komfort.....	46
5.5	Metoddiskussion.....	47
6	Slutsatser	49
6.1	Resultat av studien	49
6.2	Utveckling.....	49
6.3	Perspektiv.....	50
	Referenser.....	51

1 Introduktion

Detta examensarbete har genomförts på Högskolan i Gävle som ett avslutande moment för examen inom Energisystemingenjörprogrammet. Idén om denna studie kommer från ett större forskningsprojekt som genomförs på högskolan där smittspridning och ventilation studeras. Området är av intresse för oss då det är ett aktuellt ämne efter Covid-19 pandemin som varit. Detta för att kunna öka medvetenheten angående valet av ventilationssystem vid eventuella framtida pandemier.

De figurer och tabeller som presenteras i rapporten är illustrerade av författarna om inget annat anges.

1.1 Bakgrund

Folkhälsomyndigheten har genomfört en undersökning för att utvärdera hur covid-19 pandemin har påverkat människors hälsa bland annat mentalt och socialt under år 2020. De metoder som använts för att ta fram information om detta är att olika data analyserats för att se trender och samband. Folkhälsomyndigheten menar att pandemin bidragit till att många människors levnadsvanor förändrats men att det finns speciella grupper som utsatts extra mycket av konsekvenserna som pandemin medfört. Några exempel på grupper som varit extra utsatta av pandemin är unga, asylsökande och äldre (Folkhälsomyndigheten 2021).

Arbetsmiljöverket menar på att det finns ett samband mellan ventilation och smittspridning och ett samband mellan ett rums area och smittspridningen. Risken för smittspridning i en lokal ökar då många människor vistas där samt då lokalens volym är liten. Smittspridningen sker via droppar i luften som sedan tar sig genom luftvägarna. Dessutom förklarar Arbetsmiljöverket vikten av att en lokal behöver ventileras även då individer inte vistas i lokalen. Ventileringen ska ske innan och efter närvaro och det kan vara positivt att ha ett konstant lågt luftflöde då lokalen är tom för att bland annat undvika att återluften för tillbaka smittämnen in i lokalen och för att bevara byggnaden (Arbetsmiljöverket 2022a).

Enligt WHO bör den minsta ventilationsflödet vid hemkarantän för att undvika smittspridning mellan familjemedlemmar vara 10 l/s och person i varje rum där personer normalt vistas. Vid hemkarantän och mekanisk ventilation rekommenderar WHO att fönster öppnas och eventuell luftrenare placeras i boaren om ventilationssystemet inte upplever rekommendationen. Om den mekaniska ventilationen uppfyller rekommendationerna menar WHO att det kan utvärderas hur väl luften omblandas, om luften inte omblandas väl rekommenderas det att en fläkt placeras i boaren (WHO 2021).

1.1.1 Boverkets byggregler

För bortföring av luft finns krav från boverket som beror på vilket sorts utrymme som behandlas. Vanligtvis bortförs luft i smutsiga utrymmen som kök och badrum (Warfvinge & Dahlblom 2010). Boverkets föreskrifter säger att det minsta tillåtna uteluftsflödet i ett rum är 0,35 l/s per kvadratmeter golv-area då personer befinner sig i byggnaden, då ingen befinner sig i byggnaden får inte uteluftsflödet understiga 0,10 l/s per kvadratmeter golv-area. Dessa föreskrifter avser minimering av hälsorisker och skador på byggnaden (Boverket 2018). Enligt de allmänna råden i boverkets författarsamling (1998), avsnitt 6:232 om luftväxling finns det ett antal minsta tilluftsflöden och minsta frånluftsflöden att ta hänsyn till vid utformning av ventilation. Vad gäller lokaler där personer vistas under en längre tid så som kontor finns ett krav på ytterligare tilluftsflöde på 7-10 l/s per person (BFS 1998:38 1998).

1.1.2 AFS 2020:1

I AFS 2020:1 vilken är utgiven av Arbetsmiljöverket finns föreskrifter för hur arbetsplatser skall utformas. I föreskrifterna nämns det att arbetslokaler ska ha en god luftkvalité inom vistelsezonen då brukare vistas i dem, detta ska uppnås av bland annat ett gott ventilationssystem som bidrar med ren inandningsluft fri från föroreningar. I föreskrifterna under paragraf 124 nämner Arbetsmiljöverket att den termiska komforten på arbetsplatser kan utvärderas på flertal olika sett bland annat genom att beräkna PMV och PPD. På en arbetslokal där stillasittande arbete utförs rekommenderas en inomhustemperatur på mellan 20–24°C under vintern och mellan 20–26°C under sommaren (Arbetsmiljöverket 2020).

1.2 Litteraturstudie

De sökord som använts för att söka upp vetenskapliga artiklar för denna litteraturstudie är: Airborne transmission, Coronavirus, cross infection, displacement ventilation, droplet aerosols, indoor air quality, infection probability, liquid aerosols, mixed ventilation, personal ventilation, SARS-CoV-2, thermal comfort, thermal manikin, tracer gas, ventilation, ventilation strategies, & virus spread control. För att söka upp vetenskapliga artiklar har sökportalen Discovery använts.

En litteraturstudie utförd av Yang et al. (2019) hade för avsikt att bland annat ta reda på olika ventilationsprincipers prestanda och hur man på bästa sätt kan tillämpa dessa. De ventilationsprinciper som undersöktes av Yang et al. (2019) och som är av intresse för denna litteraturstudie är omblandande-, deplacerande- och personlig ventilation. Syftet med omblandade ventilation är att erhålla ett jämnt fördelat inomhusklimat, både ur den termiska komfortens-, och luftkvalitetens synpunkt. Detta görs bland annat genom att det finns en temperaturskillnad mellan den nya luften och den gamla samt att den nya luften förs in med hög hastighet. På det sättet bibehålls en mindre temperaturskillnad mellan den övre och undre delen av rummet. Ur smittspridningssynpunkt lämpas andra ventilationssystem bättre eftersom ett fullt omblandat ventilationssystem fortfarande medför föroreningar i luften. Principen att ersätta förorenad luft mot ny fräsch luft lämpar sig bättre med ventilationsprinciper som metodiskt riktar själva luftflödet mot en bestämd yta eller plats. Ett exempel på en strategisk ventilationsprincip är deplacerande ventilation som innebär att man tillför ny luft med låg hastighet som är svalare än rumsluften. Temperaturskillnaden skapar en densitetsskillnad mellan rummets övre del där föroreningar förs bort och undre del som förses med ny och fräsch luft. En ytterligare ventilationsprincip som kan vara användbar för att minska på smittspridningen är personlig ventilation. Principen går ut på att rikta ny frisk luft specifikt till andningszonen vilket görs genom att placera tilluftsdon i närheten, som exempelvis på en stol eller ett skrivbord. Placeringen av tilluftsdonen möjliggör självkontroll av luftflödet vilket ökar den termiska komforten och luftkvaliteten. Luftkvaliteten för personlig ventilation är av den högre graden vid jämförelse med omblandande-, och deplacerande ventilation men innefattar högre investeringskostnader (Yang m.fl. 2019).

I en litteraturstudie genomförd av Fan et al. (2022) undersöks olika ventilationsprincipers termiska komfort, luftkvalité och påverkan på smittspridning av luftburna bakterier och virus. De intressanta ventilationsprinciper som bland annat nämns i artikeln är omblandande-, deplacerande-, personlig-, och stratifierad ventilation. Studien avser ventilerings av tre olika inomhusklimat vilka är jämnfördelad och stadiga-, ojämna-, och ostadiga förhållanden. För jämnfördelad och stadiga förhållanden användes omblandade ventilation. Detta eftersom koncentrationen av viruspartiklar späds ut och medför jämna förhållanden i rummet. Då både till-, och frånluftsdonet var placerade i taket ökade risken för kortslutning. Av denna anledning valdes en ny placering av tilluftsdonet vilket var att placera tilluftsdonet i golvhöjd. Trots annan placering av tilluftsdonet tillkom negativa aspekter ur smittspridningens synpunkt där ny och ren luft inte spreds utanför vistelsezonen. Utöver att ny och ren luft har en benägenhet att inte spridas utanför vistelsezonen så har omblandande ventilation stor risk för spridning av luftburna virus och bakterier då förorenad luft blandas ut med ny luft vilket med andra ord betyder att förorenad luft stannar kvar i zonen. Författarna diskuterar också alternativet att kombinera omblandande ventilation med HEPA-filter vid användning av återluft som ett positivt alternativ vilket även undersöks av Vlachokostas et al. (2022) som nämns vid senare stycke (Fan m.fl. 2022).

För ojämna förhållanden studerade Fan et al. (2022) bland annat deplacerande-, personlig-, - och stratifierad ventilation. För den deplacerande ventilationen placerades tilluftsdonet i golvhöjd där underkyld luft sprids ut med låg hastighet. Med hjälp av termiska egenskaper förs förorenad luft upp till frånluftsdonet som placeras i takhöjd vilket bidrar med en god luftkvalité i andningszonen. Deplacerande ventilation är fördelaktigt under vissa förhållanden så som kylning och höga utrymmen, dock kan kylning av utrymmen påverka den termiska komforten negativt då det kan upplevas som drag. För personlig ventilation placeras tilluftsdonet vid en specifik zon, exempelvis på skrivbordet. Den direkta tillförseln av ren luft till andningszonen motverkar inandning av förorenad luft från bakgrunden. Nackdelen med personlig ventilation är att tillförsel av ren luft enbart sker på bestämda zoner, vilket medför att den bara är fördelaktig i utrymmen så som kontor där människor sitter på en bestämd plats. Risker ökar ytterligare om en infekterad person använder den personliga ventilationen eftersom den nya luften då kan fånga upp smittan och föra den vidare till andra personer i rummet. Fan et al. (2022) nämner därför att en kombination av personlig-, och deplacerande ventilation är nödvändigt för att hålla en fortsatt god ventilation i resterande av rummet. För den stratifierade ventilationen placerades tilluftsdonet på väggen. För att garantera god luftkvalité och låg medelålder på luften i andningszonen valdes höjden på tilluftsdonet till 1,2 m. Stratifierad ventilation minskade risken för smittspridning av luftburna bakterier och virus men ökade de negativa aspekterna kring den termiska komforten, detta då tillförseln av luften orsakade dragkänsla på övre delarna av kroppen. Artikelns tredje fall, ventilering av inomhusklimat med ostadiga förhållanden är inte av intresse för denna litteraturstudie (Fan m.fl. 2022).

1.2.1 Computational fluid dynamics (CFD)

I en bok skriven av Cengel och Cimbala (2019) beskrivs Computational fluid dynamics (CFD) som ett vanligt datorverktyg som ingenjörer använder för att studera fluiders egenskaper så som luftflöden, hastighet, tryck och skjuvspänning. CFD kan också användas för att studera värmeöverföring. Resultatet är grafiskt och färgfullt och kan användas för att förutse flödets egenskaper som ofta är komplext och kostsamt att få fram experimentellt (Cengel & Cimbala 2019). Modelleringsverktyget ger en ökad förståelse kring den kvantitativa data och de lagar som styr hur fluider rör sig så som massa, momentum och energi. Med hjälp av CFD kan olika scenarier förutses digitalt med exakthet vilket kan bidra med ekonomiska besparingar (Hu 2012).

1.2.2 Experimentella studier

Vlachokostas et al. (2022) gjorde en experimentell studie för att undersöka smittspridningen mellan anslutande rum då ett centralt ventilationssystem används. Fokuset i artikeln var att jämföra två olika sorters filter och luftutbyteseffektiviteter, detta gjordes för tre anslutande rum med gemensam till- och frånlufts kanal. Metoden som används under den experimentella studien var att sprida ut virusliknande droppar i det sista rummet som är anslutet till ventilationssystemet för att undersöka två olika filters effektivitet när luften återcirkulerar vilket är en ventilationsprincip som i sig inte är vanligt i Sverige. Detta gjordes genom att mäta koncentrationen av viruspartiklar både före och efter luften passerat filtret. Koncentrationen av viruspartiklarna mättes även i varje rum för att utvärdera i hur stor mån som virus och bakterier sprids genom centraliserade ventilationssystem. Det som studien visade var att högeffektiva partikelfilter har en stor inverkan på minskningen av smittspridningen och att det andra filtret med lägre filtereffektivitet inte är en tillräcklig åtgärd (Vlachokostas m.fl. 2022).

I den genomförda litteraturstudien av Fan et al. (2022) nämns omblandande ventilation som mindre bra då risken för smittspridning av virus och bakterier är stor. Dock nämns kombinationen av HEPA filter som ett bra alternativ vilket också understryks av Vlachokostas et al. (2022).

Virus så som corona kan utöver ventilationen spridas genom avloppsledning, något som Wang et al. (2022) tar upp i en artikel och testar genom spårgasexperiment i ett höghus i Hong Kong. Avloppsledningarna - toalett och vask - är i sig inte anslutna till ventilationssystemet, men påverkas av ändringarna som sker i ventilationssystemet. Spridningen av viruset sker då ett undertryck uppstår i rummet av ventilationssystemets frånluftsfläkt. När undertrycket sker uppkommer skorstenseffekten genom den vertikala avloppsledningen som går genom huset. Avloppsledningen är ansluten under jorden och är en vanligt förekommande design i Hong Kong. Då detta undertryck inträffar i badrummet uppstår ett läckage från avloppet vilket medför att luft från lägenheter längre ner i byggnaden förflyttas till lägenheter högre upp. Författarna diskuterar att detta skulle kunna motverkas bland annat genom att stänga badrumsfönstren då frånluftsfläkten är påslagen samt att överluftsdon bör installeras ovanför badrumsdörren för att möjliggöra transport av luft från närliggande rum in till badrum vid undertryck för att minimera att skorstenseffekten uppkommer (Wang m.fl. 2022). Spridning av coronavirus genom vertikalt sammankopplad avloppsledning genom byggnaden tas även upp i en litteraturstudie skriven av Elsaid, Mohamed, Abdelaziz och Ahmed (2021) vilka även förklarar likt Wang et al. (2022) att spridningen sker då undertryck skapas i badrum av frånluftsfläktar (Elsaid m.fl. 2021).

En doktorsavhandling skriven av Mattsson (1999) undersöker experimentellt effektiviteten av deplacerande ventilationssystem i olika scenarier med och utan fysisk aktivitet. Scenarierna som undersöks är hur effektiviteten av ventilationssystemet påverkas när en person rör sig i rummet och studeras i två olika testrum vilka är ett mindre kontor och ett större klassrum. Experimenten utförs med Lustgas (N_2O) för kontoret och Svavelhexafluorid (SF_6) för klassrummet. I studien visade det sig att de fysiska aktiviteterna som studerades påverkade luften runt de sittande personernas andningszoner, detta eftersom rörelserna från den förbigående personen påverkar luftens distribution. När den stående personen rörde sig förbi den sittande personen så skapades virvlar som tog med äldre luft från övre delar av rummet mot de nedre delarna av rummet vilket inhaleras av de sittande personerna. Enligt studien visade det sig att luftens distribution stabiliserades ganska snabbt med deplacerande ventilation efter att de fysiska aktiviteterna upphörts. Mattsson (1999) förklarar hur föroreningskällan påverkar rummets luftkvalité beroende på placering i rummet. Vid placering av föroreningskällan nära frånluftsdonet blev luftens kvalité bättre än vid placering längre ifrån frånluftsdonet (Mattsson, 1999).

1.2.3 Kombination av CFD och experiment

Simulering med CFD användes av Su et al. (2022) parallellt med utförande av en experimentell studie om sannolikheten för överföring av aerosoler genom att distribuera inomhusluften på sju olika sätt, med sju olika ventilationsprinciper. De olika ventilationsprinciperna som användes under studien som är av intresse för denna litteraturstudie är omblandande-, deplacerande-, och personlig ventilation. De sju olika scenarierna simulerades med hjälp av CFD vilka genomfördes i simulerade kontor med en personlast på tio där en av dessa var smittbärare. Personlasten vistades i respektive kontor under fyra timmar där sannolikheten för överföring av smittan studerades från två olika positioner i rummet. Positionerna som studerades var när smittbäraren befann sig nära respektive långt ifrån tilluftsdonet. För att utföra detta användes och tillfördes CO₂ som spårgas för att mäta huruvida den luftburna smittan rör sig i rummet liksom sannolikheten för smittan att spridas genom olika platser i rummet. Resultatet visade att luftens distribution har en stor inverkan på smittspridningen av luftburna bakterier och virus. Yang et al. (2019) och Su et al. (2022) är överens om att deplacerande-, och personlig ventilation är att föredra över omblandande ventilation. Vidare nämner Su et al (2022) att personlig ventilation är det bästa alternativet ur smittspridningens synpunkt eftersom de är installerade i höjd med ansiktet vilket medför att ventilering av andningszonen sker konstant, detta nämns även av Yang et al. (2019). Vid jämförelse av omblandande ventilation och deplacerande ventilation visade det sig att deplacerande ventilation gav bäst resultat och även detta granskas och hålls med av Yang et al. (2019). Su et al. (2022) förklarar att det bästa resultatet gavs av att den infekterade personen placerades långt ifrån tilluften vad gäller deplacerande ventilation, detta eftersom placering nära donet ökar smittrisker genom att den nya luften för smittan vidare från den infekterade personen till resterande personer.

Vidare utvecklar Su et al. (2022) att oavsett individens position för deplacerande ventilation är det bättre än omblandande ventilation. För omblandade ventilation visade position inte någon större inverkan på smittspridning då koncentrationen var konstant hög i rummet med en allt högre koncentration runt den infekterade personen. Detta resulterade i att infektionsrisken var som högst med omblandande ventilation vid jämförelse med deplacerande ventilation (Su m.fl. 2022).

Likt Su et al (2022) undersöktes luftdistributionens inverkan med hjälp av CFD i en studie utförd av Osman, Madi, Ntantis och Kabalan (2022). Ventilationsprincipen som undersöktes var deplacerande ventilation vilket utfördes i ett antal olika scenarier där hänsyn togs till att bibehålla den termiska komforten. Bland annat undersöktes sannolikheten för överföring av smitta av en sittande person och en stående person genom att noggrant undersöka hur partiklarna rörde sig då personen hostade. Precis som Su et al (2022) och Yang et al (2019) förklarades skillnaden mellan omblandade ventilation och deplacerande ventilation och med anledning av båda ventilationsprincipernas egenskaper visade resultatet att deplacerande ventilation gav god luftkvalité och termisk komfort i vistelsezonen och bortförde bakterier och virus med bra takt (Osman m.fl. 2022).

I en artikel skriven av Anuraghava, Abhiram, Reddy och Rajan (2021) nämns ytterligare en kombination nämligen negativt trycksatta rum i kombination med omblandande ventilation och HEPA-filter. Metoden som används under denna studie är CFD som innebär att olika scenarier av luftflödet och spridning av partiklar simuleras med god kontroll. Frånluftdonet placeras nära anslutet med den infekterade personen och på grund av undertryck medförs ett konstant utsug av förorenad luft. Den termiska komforten kontrolleras med hjälp av sensorer för att inte orsaka obehag. Resultatet visade att kombinationen av de tre ovannämnda åtgärderna är fördelaktigt i sjukhusmiljöer där infekterade personer behöver isoleras i ett slutet rum för att minimera smittspridning (Anuraghava m.fl. 2021).

I en studie av Zhang et al. (2019) undersöks olika faktorer som påverkar smittspridning av luftburna bakterier och virus. Faktorerna som studeras är ventilationshastighet, ventilationsmönster, temperaturen på tilluften och den relativa luftfuktigheten. Den metod som har använts är CFD vilken har validerats med hjälp av Large Eddy Simulation (LES), som är en form av CFD som används för att kunna analysera luftflöden. I artikeln framgår det att temperaturen på tilluften och den relativa luftfuktigheten har en lägre påverkan på smittspridning av luftburna smittämnen vid jämförelse med ventilationshastigheten och luftens distribution, när deplacerande ventilation undersöks. Vidare förklarar Zhang et al. (2019) att deplacerande ventilation har en större effekt på minskning av smittspridningen än omblandade ventilation, vilket tidigare nämnts av Fan et al. (2022) och (Zhang m.fl. 2019).

I en artikel skriven av Li et al. (2021) behandlas ett verkligt fall från en restaurang i Kina där 3 familjer smittade av corona ätit lunch i januari 2020. Dessa tre familjer hade ingen koppling till varandra eller kontakt under lunchen vilket bekräftats av videoinspelningar från dagen. I studien undersöks händelseförloppet under restaurangbesöket med hjälp av videoinspelningar, spårgasmätning och med simuleringar i CFD. Spårgasmätningarna genomfördes en dag när solen hade liknande läge och solinstrålning som den dag då familjerna befann sig på restaurangen. Mätningarna utfördes med 9 verkliga människor och ett antal termiska dockor vilka genomfördes i två delar. I första delen släpptes etangas ut i andningszonen för att ge en bild av spridningen då den infekterade individen pratade och rörde på huvudet. Mängden spårgasdroppar mättes vid alla stolar i lokalen. I experimentets andra del genomfördes mätningar på ventilationshastighet och ändringen i koncentrationen på spårgas. För att mätningarna skulle efterlikna det verkliga fallet så mycket som möjligt öppnades dörrar varannan minut. Resultatet jämfördes med ett likadant simulerat fall i CFD. Resultatet visar att avstånd, tid och ventilation hade en stor inverkan på smittspridningen, detta då individer placerade nära och långt från de infekterade familjerna insjuknade efter besöket. Detta förklaras genom att smittspridningen både skett genom droppsmitta till intilliggande bord och genom dåligt luftflöde i ventilationssystemet vilket inneburit att aerosoler med virus cirkulerat i luften under en längre period (Li m.fl. 2021).

Sammanfattningsvis kan det konstateras att vid jämförelse mellan olika ventilationsystem har många av de tidigare studier som studerats under detta avsnitt kommit fram till att deplacerande ventilation är bättre än omblandande ventilation om smittspridningen ska minskas. Detta då omblandande ventilation cirkulerar runt luften i rummet. Detta bekräftas bland annat av Yang et al. (2019), Fan et al. (2022), Su et al. (2022), Osman et al. (2022) och Zhang et al. (2019). För att omblandande ventilation ska ha en bättre inverkan på minskad smittspridning studerar både Fan et al. (2022) och Vlachokostas et al. (2022) kombinationen av omblandande ventilation och HEPA-filter vilket visade sig vara fördelaktigt i båda studierna. Detta innebär att resultatet från litteraturstudien ovan är att deplacerande ventilation är bättre än omblandande ventilation för minimering av smittspridning och att omblandande ventilation bör kombineras med HEPA filter för att ge en större inverkan på minskad smittspridning. Flera av författarna undersökte personlig ventilation vilket visade sig vara ett bra alternativ till deplacerande ventilation.

1.3 Syfte och problemformulering

Syftet med studien är att med hjälp av spårgas analysera överföringssannolikheten av luften från en infekterad person till en icke infekterad. Studien syftar även till att jämföra omblandande ventilation och deplacerande ventilation för att se vilken av dessa som har minst inverkan på smittspridning. Detta genom analys av temperaturer, lufthastigheter och luftflöden i kombination med spårgasmätningar.

De frågeställningar som ska besvaras lyder:

- Hur förändras exponeringen av luftburna smittämnen i andningszonen när luftdistributionen ändras?
- Har placering av smittkällan någon påverkan på överföringssannolikheten och därigenom smittspridningen i ett rum?
- Är deplacerande eller omblandande ventilation bäst för att minimera överföringssannolikheten från en smittad persons utandning?

1.4 Avgränsningar

Arbetet avgränsas till att enbart undersöka omblandande och deplacerande ventilation i fyra olika fall med ett konstant luftflöde i en kontorsmiljö. De fyra olika fall som studeras är horisontell respektive vertikal riktning på tilluftsstrålen från tak för omblandande ventilation, med en konstant tilluftstemperatur och två olika tilluftstemperaturer för deplacerande ventilation.

1.5 Förfarande

Studien har genomförts med hjälp av spårgasmätningar i en laboratoriemiljö där koldioxid är den gas som studeras. Studien genomförs för omblandande samt deplacerande ventilation samt då smittkällan sitter långt ifrån respektive nära frånluftsdonet.

2 Teori

Teori för examensarbetet presenteras under detta kapitel, de två ventilationsprinciperna omblandande-, och deplacerande ventilation presenteras kort samt information om luftburna virus och coronaviruset. I avsnitt 2.3 förklaras tekniken för spår-gasmätningar, detta då det är den huvudsakliga metoden för denna studie. Kapitlet avslutas med ett avsnitt som presenterar de ekvationer som använts under arbetets gång.

2.1 Luftburna virus

I en experimentell studie genomförd av Harrison et al. (2023) undersöks aerosolers storlek, hastighet och spridning beroende på om de utsöndras från mun eller näsa samt skillnaden mellan utsöndring via andning, tal och hosta. Detta undersöktes med hjälp av försökspersoner i olika åldrar samt med olika yrkesroller som fick genomföra ett antal aktiviteter. Bland försökspersonerna fanns bland annat idrottare och sångare. Höghastighetskameror filmade aktiviteterna för att undersöka aerosolernas hastighet och koncentrationen av dessa. En annan experimentuppställning som användes var att deltagarna fick genomföra andningsövningar med ett vattenkänsligt papper framför ansiktet. Resultatet som Harrison et al. (2023) kom fram till var att aerosoldropparna är större då de utsöndras genom hostning än tal och utandning. Författarna kom fram till att aerosoler kan delas upp i två kategorier där den första benämns direkta droppar som är de droppar som sprids från mun och näsa genom nysning eller hosta. Den andra kategorin är indirekta droppar vilka sprids genom att mindre droppar från utandningsluften förångas. De direkta dropparna hade en högre koncentration av smittämnen än de indirekta dropparna (Harrison m.fl. 2023).

Enligt 1177 innehåller en människas utandning 0,5 liter luft, då en person befinner sig i vila tar denna ungefär 12 andetag i minuten. Detta innebär att en sittande person andas 6 L/min (1177 2019).

2.1.1 Coronavirus

Världshälsoorganisationen WHO förklarar att coronaviruset är en smittsam sjukdom som sprids via droppsmitta från en infekterad persons mun eller näsa och även via kontaktsmitta (WHO 2023a). I februari 2023 har totalt 757 264 511 individer bekräftats smittade av corona sedan pandemins start 2019 varpå 6 850 694 individer har avlidit till följd av covid-19 (WHO 2023b). WHO förklarar vidare hur de som insjuknar av viruset kan behöva uppsöka sjukvård samt att en stor andel av de som uppsöker sjukvård tillhör den så kallade riskgruppen. De som ingår i riskgruppen är bland annat äldre och individer med underliggande sjukdomar och svagare immunförsvar (WHO 2023a). De symptom som har påvisats är framförallt påverkan i luftvägarna som hosta, feber och snuva (Folkhälsomyndigheten 2022).

Enligt Morawska et al. (2020) är det mest känt att Covid-19 sprids via stora andningsdroppar genom nära kontakt med infekterade personer men också genom kontaminerade ytor som träffats av andningsdropparna. Ett mindre känt men noterbart sätt som smittspridning kan ske på är genom inhalering av små luftburna droppar som kan färdas långt med luften, dessa luftburna droppar benämns aerosoler. Då den största spridningen av aerosoler sker inomhus är det av stor vikt att ha ett bra ventilationssystem som förser offentliga byggnader och bostäder med ren luft (Morawska m.fl. 2020). Vidare förklarar Izadyar och Miller (2022) att ett bra utformat ventilationssystem är viktigt ur smittspridningens synpunkt, detta på grund av att bra ventilationssystem bidrar med bra luftkvalité i byggnaden genom att minska på mängden partiklar och aerosoler. Sannolikheten för att bli smittad utgörs av koncentrationen av smittan mot hur snabbt den ventileras bort med hjälp av ren luft (Izadyar & Miller 2022).

Lipinski, Ahmad, Serey och Jouhara (2020) förklarar i en artikel hur coronaviruset är format som en sfär eller ellips, med en diameter på upp till 140nm. Författarna menar att denna lilla diameter gör att viruset kan hålla sig luftburet under en längre tid vilket bidrar till spridning genom ventilationssystemet. Viruset är även smittsamt i små doser och därför måste ventilationssystemet anpassas, detta kan till exempel göras genom att öka mängden ny luft som tas in i byggnaden eller genom att se över det befintliga ventilationssystemet. Att tillföra luft mekaniskt med hjälp av till exempel omblandande ventilation kan ha en ökad påverkan på smittspridningen då droppar av viruset kan följa med i processen, detta då luften kommer in med ett högt luftflöde. Författarna diskuterar vikten i att ha ett tillräckligt bra ventilationssystem för att undvika smittspridning, dessutom bidrar ett bra ventilationssystem till friska byggnader vilket är positivt ur många aspekter (Lipinski m.fl. 2020).

En litteraturstudie skriven av Elsaïd, Mohamed, Abdelaziz och Ahmed (2021) beskriver likt Lipinski et al. (2020) att coronaviruset är i storleksordningen 60-140nm i diametern med en sfärisk form med spik-liknande protein runt hela sfären. I artikeln jämförs storleken på coronaviruset med andra kända typer av partiklar, virus och bakterier så som HIV, E.coli, PM 2.5, röda blodplättar samt PM 10. Jämförelsen ökar förståelsen för hur litet coronaviruset är i storleken och varför det är i allra högsta grad är smittsamt. Vidare förklarar Elsaïd et. al (2021) att spridningen av virus, däribland coronavirus kan delas upp i två olika kategorier vilka är droppar på 5–10 μm som kallas för andningsdroppar samt droppar som är $<5\mu\text{m}$ som kallas för aerosoler. Partiklar, specifikt aerosoler i den storleken har lätt för att stanna i luften och på ytor under en längre tid vilket medför att exponeringstiden för coronaviruset ökar avsevärt. Generellt beskrivs påverkan på virusspridning av fler faktorer som koncentrationen av viruset, luftens temperatur och luftfuktighet, artikeln menar att varmare länder har en ökad spridning av virus (Elsaïd m.fl. 2021).

I en artikel publicerad i The Washington post (2020) beskriver författarna Allen, Iwasaki och Marr att relativ fuktighet har en inverkan på smittspridning av covid-19. Författarna menar att en relativ fuktighet på mellan 40–60 % är att föredra under vinterhalvåret för att minimera smittspridning. Den relativa fuktigheten i byggnaden påverkar människokroppens förmåga att handskas med virus och bakterier, likaså dör coronaviruset ut snabbare om luftfuktigheten hålls konstant nära 60%. Om luftfuktigheten är låg kan aerosoler med virus färdas en längre sträcka vilket i sin tur kan leda till en ökad smittspridning (Allen m.fl. 2020). Att coronaviruset dör ut snabbare då luftfuktigheten hålls nära 60 % bekräftas i en vetenskaplig artikel av Morris et al. (2020) där studier genomförts i ett laboratorium för att undersöka temperaturen och luftfuktighetens inverkan på smittspridning. Studierna genomfördes genom att virus placerades på ytor av olika material och sedan undersöktes överlevnadstiden under olika förutsättningar på temperatur och luftfuktighet. Studien visade att en högre temperatur och en högre luftfuktighet kan vara positivt för att minska smittspridningen vilket motsäger Elsaid et al. (2021) (Morris m.fl. 2020).

2.2 Ventilation

Syftet med ventilation är att tillhandahålla god luftkvalité genom att bortföra gammal smutsig luft och tillföra ny ren luft. Ett ventilationssystem tillför en bestämd mängd frisk luft till ett utrymme och bortför en bestämd mängd gammal luft. Ett annat syfte som ventilation har är att kyla ett utrymme vid behov (Arbetsmiljöverket 2022b).

I en artikel skriven av Manas, Raju, Kumar och Rajan (2022) nämns vikten av att minimera spridning av virus och bakterier inomhus. De menar att effekten av att ha ett bra ventilationssystem som är avsatt att minska spridning av virus och bakterier också medför bättre luftkvalité. Artikeln nämner inget specifikt ventilationssystem som det mest optimala, i stället lyfts vikten av att anpassa ventilationssystemen beroende på rummets utformning och geometri. Undertrycksrum är något som är återkommande i artikeln, detta eftersom droppar och aerosoler inte skulle spridas utanför rummet vid undertryck (Manas m.fl. 2022).

2.2.1 Deplacerande ventilation

Donet för deplacerande ventilation placeras vid golvnivå så att ny ren och undertempererad luft flyter ut över golvet för att sedan stiga då den träffas av en människokropp på grund av termiska krafter. På grund av att deplacerande ventilation bygger på termiska krafter så lämpar sig inte denna princip för uppvärmning. Systemet används ofta i lokaler där mängden föroreningar är hög, vid riktiga höga nivåer av föroreningar behöver dessutom takhöjden vara hög för att inte föroreningarna ska hamna direkt i andningszonen på lokalens brukare. (Warfvinge & Dahlblom 2010).

2.2.2 Omblandande ventilation

Tekniken för omblandande ventilation är att ny luft tillförs utrymmet i takhöjd. Den nya luften kommer in i rummet med en hög hastighet för att rumsluften ska blandas runt. Då rummet utsätts för stora nivåer av föroreningar är omblandande ventilation inte ett bra alternativ eftersom föroreningarna då cirkuleras runt i rummet med luften. Till skillnad från deplacerande ventilation så fungerar omblandande ventilation både för att värma och kyla en lokal (Warfvinge & Dahlblom 2010).

2.3 Spårgas

Enligt Bivolarova et al. (2017) är metoden med att använda spårgas vid simulering tillämpligt på partiklar mindre än $5\mu\text{m}$ då dessa följer luftströmmen på grund av sin lilla storlek. Studien syftar till att undersöka om spårgasens spridning har ett liknande beteende som smittspridningen av luftburna virus och bakterier. Under studien användes en termisk docka för att motsvara en verklig människa och dess värmeavgivning, dockan placerades i tre olika sorters testrum. Mätningar gjordes på tre olika ställen i alla tre testrum vilka var luften i mitten av rummet, frånluften och framför den termiska dockans mun. De kom fram till var att de mindre partiklarna med storleken $0,7\mu\text{m}$ och mindre efterliknade spårgasens rörelser. Då mätningar genomfördes vid den termiska dockans mun visade det sig att partiklar med storleken $0,07\mu\text{m}$, $0,7\mu\text{m}$ och $3,5\mu\text{m}$ liknar spårgas mycket vilket gör spårgas till en tillämplig metod för att efterlikna smittspridning av luftburna bakterier i form av aeroloser (Bivolarova m.fl. 2017).

För att genomföra mätningar av bland annat ett ventilationssystemets luftutbyteshastighet och ventilationseffektivitet kan spårgasmätningar genomföras enligt Cui, Cohen, Stabat och Marchio (2015). Mätningarna går ut på att en vald gas sprids ut i utrymmet som avses studeras för att sedan mäta koncentrationen av denna gas på intressanta platser i rummet. Beroende på vad som avses studeras kan olika metoder användas. Gasen kan bland annat spridas ut för att sedan mäta hur snabbt den lämnar utrymmet eller så kan spårgasen spridas ut med en konstant hastighet utan avslut under studieperioden. Författarna förklarar att en bra spårgas inte utgör någon sorts fara för människor och djur eller för utrymmet som studeras eller miljön. Utöver detta ska en bra spårgas blanda sig väl med luft och ha en liknande densitet (Cui m.fl. 2015).

I en experimentell studie genomförd av Arvelo et al. (2022) jämförs spårgaserna koldioxid (CO₂) och svavelhexafluorid (SF₆) med aerosoler innehållande syntetiskt DNA för att undersöka hur likt dessa beter sig och vilket samband dessa har. Experimentet utfördes i ett testrum där olika luftutbyteshastigheter och inverkan av olika filter jämfördes där fokuset låg i att mäta nedbrytningshastigheten för de olika ämnena. Spridningen av aerosolerna mättes med en partikelstorleksmätare vilket gav information om storlek och koncentration. Själva spridningen av spårgasen mättes med en gasdetektor. Resultatet visade att de gasformiga spårgasämnen CO₂ och SF₆ hade en benägenhet att brytas ned snabbare än vad aerosolerna - som innehöll syntetiskt DNA - gjorde. Resultatet visade även att luftutbyteshastigheterna och filtren hade stor inverkan på både spårgasämnen och aerosolerna och hur de spred sig. Arvelo et al. (2022) kom till slut fram till att filtren hade störst motverkan på spårgasämnenas spridning. Författarna betonar också hur relevant det är att välja rätt spårgasämne vid experimentella studier för att uppnå signifikanta resultat (Arvelo m.fl. 2022).

2.3.1 Koldioxid som spårgas

Cui et al. (2015) förklarar att koldioxid fungerar bra att använda som spårgas. Fördelarna med att använda koldioxid som spårgas är att det är enkelt att mäta. Utöver detta är många andra ämnen som används som spårgas både giftiga i större mängd och kan detonera. Detta är inte en risk med koldioxid (Cui m.fl. 2015). Nackdelarna med koldioxid som spårgas är uteluften kan variera något, vilket kan ge missvisande resultat. Det är också viktigt att ha i åtanke att människor avger koldioxid vilket medför att angivning från människor som befinner sig nära experimentområdet kan ge felaktigt resultat.

2.4 Ekvationer

Inblåsningstemperatur på tilluften beräknas enligt Ekvation 1.2 från omskrivning av ekvation 1.1.

$$Q = q \cdot \rho \cdot c_p \cdot (T_r - T_t) \text{ [W]} \quad (1.1)$$

$$T_t = T_r - \left(\frac{Q}{q \cdot \rho \cdot c_p} \right) \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (1.2)$$

$$Q = \text{Värmeavgivning} \quad \text{[W]}$$

$$q = \text{Luftflöde} \quad \text{[m}^3\text{/s]}$$

$$\rho = \text{Luftens densitet} \quad \text{[kg/m}^3\text{]}$$

C_p = Luftens specifika värmekapacitet [J/kg°C]

T_r = Rumstemperatur [°C]

T_t = Tilluftstemperatur [°C]

Luftomsättningen beräknas enligt Ekvation 2.

$$n = \frac{q}{V} \text{ [h}^{-1}\text{]} \quad (2)$$

n = Luftomsättning [h⁻¹]

V = Volym [m³]

Överföringssannolikheten för respektive person i rummet beräknas med Ekvation 3.

$$C = \frac{C_x - C_t}{C_k - C_t} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (3)$$

C = Överföringssannolikhet [%]

C_x = Mängd koldioxid vid den person som undersöks [PPM]

C_t = Spårgaskoncentration i tilluften [PPM]

C_k = Koncentration av koldioxid där detta släpps ut [PPM]

För att beräkna flödet i tilluftsdon samt frånluftsdon över Iris-spjället används Ekvation 4.

$$q = k \cdot \sqrt{p_i} \text{ [l/s]} \quad (4)$$

q = Luftomsättning [l/s]

k = Inställt k-värde på spjäll [-]

p_i = Tryckfall över spjäll [Pa]

Koldioxidens utblåsningshastighets beräknas med ekvation 5.

$$q = A \cdot v \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (5)$$

$$q = \textit{Flöde} \quad [\text{m}^3\text{/s}]$$

$$A = \textit{Slangens area} \quad [\text{m}^2]$$

$$v = \textit{Utblåsningshastighet} \quad [\text{m/s}]$$

3 Metod

Under kapitlet metod presenteras en objektbeskrivning, information om de instrument som använts under experimentet samt proceduren i kronologisk ordning.

Den huvudsakliga metoden för denna studie var spårgasmätningar med koldioxid där den spårgasmetod som användes var konstantflödesmetoden med koldioxid. Anledningen till att specifikt konstantflödesmetoden valdes var för att koldioxiden i största möjliga mån skulle efterlikna en människas andning men även då det är enklare att mäta, vilket bekräftas av Cui et al. (2015). Dessutom är det spårgassystem som användes vid mätningar utformat för just koldioxid.

3.1 Objektbeskrivning

Försöksrummet som experimenten utfördes i är placerad i laboratoriet (hus 45) i Högskolan i Gävle. Rummet hade en area på 16 m² där varje vägg var 4 m lång med en takhöjd på 2,5 m vilket i sin tur gav rumsvolymen 40 m³. Väggarna bestod av 10 mm spånskivor, 100 mm isolering samt en ångspärr på insidan av väggen. Rummet var utrustat med ett bord och fyra stolar där termiska dockor placerades för att representera människor, se Figur 1, avståndet mellan dockorna återfinns i Figur 10. Bordet som användes hade måtten 0,8 x 1,6 m och placerades centralt i rummet vilket var 1,2 m respektive 1,6 m från väggarna.

Ventilationssystemet hade både ett omblandande och ett deplacerande tilluftsdon, som kunde ändras genom att gå upp på rummets tak. Det fanns även ett frånluftsdon i rummet. Rumstemperaturen i testrummet hölls konstant på 25 °C med hjälp av en elektrisk radiator som startades vid behov när rumstemperaturen blev för låg, radiatortorn kopplades ur när experimenten utfördes.



Figur 1: Placering av termiska dockor

Tilluftsdonet som användes vid omblandande ventilation var en flerkonspredare vid namn Lindab FKD, se Figur 2. Donet var placerad mitt i rummet, avståndet var 2 m från donets mittpunkt till respektive vägg. För deplacerande ventilation användes ett tilluftsdon från Polman's, se Figur 2, donet hade dimensionen 300 mm. Det ventilationssystem som inte användes då mätningar genomfördes skruvades igen i taket med isolering och spånskiva, dessutom tejpades nyckelhål för och hålet i väggen där kablar drogs igenom fylldes med isolering för att minimera läckage av värme och luft.



Figur 2: Ombländande tilluftsdon till vänster (med en anemometer) och deplacerande tilluftsdon till höger.

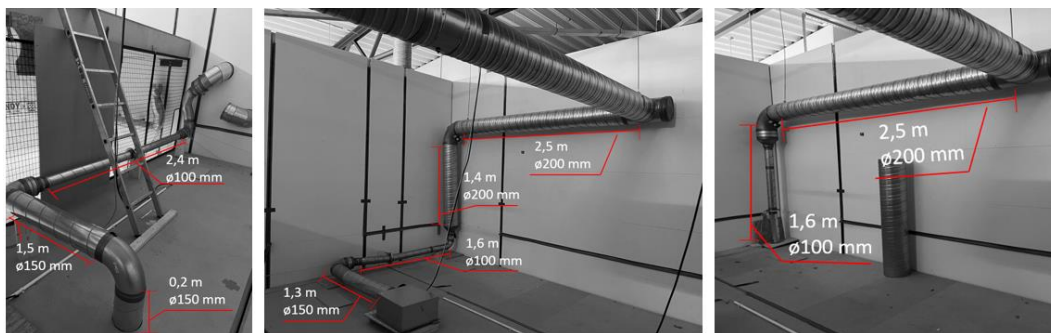
3.1.1 Ventilationssystem

Standardgrundflödet enligt BBR valdes vid utförandet (Boverket 2018). Ett Irisspjäll med diametern 100 mm med ett K-värde på 3 och manometer användes för att säkerställa att rätt till- och frånluftsflöde tillgodosågs av till-, och frånluftsdonen enligt Tabell 1. För att tillhandahålla rätt flöden behövdes ett tryckfall på 230 Pa över respektive Irisspjäll. Tilluftsfläkten ställdes på varvtalet 45 % av fullständig kapacitet och frånluftsfläkten ställdes på varvtalet 50 % av full kapacitet.

Tabell 1: Beskrivning av luftflöden.

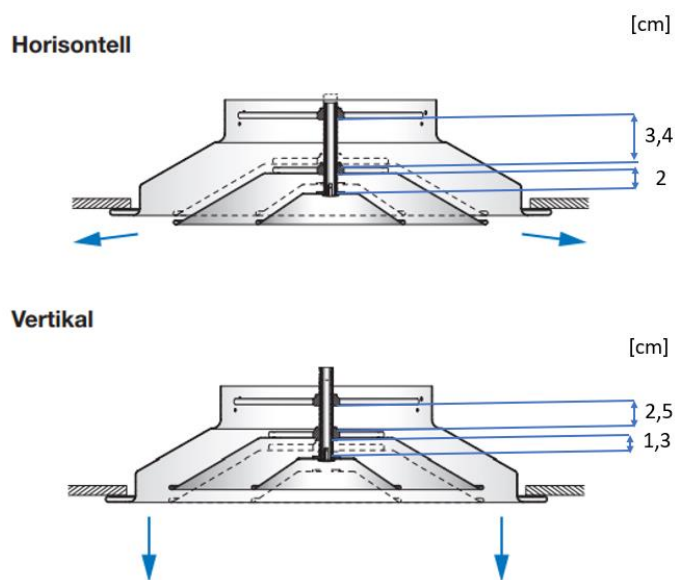
Grundflöde [$l/s \cdot m^2$]	Flöde per person [$l/s \cdot p$]	Totala flödet i rummet [l/s]	Luftväxling [h^{-1}]
0,35	10	45,6	4,1

Byggnaden är utrustad med ett luftaggregat som försåg testrummet med luft. Kylning av tilluft skede med hjälp av utomhusluft som togs in genom taket av laborationshallen. Från luftaggregatet var en kanal kopplad ut till testrummets tak för att förse tilluft. Vid Irisspjället har kanalerna tillfälligt minskats till dimensionen 100 mm. Kanalsystemet på testrummets tak presenteras i Figur 3.



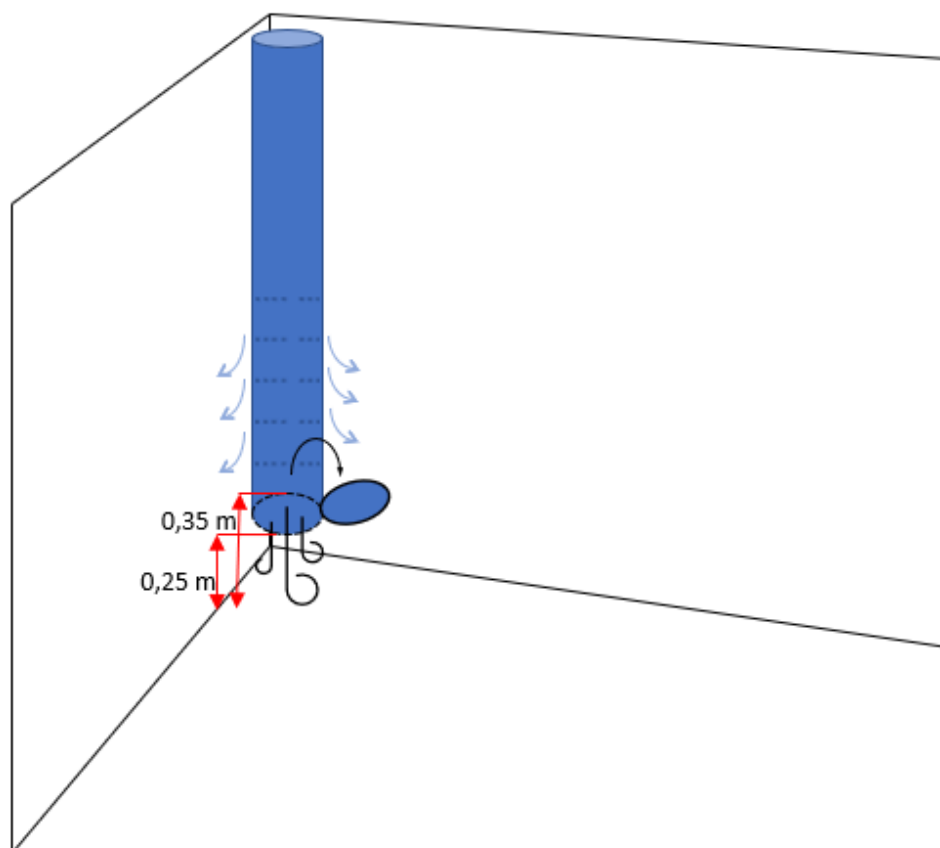
Figur 3: Kanalsystemet på testrummets tak med längder och dimensioner på kanalerna vid omblandande ventilation, till vänster visas frånluften, i mitten presenteras omblandande och till höger deplacerande.

Flerkonspridaren som användes för omblandande ventilation har en funktion där plattorna på donet kan roteras för att ändra riktningen på tilluftsstrålen mellan vertikal och horisontell. Avståndet mellan plattorna för respektive riktning på tilluftsstrålen redovisas i Figur 4.



Figur 4: Avstånd i centimeter mellan plattorna på det omblandande tilluftsdonet då tilluftsstrålen ändras mellan horisontell och vertikal riktning, bild tagen från (Lindab Ventilation A/S 2023).

Det deplacerande donet från Polman's var avsett att tillföra luft 360° från de små hålen längst nedre halvan av donet, se Figur 5. För att möjliggöra större forcering mot golvet och en mindre forcering längst väggarna så öppnades en lucka i donets nedre del vilket också syns i Figur 5. Då den nedre öppningen hade en sned design mättes avståndet från tilluftsdonets öppning och golv mättes till 0,25 – 0,35 m där tvärsnittsarean på utblåsningsöppningen beräknades till 0,071 m².



Figur 5: Tilluftsdonet för deplacerande ventilation. Donet är avsett att spruta ut luft längst sidorna på nedre delen av donet. För att möjliggöra en större forcering ned mot golvet öppnas luckan i donets nedre del. Utblåsningshöjden mättes till 0,25 m och utblåsningsarean beräknades till 0,071 m².

3.2 Instrument

De instrument som användes under studien presenteras i kategorier nedan.

3.2.1 Avståndsmätning

En lasermätare av modellen Cocraft PRO DT800-P och måttband har använts vid mätning av avstånd. Måttband används i de fall då lasermätaren inte gick att använda till exempel vid mätning av dimensioner på ventilationskanaler. Den relativa fuktigheten mäts med en datalogger, mätdata fås genom att ansluta dataloggern till en dator och gå in på hemsidan Easylog.

3.2.2 Hastighet, temperatur och tryck

Med hjälp av CTA 88 multichannel anemometrar kunde lufthastighet samt temperaturer mätas. Anemometrarna kopplades in till datainsamlingsenheten CTA 88, se Figur 6.



Figur 6: Datainsamlingsenhet CTA 88 som används vid temperatur-, och lufthastighetsmätning med anemometrar.

Temperaturmätning på ytor mätes med hjälp av termoelement som kopplades till datainsamlingsenheten Agilent 34972A från Keysight technologies, se Figur 7. Termoelementen var av typ T och består av koppar och konstantan, mätnoggrannheten är $\pm 1^\circ\text{C}$ då de används i kombination med Agilent 34972A. Resultatet från mätningar med anemometrar och termoelement visades i programvaran NI LabVIEW 2017 där de sedan matades ut till textfiler som överförs till Excel för databehandling.



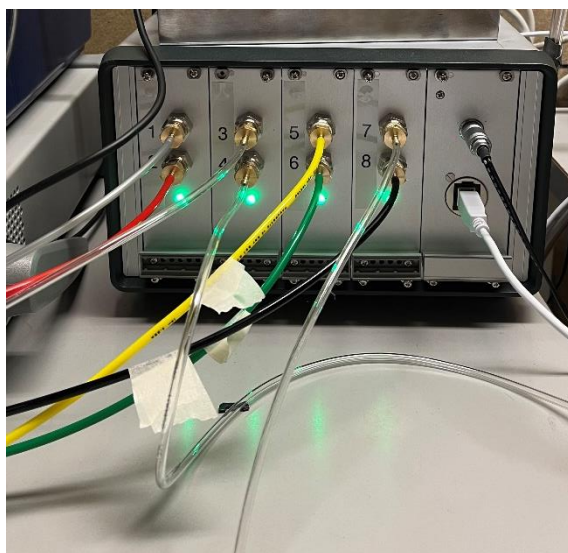
Figur 7: Datainsamlingsenhet för temperaturmätning med termoelement på 16 punkter i rummet.

Tryckdifferensen över Irisspjäll mätes med en manometer av modellen Swemaman 80. Mätnoggrannheten för manometern är 95 % då rumstemperaturen är 23°C .

3.2.3 Spårgassystem

För att genomföra spårgasmätningar användes koldioxid (CO_2) som spårgas, koldioxiden distribuerades från en gasflaska med koldioxid från AGA. För att reglera nivå av koldioxid som tillfördes rummet blandades koldioxid med tryckluft. För att genomföra detta användes en rotameter och en flödesregulator. Flödet för tryckluften var 10 l/min vilket innebär att koldioxiden som blandades med tryckluften har samma flöde vid forcering. Den slang som tillförde koldioxid till rummet hade en radie på 5mm.

Koncentrationsmätning skede genom sex olikfärgade plastslangar med en diameter på 4 mm som kopplades in till en koldioxidmätare. Koldioxidmätaren på Figur 8 är den som användes för att mäta koncentrationen av spårgas genom att luft pumpades in från mätpunkterna i rummet genom slangarna till de 8 kanalerna, mätnoggrannheten är $\pm 3\%$. Koldioxidmätaren bygger på optik vilket innebär att det som den avläser är infraröd strålning som studsar fram och tillbaka och hur stor andel infraröd strålning som koldioxiden absorberar och som därmed försvinner längs vägen. Detta mäts av en sensor som heter NDIR vilket står för Non Dispersive Infra Red.

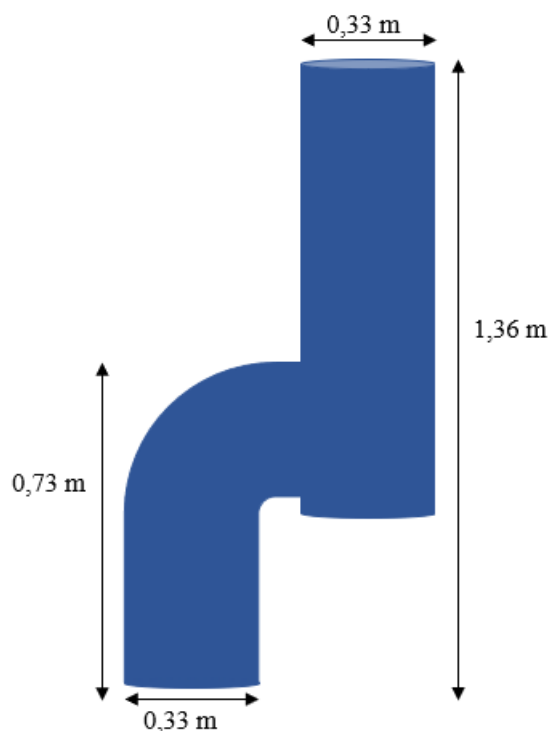


Figur 8: Koldioxidmätare som användes för att mäta koncentrationer av koldioxid på sex punkter i rummet.

3.2.4 Termiska dockor

Samtliga fyra termiska dockor hade en sittande position och placerades runt ett fyrkantigt bord med ett avstånd på 1,5 m mellan de dockor som satt framför varandra och 0,73 m mellan de dockor som satt bredvid varandra. Avståndet mellan bord och dockornas bål var 0,3 m. Samtliga dockor hade en andningszon på 1,1 m ovanför golvet och hade en kontant värmeavgivning på totalt 418,4 W där respektive docka stod för 104,6 W, 104,3 W, 105,1 W och 104,4 W vilka tillfördes elektriskt. Respektive docka hade en värmeavgivning på cirka 100 W då detta representerar värmeavgivningen för en normalstor person i vila.

Dockorna består av två sammankopplade spiralrör med en diameter på 0,33 m. För att positionera dockorna i en sittande position har en utav de sammankopplade spiralrören en svängande design. Alla mått på de termiska dockorna presenteras i Figur 9. Samtliga dockor är klädda med blått tyg och döps till Osbal, Halbal, Jasbal och Stebal och är placerade enligt Figur 10.



Figur 9: Höjd från fötter till bål samt totalhöjd på de termiska dockorna. Spiralröret som dockorna är producerade av har en diameter på 0,33 m.

3.3 Procedur

Det första som genomfördes var avståndsmätning mellan alla objekt i rummet, mätningarna genomfördes med en lasermätare och ett måttband. Kartläggning av till-, och frånluftsdonens avstånd till väggarna utfördes samt placering av bord, stolar och termiska dockor i förhållande till väggarna.

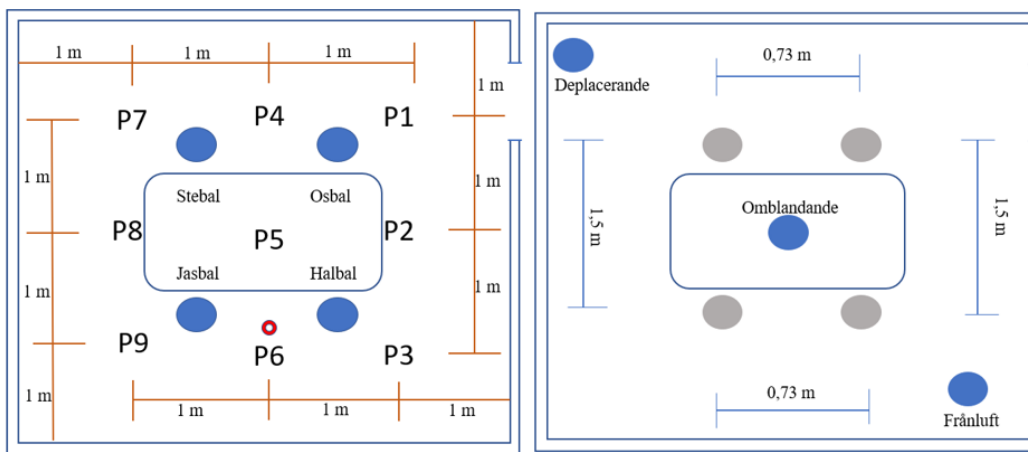
För att undersöka på vilket sätt flödet på tilluften och frånluften skulle regleras utförs en serie med tester där varvtalet på fläkten först ändrades med konstant K-värde på IRIS-spjället. Detta testades för K-värde 2, K-värde 2,5 och K-värde 3, varvtalen ändras mellan 40 % och 90 % av maximal kapacitet med intervall om 5 %.

Ett andra test genomfördes då K-värdet ändrades men varvtalet var detsamma, varvtalet hölls på konstant 50 % av full kapacitet och K-värden mellan 1,5 och 4,5 undersöktes med ett intervall på 0,5.

För att kontrollera så spårgassystemet fungerade användes avklingningsmetoden. En ballong fylldes med koldioxid och luften från ballongen blåstes in i golvnivå i rummet. Samtidigt som koldioxiden från ballongen spreds ut i rummet blandades rums-luften runt med en fläkt som stod på golvet. Koldioxidnivån i rummet betraktades under en period för att kontrollera att nivån ökade då koldioxiden släpps ut i rummet för att sedan minska över tid med en avklingande effekt.

3.3.1 Lufthastighetsmätning

Genomförande av lufthastighetsmätning skedde med anemometrar i tre omgångar för respektive ventilationssystem och respektive fall för det aktuella ventilationssystemet. För omblandande ventilation skedde lufthastighetsmätning både då tilluftstrålen var horisontell och vertikal och för deplacerande genomförs mätningar för de två olika tilluftstemperaturer som studerades. I rummet mättes hastigheten och temperaturen på totalt nio punkter enligt Figur 10, punkterna var jämnt fördelade i rummet med 1 meters avstånd från närliggande väggar respektive närliggande punkter.



Figur 10: Den vänstra bilden avser de nio punkterna i rummet där lufthastighet och temperatur mättes, för varje punkt sker mätning på tre höjder. Figuren till höger visar avståndet mellan de termiska dockorna och tilluftsdonen samt frånluftsdonet. Den röda cirkeln symboliserar stolpen med termoelement där temperaturprofil samt operativ temperatur mättes.

En anemometer placerades direkt i öppningen på tilluftsdonet för mätning av hastighet och temperatur i tilluften. För de nio punkterna sker mätningar på tre höjder vilka var: 0,1 m upp från golvet för att representera hastigheten och temperaturen vid fotankeln och precis innanför vistelsezonen, 0,6 m från golvet för att representera en sittande persons bål och 1,1 m upp från golvet vilket är i andningszonen för en sittande person. En mätning pågick under 30 minuter, där anemometrarna mäter en gång varje sekund. Under den första mätningen mättes hastigheten i punkterna 1 till 3, under andra mätningen mättes punkterna 4 till 6 och den sista mätningen gjordes på punkterna 7 till 9. Mellan varje ny mätning fick rummet stå i minst 30 minuter för att stabiliseras efter att mätutrustning flyttats. Mätvärdena från varje mätning lades in i Excel för analys.

3.3.2 Spårgasmätning

För spårgasmätningen användes konstantflödesmetoden, en konstant mängd koldioxid spreds ut i höjd med en av de termiska dockornas mun under en timme. Innan mätningar startades skedde kontroll av koncentrationen på punkterna i rummet så att stabila förhållanden hade uppnåtts.

Spårgasmätningar genomfördes med två smittkällor för respektive ventilationssystem. För omblandande ventilation genomfördes en spårgasmätning för bägge riktningar på tilluftstrålen vilka är horisontell och vertikal. Då deplacerande ventilation studerades öppnades luckan - som återfinns i Figur 5 - i donets nedre del upp för att åstadkomma ett högre flöde längst golvet och två olika fall studerades med två skilda inblåsningstemperaturer. Dessa temperaturer var 21,3°C och 16°C. Termoelement, anemometer samt slang för mätning av koldioxidnivå placerades inne i donets kanal.

De två fallen som studerades är då den termiska dockan Stebal var smittkällan och då den termiska dockan Halbal var smittkällan. Den termiska docka som var smittad utrustades med en slang som tillförde koldioxid till rummet i horisontell riktning i höjd med munnen, 1,1 m upp från golvet med ett flöde på 10 L/min och en hastighet på 2,1 m/s. Koldioxid tillfördes med en koncentration på cirka 8000 PPM i samråd med handledare för att symbolisera andning. En mindre plastslang kopplades in i den slang som satt på dockan och distribuerade koldioxid för att kontrollera koncentrationen av koldioxid vid källan enligt Figur 11, för kontroll kopplades en annan plastslang in i den slang som distribuerar koldioxid precis efter rotametern. Slangen vid rotametern kopplas in till koncentrationsmätaren för att undersöka att värdet visar liknande värde som slangen vid källan. En tredje referenspunkt kopplades ut till laborationshallen. Mätvärden togs en gång var tionde sekund och registrerades i NI Lab VIEW 2017.



Figur 11: Metod för tillförel av koldioxid ur den större genomskinliga slangen som är kopplad till ett vitt svängande rör. Mätning av koldioxidkoncentrationen vid källan görs ur den mindre svarta slangen som är placerad inuti det svängande röret.

3.3.3 Temperaturmätning

Under spårgasmätningarna mättes temperaturer på rummets ytor med termoelement. Termoelementen placerades i mitten av alla väggar vilket gav avståndet 1,25 m från golvet och 2 m in från hörnet. För att yttemperatur skulle mätas och inte lufttemperatur tejpades mätpunkten av termoelementet mot väggen med hjälp av silvertejp. Termoelement på golv placerades centrerat i mitten av rummet vilket var 2 m från respektive vägg, i taket placeras ett termoelement bredvid tilluftsdonet. Sju termoelement placerades vertikalt på en stolpe där den första placerades 0,1 m från golvet, de resterande sex termoelementen placerades med avståndet 0,33 m från varandra i höjddled. Det termoelement som är 1,1 m från golvet på stolpen användes för att mäta operativ temperatur. Detta genomfördes med en globtermometer. Stolpen var placerad 0,7 m ifrån väggen enligt Figur 13. Ett termoelement placerades i tilluftsdonet och en i frånluftsdonet, dessa hängde med mätpunkten fritt inne i donet så att luftens temperatur mättes. Temperaturmätning skedde var femte sekund.

3.3.4 Termisk komfort

För att mäta den termiska komforten vid varje docka användes programvaran CBE thermal comfort tool (Tartarini m.fl. 2020). Ett medelvärde av lufthastigheterna runt dockorna mättes upp under 30 minuter. För att beräkna den relativa fuktigheten i rummet placerades dataloggern centralt mitt på bordet under tiden som övriga mätningar genomfördes varpå ett medelvärde togs på den relativa fuktigheten i rummet. Som klädsel valdes 0,61 clo vilket symboliserar byxor och en långärmad tröja och som aktivitetsnivån valdes 1,2 met för att symbolisera en människa som sitter och för en diskussion.

3.4 Tillförlitlighet och dataanalys

De instrument som använts har kalibrerats av kunniga inom området på Högskolan i Gävle. Detta experiment har genomförts under våren då utomhustemperaturen varit mellan 3 °C och 16 °C. Under studien har Högskolans kylsystem varit ur bruk, detta löstes genom att kyla tilluften med utomhusluft och se till att vädret utomhus varit liknande under alla dagar som mätningar genomförts. På grund av detta uppstod det ibland svårigheter med att kontrollera temperaturen på tilluften från dag till dag. Av denna anledning har rumstemperaturen hållits konstant på 25 °C med hjälp av en radiator och alla parametrar har tagits hänsyn till så att den termiska komforten är i enlighet med EN-16798 standard.

Då anemometrarnas användningsområde i huvudsak är hastighetsmätning har dessa kalibrerats för detta ändamål, det innebär att deras förmåga att mäta temperatur har kalibrerats i kombination med kalibrering för hastighetsmätning. Därav är givna temperaturer från anemometrar något mindre noggranna än de som kommer från termoelementen då dessa kalibrerats enbart för temperaturmätning.

Då temperaturmätning på olika höjder i rummet med termoelement skulle genomföras blev temperaturen på höjden 0,76 m något lägre än resterande temperaturer vid de första försöken. Detta löstes genom att testa att flytta mätpunkten vilket gav mer logiska värden efter två försök. De två tidigare mätpunkterna var vid bordets kortsida, placerad mellan Stebal och Jasbal och vid bordets långsida placerad bredvid Jasbal och Halbal. Att temperaturen som uppmättes på dessa positioner blev lägre kan förklaras med att mätpunkten på 0,76 m var nära bordskivan vilket kan ha betytt att en kallare strålningstemperatur uppmättes i stället för lufttemperaturen som önskades mätas.

Koldioxidmätaren är tillverkad på Högskolan i Gävle och används för första gången under denna studie, detta har i sin tur medfört att vissa problem uppkommit under arbetets gång. Vissa problem varit svåra att hantera själva men också varit svåra att förklara även för kunniga inom området. Detta har medfört att vi i brist erfarenhet och tid varit tvungna att göra om mätningar då problemet inte hunnit åtgärdats. Ett utav problemen som vi stötte på tidigt i processen är att koldioxidmätaren enbart kunnat mäta koldioxidhalter upp till 10 000 ppm. Till att börja med tillfördes ren koldioxid till rummet vilket innebär att koldioxidmätaren visade 10 000 ppm trots att nivån troligt var högre, därav minskades validiteten och reliabiliteten för koldioxidmätningarna. För att lösa detta spädes koldioxiden ut med tryckluft för att åstadkomma en önskad koldioxidhalt och för att lättare kunna reglera halten. Innan experimentets start kalibrerades koldioxidmätaren, för att validera resultatet efter experimentet genomfördes en till kalibrering för att kontrollera att de mätvärden som fått har varit i god mätnoggrannhet. För att kalibrera användes en kalibreringsgas vilken har en känd halt på 400 ppm. Gasen är nitrogen och har en mätnoggrannhet på $\pm 2\%$. Kalibreringen efter genomförda experiment visade att koldioxidmätaren hade visat 50 ppm mindre vid mätning på deplacerande ventilation än vid mätning på omblandande ventilation. Att detta skett kan förklaras med att det i samband med första kalibreringen hade varit utsläpp från en fabrik i närområde till högskolan vilket visade generellt högre CO₂ halter i atmosfären.

Dataanalys har skett med hjälp av Excel där beräkningar genomförts. För att göra figurer och tabeller har Excel samt PowerPoint använts.

4 Resultat

Under detta kapitel presenteras samtliga resultat som är av intresse för denna studie. Resultaten delas upp så att omblandande respektive deplacerande ventilation presenteras separat. Kapitlet avslutas med ett avsnitt om den termiska komforten i rummet.

4.1 Omblandande ventilation

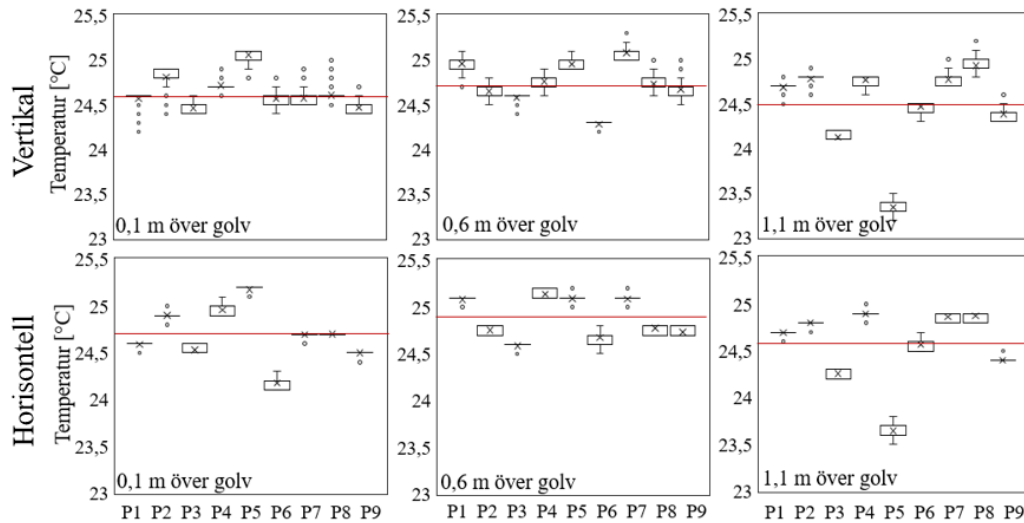
För omblandande ventilation presenteras resultaten för horisontell respektive vertikal riktning på tilluftsstrålen. Då studien på omblandande ventilation genomfördes var förhållandena enligt Tabell 2.

Tabell 2: Förhållanden under hastighetsmätningar för omblandande ventilation.

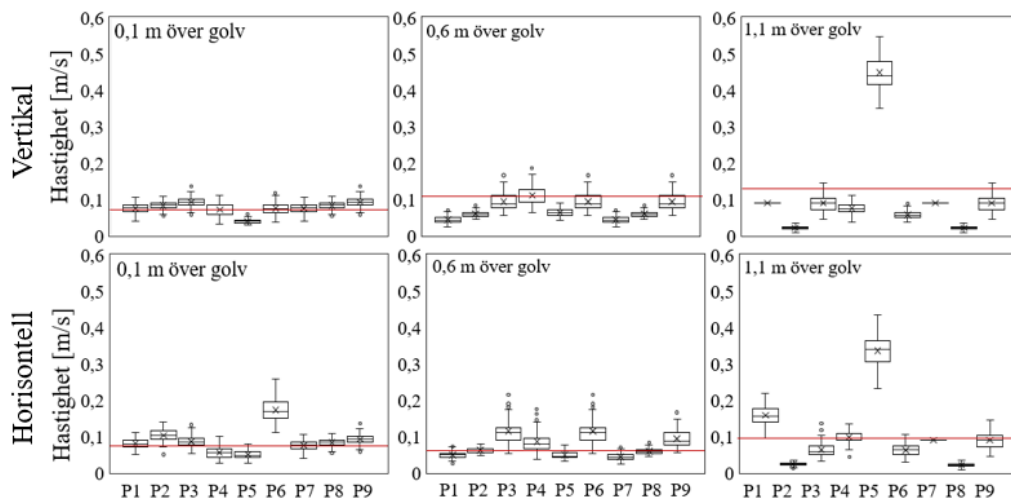
Utomhustemperatur:	9–11 °C
Väder:	Halvklart
Tilluftstemperatur:	19 °C
Operativ rumstemperatur:	24,9 °C

4.1.1 Luftastighetsmätning och temperaturer

Resultaten av temperaturmätning med anemometrar presenteras i Figur 12 för respektive höjd på de nio positionerna i rummet där de röda linjerna, som representerar medeltemperaturerna, för respektive höjd konstateras vara relativt lika. En avvikelse kan fastställas på punkt 5 vid höjden 1,1 m över golv där temperaturen är lägre än resterande punkter på samma höjd. Figur 13 visar de uppmätta lufthastigheterna i rummet där resultatet visar att samtliga punkter har lika förhållanden. Hastigheterna konstateras vara relativt lika där det även här fastställs en avvikelse på punkt 5 på höjden 1,1 m där hastigheten är högre än de resterande punkterna på samma höjd.

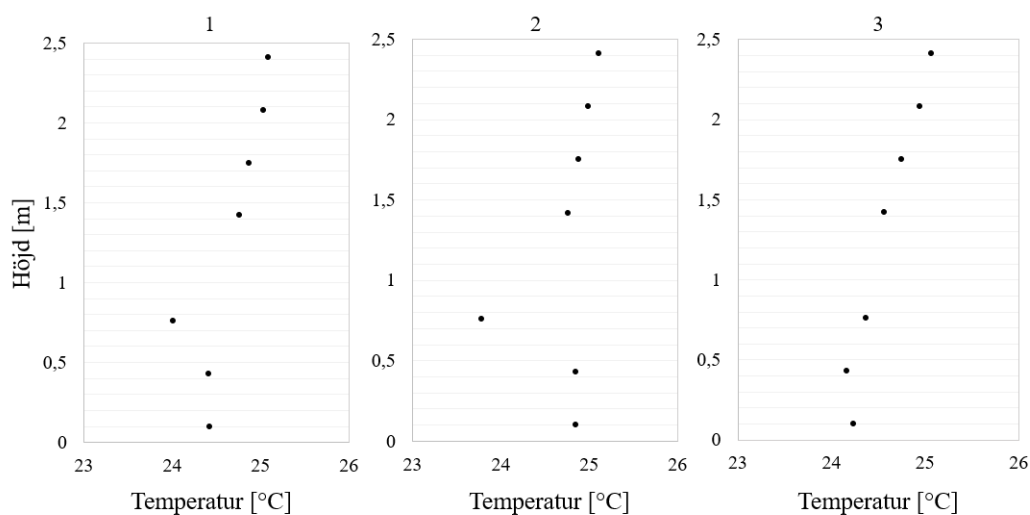


Figur 12: Låddiagram över temperaturer på de nio positionerna i rummet, till vänster i figuren visas inställd riktning på tilluftsstälén. Den röda linjen representerar medeltemperaturen i för de nio positionerna i samma höjd.

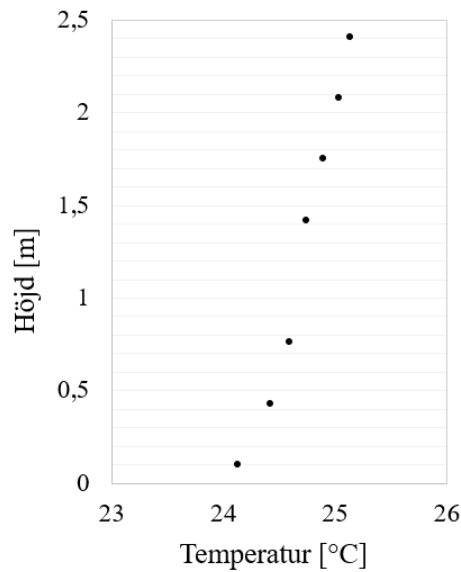


Figur 13: Låddiagram över lufthastighet uppmätt med anemetrar på de nio positionerna och på de tre olika höjderna, inställd riktning på tilluftsstrålen visas till vänster i figuren. Det röda strecket representerar medelhastigheten för de nio positionerna i samma höjd.

Figur 14 visar de tre olika temperaturprofilerna, punkten som avser mäta på höjden 1,1 m är borttagen ur diagrammen då denna visar den operativa temperaturen. Figur 15 beskriver temperaturprofilen med horisontell riktning på tilluftsstrålen. Samtliga punkter är placerade längst en stolpe som går från golv till tak. I figuren kan tre olika positioner av stolpen avläsas där placering 1 av stolpen medförde en avvikelse på punkten 0,7 m över golvet. För att minimera misstänkt strålningstemperatur från bordet placeras stolpen på nytt vilket är placering 2. Placering 2 resulterade i en ökning på avvikelsen på punkten 0,7 m över golvet och ett tredje försök i att minimera strålningstemperatur gjordes genom att flytta stolpen ytterligare till placering 3. Vid placering 3 kunde den tidigare avvikelsen på punkten 0,7 m över golvet inte synas och därmed fick stolpen vara stående på placering 3 under alla mätningar då temperaturerna visat sig vara opåverkade av bordet och annat material i rummet.

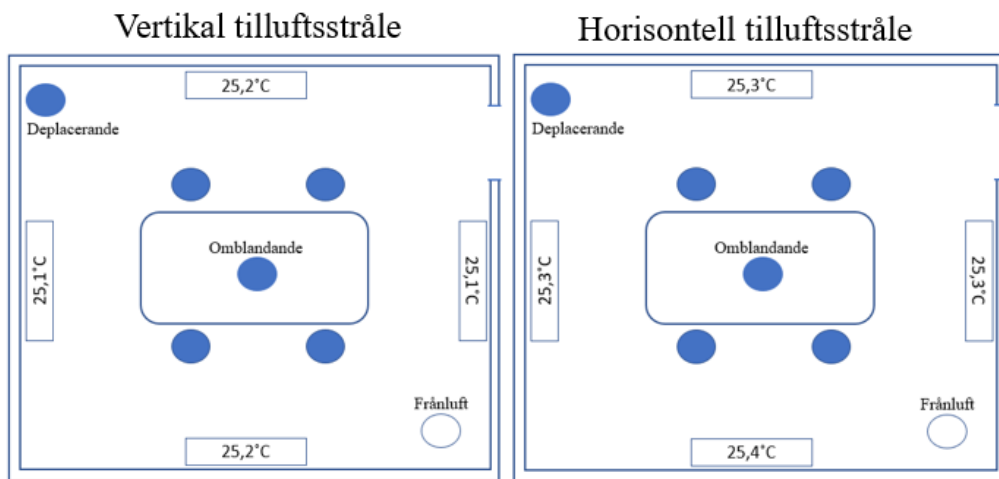


Figur 14: Tre olika temperaturprofiler i rummet från golv till tak med vertikal tilluftsstråle, uppmätt med termoelement. Bilden till vänster i figuren representerar temperaturprofilen vid placering 1 av stolpen där en avvikelse på punkten 0,7 m över golvet syns. Bilden i mitten representerar temperaturprofilen vid placering 2 med en större avvikelse på punkten på 0,7 m över golvet. Bilden till höger representerar temperaturprofilen vid placering 3 utan avvikelse av punkten på 0,7 m över golvet och därmed blir stolpen med samtliga termoelement slutligen placerad resterande av alla mätningar.



Figur 15: Temperaturprofilen i rummet från golv till tak med horisontell tilluftsstråle, uppmätt med termoelement.

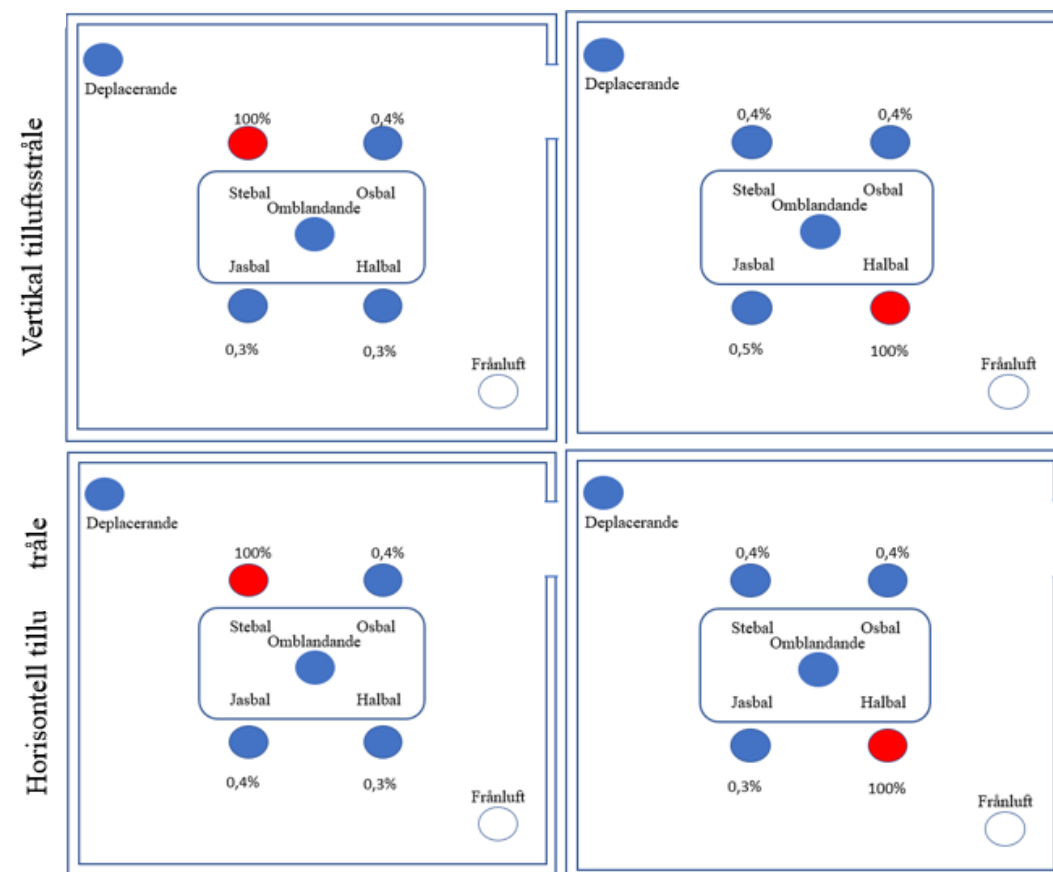
De uppmätta yttemperaturerna på mitten av väggarna presenteras i Figur 16. Resultatet i figuren visar en jämn temperaturfördelning på rummets ytor. Den uppmätta temperaturen på golvet är 25,6 °C och den uppmätta temperaturen på taket är 25,1 °C för vertikal riktning och för horisontell riktning är temperaturen på golvet 25,7 °C och temperaturen på taket 25,62°C.



Figur 16: Medelyttemperaturer på mitten av väggarna för de två fallen, uppmätt med termoelement.

4.1.2 Spårgasmätning

Figur 17 illustrerar överföringssannolikheten för varje persons andningszon runt bordet då omblandande ventilation används för de två olika riktningarna på tilluftstrålen. Resultatet visar hur omblandande ventilation har liknande överföringssannolikhet för alla mätningar och positioner. Det konstateras även att förhållande till smittkällan inte har någon större inverkan. Vid smittkällan visas överföringssannolikheten 100% där flödet är 10 L/min.



Figur 17: Överföringssannolikhet i andningszonen med omblandande ventilation, inställd riktning på tilluftstrålen visas till vänster i figuren.

4.2 Deplacerande ventilation

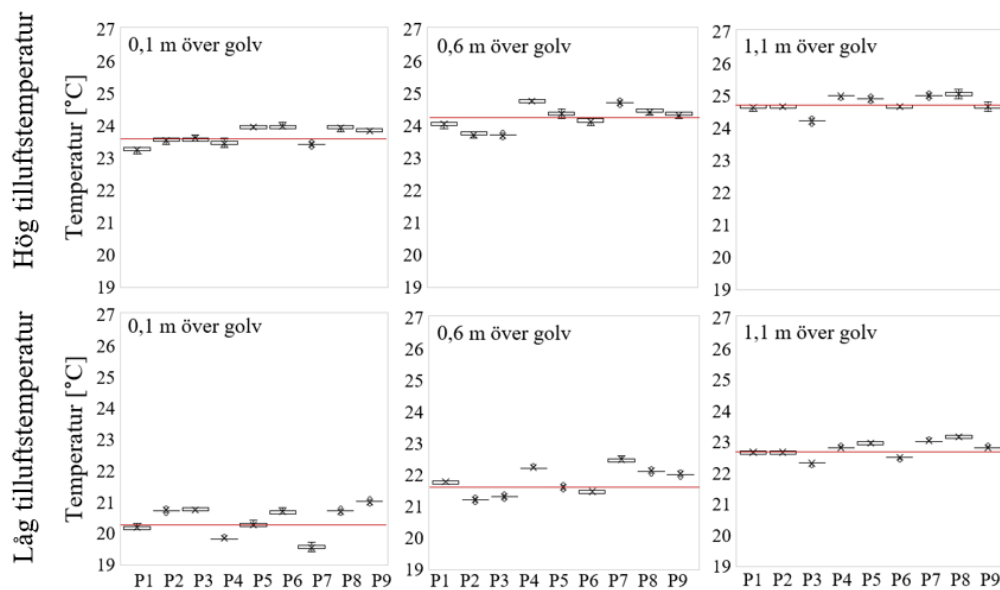
För deplacerande ventilation presenteras resultat både då utomhustemperaturen är högre respektive lägre. Förhållandena för respektive dag som deplacerande ventilation studerades presenteras i Tabell 3.

Tabell 3: Parametrar för respektive dag som mätningar på deplacerande ventilation genomförts.

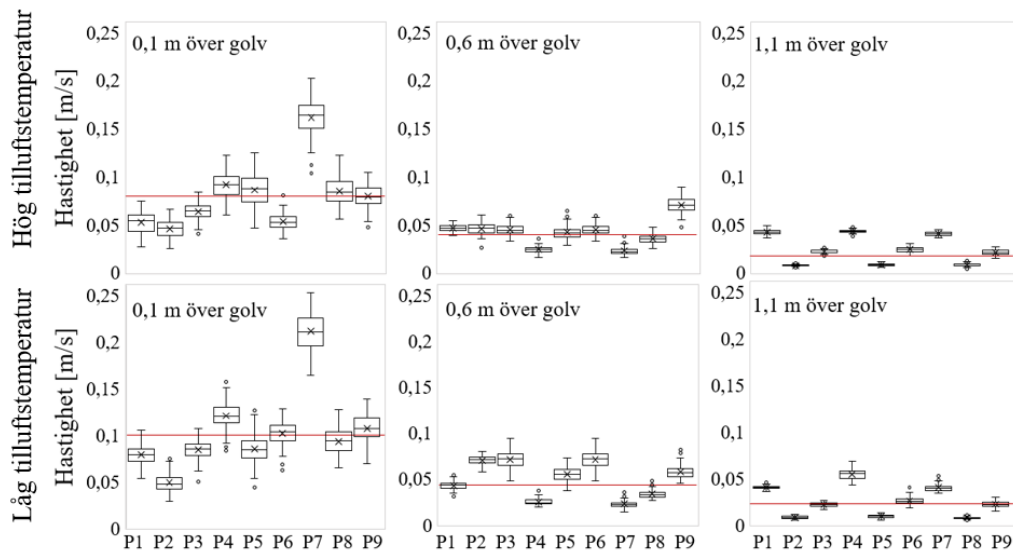
	Dag 1:	Dag 2:
Utomhustemperatur:	16 °C	3 °C
Väder:	Soligt	Regn
Tilluftstemperatur:	21,3 °C	16,0 °C
Operativ rumstemperatur:	24,8 °C	23,1 °C

4.2.1 Lufthastighetsmätning och temperaturer

De temperaturer som uppmätts med anemometer återses i Figur 18 där mönstret för temperaturerna ökar för respektive höjd. Temperaturerna är lägre vid golvnivå och ökar med höjden vilket syns vid analys av de röda linjerna som representerar medeltemperaturerna. Figur 19 presenterar de uppmätta lufthastigheterna med anemometrarna och mönstret för lufthastigheterna är högre vid golvnivå och avtar med höjden, detta konstateras genom analys av medelhastigheterna. En avvikelse från resterande punkter på samma höjd upptäcks på punkt 7 på höjden 0,1 m över golv.

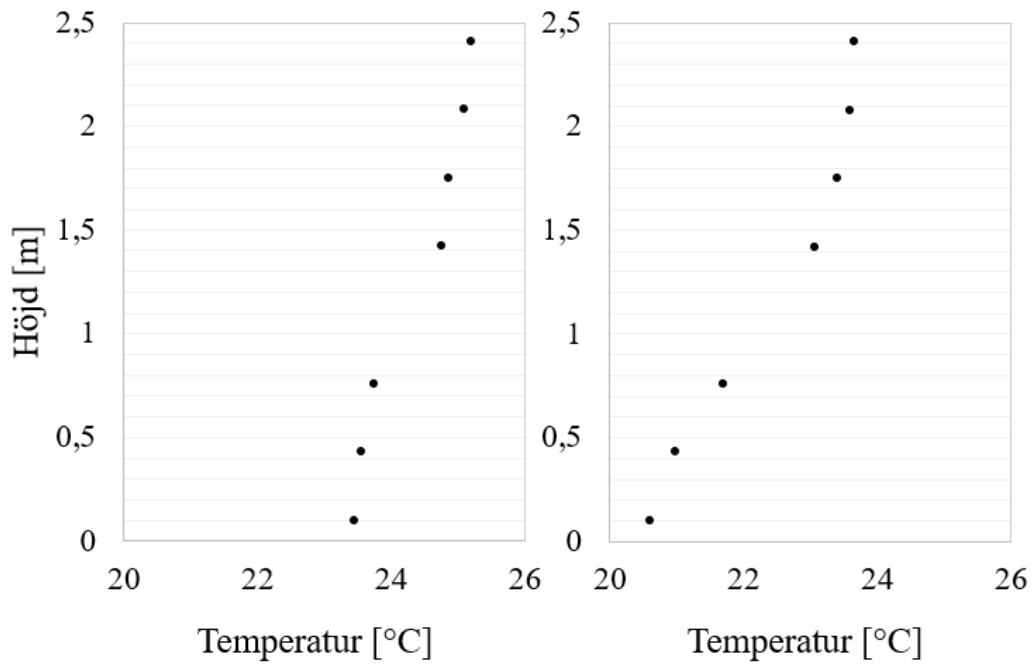


Figur 18: De temperaturer som uppmätts med anemometrar på de nio positionerna i rummet. Det röda strecket symboliserar medeltemperaturen för de nio positionerna. Den översta raden är då inblåsningstemperaturen är 21,3°C och den nedre raden är då inblåsningstemperaturen är 16°C.

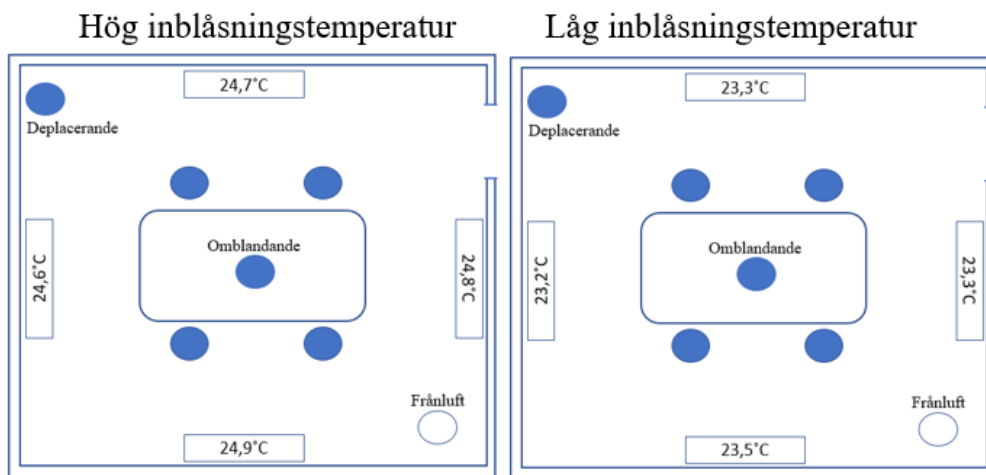


Figur 19: Lufthastigheter uppmätt med anemometrar på de nio positionerna i rummet. Det röda strecket symboliserar medelhastigheten för de nio positionerna. Den översta raden är då inblåsningstemperaturen är $21,3^{\circ}\text{C}$ och den nedre raden är då inblåsningstemperaturen är 16°C .

Figur 20 representerar temperaturprofilen på olika höjder i rummet, punkten placerad 1,1 m över golvet har tagits bort då denna mäter operativ temperatur. Figur 21 visar temperaturerna på de olika ytorna i rummet. Rummets ytor har någorlunda jämn temperaturfördelning i båda de studerade fallen, bakre väggen vid frånluftsdonet visar sig ha något förhöjd yttemperatur. Temperaturen på golvet är $24,4^{\circ}\text{C}$ och temperaturen på taket är $24,7^{\circ}\text{C}$ vid hög inblåsningstemperatur. För låg inblåsningstemperatur är temperaturen på golvet $21,8^{\circ}\text{C}$ och temperaturen på taket $23,4^{\circ}\text{C}$.



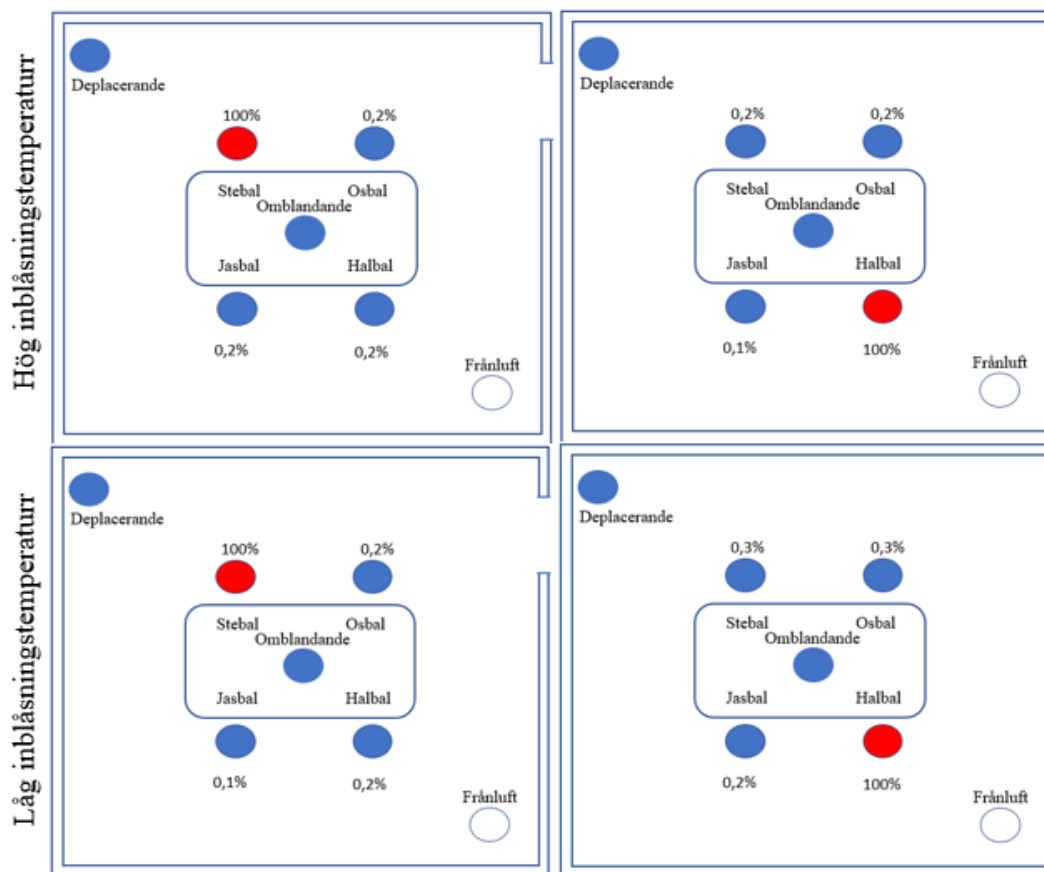
Figur 20: Temperaturprofilen i rummet vid deplacerande ventilation. Den vänstra bilden är då tilluftstemperaturen är 21,3 °C och den högra bilden är då inblåsningstemperaturen är 16 °C.



Figur 21: Medeltemperaturer på mitten av väggarna för de två fallen, uppmätt med termolement.

4.2.2 Spårgasmätning

Figur 22 visar överföringssannolikheten då deplacerande ventilation används. Figuren visar att positionering av smittkällan har en inverkan på överföringssannolikheten. Då Stebal är smittad och inblåsningstemperaturen är hög visar resultatet att överföringssannolikheten är densamma för alla positioneringar i rummet, då smittkällan flyttas närmare frånluftsdonet är överföringssannolikheten mindre för positionering bredvid smittkällan jämfört med positionering mitt emot för båda de studerade fallen.



Figur 22: Överföringssannolikheten i andningszonen med deplacerande ventilation. Den övre raden är då inblåsningstemperaturen är 21,4 °C och den nedre raden då inblåsningstemperaturen är 16,0 °C.

4.3 Termisk komfort

De uppmätta parametrar som använts för att beräkna den termiska komforten presenteras i Tabell 4.

Tabell 4: Uppmätta parametrar för termisk komfort då omblandande respektive deplacerande ventilation studerats.

	Omblandande fall 1 & 2:	Deplacerande fall 1:	Deplacerande fall 2:
Luftfuktighet:	16,5 %	26,7 %	26,7 %
Medellufthastighet:	0,1 m/s	0,06 m/s	0,06 m/s
Operativ temperatur:	24,9 °C	24,8 °C	23,1 °C

Den termiska komforten presenteras i Tabell 5 och är i enlighet med EN-16798 standard.

Tabell 5: Den termiska komforten i rummet.

	Omblandande fall 1 & 2:	Deplacerande fall 1:	Deplacerande fall 2:
PMV:	-0,41	-0,06	-0,33
PPD:	8%	5%	7%
Kategori:	II	I	II

5 Diskussion

Under litteraturstudien fann vi att många tidigare studier visat att deplacerande ventilation är att föredra framför omblandande ventilation för att minska smittspridning. Varför författarna är överens om detta är för att principen för deplacerande ventilation är att byta ut luft med hjälp av termiska krafter, snarare än att blanda ut, vilket är principen för omblandande ventilation. Många författare nämner även personlig ventilation som ett bra alternativ men då möjligheten inte har funnits att testa denna typ av ventilation så kan denna studie inte styrka detta experimentellt. Med gott samvete lutar vårt antagande åt att personlig ventilation är av den bättre graden, detta då principen för personlig ventilation efterliknar deplacerande ventilation men även då många av artiklarna i litteraturstudien styrker detta. Fan et al. (2022) diskuterar att kombinationen av personlig-, och deplacerande ventilation är att föredra då det ger ventilering av en större yta eftersom den personliga ventilationen ventilerar bestämda punkter i rummet där personer vistas.

Att deplacerande ventilation har en större påverkan på att minska smittspridning av luftburna virus och bakterier har att göra med hur luften distribueras i rummet. Detta bekräftas av resultatet från de mätningar som genomförts under denna studie då mätningar har utförts genom att distribuera luften på olika sätt.

5.1 Resultatdiskussion, temperaturer och lufthastigheter

Enligt Figur 12 respektive Figur 13 syns det att temperaturerna ligger på ungefärligt på 24,5–25 °C och lufthastigheten på omkring 0,1 m/s för alla 9 punkter och höjder. Att mönstret är ungefärligt lika på alla punkter och höjder är något som förväntas vid omblandande ventilationssystem vilket också syns i högra bilden i Figur 14 samt i Figur 15. Det som avviker i Figur 12 och Figur 13 är punkt 5 på höjden 1,1 m, där lufttemperaturen är lägre och lufthastigheten är högre. Förklaringen är att punkten är placerad precis ovanför bordet och är närmast tilluftsdonet vilket gör att resultatet bedöms vara rimligt.

Genom att studera Figur 18 syns det hur temperaturen ökar för alla punkter för respektive höjd, detta resultat är förväntat eftersom det är på detta sätt temperaturprofilen ska se ut för deplacerande ventilation vilket även visas i Figur 20. Figur 19 visar hur lufthastigheterna såg ut på de punkter i rummet där mätningar genomfördes, det mönster som figuren visar är att lufthastigheten är högre i nivå med golvet och avtar med höjden. Detta för att det är i golvnivå ny luft sprids ut då deplacerande ventilation används. Att punkt 7 på höjden 0,1 m har en högre lufthastighet beror på att denna är placerad precis intill tilluftsdonet och därav flödar all ny luft hit med ett högt flöde. Genom att jämföra resultatet för omblandande och deplacerande ventilation visar användningen av deplacerande ventilation generellt lägre lufthastigheter och temperaturer.

5.2 Resultatdiskussion, omblandande ventilation

Vid tolkning av resultaten från Figur 17 visas att då det omblandande donet är inställt på vertikal riktning är det större överföringssannolikhet i andningszonen vid positionering bredvid smittkällan och då donet är inställt på horisontell riktning är det större överföringssannolikhet vid placering mitt emot smittkällan. Detta kan förklaras med att tilluftstrålen under vertikal riktning bryter andningsstrålen framför de termiska dockorna vilket minskar virusöverföringen framifrån. Dessutom sker omblandning direkt i andningszonen då tilluftsstrålens riktning är vertikal vilket gör att luften från smittkällan lättare sprids till personen bredvid. Varför sannolikheten till överföring ökar jämte personen vid horisontell riktning på tilluftstrålen kan förklaras att tilluftstrålen inte bryter andningsstrålen denna gång varken framför dockorna eller bredvid, men att avståndet är mindre mellan dockorna placerade bredvid varandra än de som är placerade framför varandra vilket medför att avståndet i detta fall har stor betydelse. Varför sannolikheten till att bli smittad ökar med 0,1 % för vardera dockan när smittkällan placeras nära frånluftsdonet, i detta fall Halbal skulle kunna förklaras i samband med den högre hastigheten på position 5 på 1,1 m som visas i Figur 13. Där skulle det på grund av den högre hastigheten bildas någon form av luftcirkulation på bordet som drar in omgivande kontaminerad luft vilket i sig orsakar en ökning av överföringssannolikheten.

Då överföringssannolikheten beräknats symboliserar procentandelen i Figur 17 och Figur 22 den andel kontaminerad luft som transporteras från smittkällans andningszon till de friska dockornas andningszon. Detta betyder alltså inte hur stor sannolikhet det är för respektive person i rummet att bli smittad. Risken att bli smittad beror på flera faktorer som bland annat den tid man vistas i rummet och aktivitetsnivå. Vid mätningarna tillfördes en konstant mängd koldioxid, det skulle i detta fall innebära att den smittade personen under hela tiden har ett konstant utandningsflöde utan variation vilket innebär att ingen hastig utandning, inandning eller nysning sker. Då utandningen forceras bidrar detta till att luften kan ta sig en längre sträcka vilket inte undersökts i denna studie. En annan sak att ta hänsyn till är att en människa ofta rör sig lite och vrider på huvudet i normala fall, detta innebär att en människa ofta riktar sitt huvud mot den person som den pratar med. Skulle detta tas i hänsyn kan en annan överföringssannolikhet förväntas. Detta bekräftas genom resultatet i studien av Mattsson (1999) där resultatet visar att fysisk aktivitet påverkar föroreningars spridning i rummet.

5.3 Resultatdiskussion, deplacerande ventilation

Figur 22 visar att överföringssannolikheten vid deplacerande ventilation minskar vid första mätningen i jämförelse med omblandande då smittkällan placeras närmare frånluftsdonet och att överföringssannolikheten ökar om smittkällan är placerad nära tilluftsdonet. En anledning till detta resultat är att överföringssannolikheten ökar då smittkällan placeras nära tilluftsdonet eftersom den nya luften från ventilationen rör sig förbi den smittade personen till att börja med för att sedan sprida sig till övriga personer i rummet. Att överföringssannolikheten minskar då smittkällan är placerad långt ifrån tilluftsdonet vid mätning av deplacerande ventilation med högre inblåsningstemperatur är något som också bekräftas av studien genomförd av Su et al. (2022) vilken nämns i avsnitt 1.2. Det som avviker är den andra mätningen för deplacerande ventilation med lägre inblåsningstemperatur vilken visar att position av smittkällan närmare frånluftsdonet ökar överföringssannolikheten snarare än att minska vilket syns i den högra nedersta bilden i Figur 22.

Då den termiska dockan Halbal är smittad är det mindre överföringssannolikhet för Jasbal som är placerad bredvid. Detta eftersom Halbal och Jasbal sitter på den sida av bordet som är vid frånluftsdonet och Halbal är den docka som är placerad närmast frånluftsdonet. Vid deplacerande ventilation är det termiska krafter som styr, alltså rör sig den förorenade luften runt Halbal sig uppåt mot taket där den dras ut genom frånluftsdonet. Att det är större överföringssannolikhet vid Stebal och Osbal enligt den nedersta bilden i Figur 22 kan förklaras med att utandningsluften från Halbal rör sig som en stråle rakt ut för att sedan avta och sjunka nedåt. Det är mycket möjligt att denna stråle börjar sjunka nedåt precis framför Osbal och Stebal för att sedan fångas upp av de termiska krafter som dessa två dockor har och sedan stiga rakt upp i deras andningszon. En alternativ förklaring till att överföringssannolikheten ökar för både Stebal och Osbal när Halbal är smittad skulle kunna vara att bordet blockerar de termiska krafterna mellan dockorna. Detta skulle innebära att Halbals luftstråle lägger sig som ett skikt på bordet när det sprids ut och fångas upp nedanför dockornas andningszon för att sedan stiga med hjälp av termiska krafter och färdas upp mot andningszonen.

Vid jämförelse av resultaten i Figur 17 och Figur 22 så syns en ökad överföringssannolikhet på båda fallen med omblandande med en överföringssannolikhet på 0,3 – 0,5 % beroende på placering vilket är mindre än överföringssannolikheten för båda fallen med deplacerande ventilationssystem som ligger mellan 0,1 – 0,3 %.

Det som är värt att notera är att tilluftstemperaturen är densamma för båda fallen vad gäller omblandande ventilationssystem men skiljer sig från fallen med deplacerande. Ena fallet med deplacerande utfördes när det var högre temperaturer utomhus och det andra fallet gjordes när det var lägre temperaturer utomhus. Detta medför att förutsättningarna inte varit densamma vare sig för deplacerande fall 1 eller 2 i jämförelse med fall 1 och 2 för omblandande då rumstemperatur och tilluftstemperatur var densamma. Trots olika förutsättningar resulterar båda fallen i deplacerande med en minskad överföringssannolikhet vilket bedöms troligt med tanke på de tidigare studier som genomförts inom ämnesområdet. Detta alltså även fast fall 1 för deplacerande har högre tilluftstemperatur och fall 2 för deplacerande har lägre tilluftstemperatur än fallen för omblandande.

De två olika tilluftstemperaturerna för deplacerande ventilation visade sig under studien inte ha någon större inverkan för överföringssannolikheten sinsemellan eftersom rummet kylades i båda fallen där dag 1 hade en mindre temperaturdifferens än dag 2. Då Halbal var smittad visade sig överföringssannolikheten vara minimalt förhöjd då tilluftstemperaturen var låg och då Stebal var smittad visade den sig också vara minimalt förminskad jämfört med fallet då inblåsningstemperaturen var hög. Detta leder till slutsatsen att de tilluftstemperaturer som vi använt oss av för deplacerande ventilation inte har någon större inverkan på överföringssannoliketen vid jämförelse mot varandra. För att inte den termiska komforten ska upplevas som dålig är det däremot viktigt att välja rätt tilluftstemperatur.

5.4 Resultatdiskussion, termisk komfort

Då den termiska komforten i rummet undersöktes togs mätvärden på relativ fuktighet, värt att notera är att den relativa fuktigheten skiljde sig åt vid användning av omblandande ventilation och deplacerande ventilation. Då deplacerande ventilation användes var relativa fuktigheten högre än då omblandande ventilation användes. Relativ fuktighet har en inverkan på smittspridning av virus och bakterier, detta bekräftas av Allen et al. (2020) samt Morris et al. (2020) vilket nämns i avsnitt 2.1. En lägre luftfuktighet kan bidra till en ökad smittspridning vilket i praktiken hade inneburit att om en studie med verkliga virus och bakterier genomförts med förhållanden med högre luftfuktighet så hade sannolikt överföringssannolikheten minskat.

Termiska komforten i rummet har under alla mätningar varit god. Detta är något som är viktigt i byggnader och lokaler där människor vistas. En låg inblåsningstemperatur på tilluften är en sak som bland annat kan orsaka dragkänsla och därmed minska den termiska komforten, detta är något som är viktigt att ha i åtanke då man försöker minimera smittspridningen. Samma sak gäller för många andra parametrar för inomhusklimat som bland annat luftflöde, lufthastighet och den relativa luftfuktigheten.

Den termiska komforten i rummet är i enlighet med AFS 2021:1 paragraf 124 då inomhustemperaturen var omkring 25°C. Mätningarna genomfördes under april månad och utomhustemperaturerna varierade mellan 3–16°C, detta gör att inomhustemperaturen var cirka 1°C högre än vad Arbetsmiljöverket menar att den max bör vara på arbetslokaler vintertid, men inom spannet för temperaturen under sommartid då stillasittande arbete utförs. Detta bedöms som en rimlig inomhustemperatur eftersom mätningar genomfördes i samband med övergång mot sommartid och den termiska komforten är god i rummet även om inomhustemperaturen är mot det varmare hållet. Valt tilluftsflöde till lokalen är i enlighet med BFS 1998:38 avsnitt 6:232.

5.5 Metoddiskussion

Arbetets metod bedöms vara i god validitet och reliabilitet, detta då instrument kalibrerades innan experimentets start och att koldioxidmätaren kalibrerades både innan och efter användning för ökad validitet. Dessutom genomfördes mätningar flertal gånger för att säkerställa goda mätvärden. Om någon parameter som till exempel operativ temperatur inte var den önskade temperaturen genomfördes mätningar igen. Detta gjorde att vi fick en stor säkerhet på hur instrumenten skulle användas samt en säkerhet i att de resultat som studien genererade var korrekta.

Användningen av spårgas bedöms vara bra då aerosoler av coronavirus är mindre än $5\mu\text{m}$ vilket nämns i litteraturstudien under avsnitt 1.2 enligt Elsaid et al. (2021). Vidare visade studien av Bivolarova et al. (2017) att spårgasmetoden är möjlig att tillämpa för partiklar mindre än $5\mu\text{m}$.

Svagheter som kan ha påverkat studiens resultat är att det läckte ut en andel luft från springor runt dörren i försöksrummet. Detta uppdagades genom att vi vistades i rummet då ingen belysning var tänd och såg att det var ljus som kom in i rummet runt dörrkarmen. En annan svaghet är att studien genomfördes i en labbhall och testrummet var lokaliserat centralt i hallen vilken innebar att ventilationssystemet var svagt för fluktuationer i byggnaden som till exempel när portar öppnades eller då många personer rörde sig i labbhallen. Påverkan från omgivningen minimerades genom att mätningar avbröts då stor påverkan visades på resultatet.

Figur 13 och Figur 19 visar de lufthastigheter som mättes upp med anemometrar under studien. Att lufthastigheterna är relativt lika för omblandande ventilationssystem som kan ses i Figur 13, är positivt då det innebär att korrekt omblandning uppnåtts, vad gäller deplacerande ventilation visade lufthastigheterna vara högre vid golvnivå och avta med höjden, vilket också visar att deplacerande ventilation uppnåtts. I Figur 13 visas större fluktuationer på höjden 1,1 m över golvet för både vertikal-, och horisontell riktning på tilluftsstrålen och i Figur 12 kan man se att samma position har lägre lufttemperatur än resterande punkter. Att det resultatet skiljer sig från resterande punkter har att göra med att position 5 på höjden 1,1 m över golvet är placerad precis under tilluftsdonet. Vidare i Figur 19 visas större fluktuationer på höjden 0,1 m, av samma anledning som tidigare är punkt 7 på höjden 0,1 m över golvet placerad närmast tilluftsdonet. Att punkt 5 på höjden 1,1 m för omblandande ventilation och punkt 7 på höjden 0,1 för deplacerande avviker är rimligt i och med placeringen nära tilluftsdonen.

Det är viktigt att ha i åtanke att respektive ventilationssystem möjligtvis lämpar sig bättre i olika utrymmen med olika geometrier. Det kan av den anledningen vara svårt att bestämt uttrycka att deplacerande ventilationssystem lämpar sig bäst i alla lägen. Förslagsvis hade det varit bra att utforska ventilationssystemen för flera utrymmen med olika geometrier för att kunna argumentera för och styrka att deplacerande ventilation lämpar sig bäst ut smittspridningens synpunkt.

6 Slutsatser

Utifrån tidigare studier inom ämnet och resultatet från denna studie presenteras slutsatser under detta kapitel. Avsnitt 6.2 ger förslag på vidare studier inom området och avsnitt 6.3 sätter denna studie i ett större perspektiv för att knyta ämnet till hållbar utveckling och energisystem i stort.

6.1 Resultat av studien

Utifrån denna studies resultat kan slutsatsen dras att deplacerande ventilation är att föredra framför omblandande ventilation för att minimera överföringssannolikheten mellan en smittad person och en frisk person och därigenom minska smittspridningen av luftburna virus och bakterier. Vid användning av deplacerande ventilation ges det bästa resultatet då smittkällan placeras nära frånluftsdonet för att minimera överföringssannolikheten. I de fall där omblandande ventilation används har tilluftsstrålens riktning en inverkan på överföringssannolikheten och vid användning av vertikal riktning är det en förhöjd överföringssannolikhet för en person som är placerad bredvid smittkällan.

6.2 Utveckling

Vid vidare studier skulle alternativa luftflöden kunna studeras för att undersöka luftflödets inverkan på resultatet. Vidare skulle smittkällan kunna flyttas runt ytterligare i rummet för att undersöka vilken skillnad större respektive mindre avstånd har på smittspridningen.

För ytterligare utveckling kan fler olika ventilationssystem samt ventilationsprinciper tas med i vidare studier och flera olika tilluftsdon för både omblandande och deplacerande kan studeras. Detta kan undersöka om storlek och form på tilluftsdonet påverkar resultatet. Ett ventilationssystem som skulle vara intressant att studera vidare är personlig ventilation vilket visat sig vara positivt utifrån resultat från litteraturstudien. Vidare skulle även kombinationen av personlig-, och deplacerande ventilation vara intressant att titta vidare på för att se huruvida effektiviteten ökar respektive minskar.

En annan alternativ studie som skulle kunna göras är att reproducera samma studie en gång till men att i stället för att göra en experimentell uppställning göra om studien med hjälp av simuleringar i CFD för att sedan jämföra resultaten i de båda studierna mot varandra. Det skulle också vara intressant att simulera hostningar och nysningar för att efterlikna verkligheten, där även rörelser i rummet, som exempelvis då människor går in och ut från rummet som i sin tur avger värmeenergi men som också framkallar icke stationära förhållanden.

Utöver detta skulle det vara av intresse att studera sambandet av smittspridning och ventilation ur en byggnadsfysikalisk synvinkel där bland annat byggnadens utformning och skorstenseffekten tas i hänsyn liksom studien av Wang et al. (2022) där avloppssystemets inverkan på smittspridningen studerades.

6.3 Perspektiv

Ventilation är viktigt i byggnader och lokaler, tack vare god ventilation kan ett bra inomhusklimat uppnås för byggnadens brukare och dessutom kan ett bra inomhusklimat vara bra för själva byggnaden för att undvika att skada sker och för att öka livslängden. Detta examensarbete har haft i fokus att studera överföringssannolikhet med två olika ventilationssystem för att kunna dra slutsatser kring de olika ventilationssystemens påverkan på smittspridning av virus och bakterier. Detta kan kopplas vidare till luftkvalitet i lokaler och byggnader och användas för att bidra till en god inomhusmiljö.

Agenda 2030 för hållbar utveckling är ett gemensamt mål för alla länder som är medlem i FN. Målet avser tre kategorier gällande hållbar utveckling vilka är miljö, social och ekonomisk. Agendan innefattar 17 mål som i sin tur består av delmål, dessa mål ska uppnås innan 2030 (Globala målen 2023). Mål 3 behandlar god hälsa och välbefinnande och består av flera delmål där två av dessa är direkt kopplade till detta examensarbete. Dessa mål är 3.3 och 3.D vilka står för bekämpning av smittsamma sjukdomar respektive förbättring av tidigare varningssystem för globala hälsorisker (Globala målen 2022a).

Mål 7 handlar om hållbar energi för alla vilket innebär att alla människor ska ha tillgång till energi som producerats på ett hållbart sätt (Globala målen 2022b). Detta kan kopplas samman med denna studie då ventilation är en faktor som drar energi i hushåll och lokaler. Då energi är en begränsad produkt som kan vara svår att lagra är det viktigt att hushålla på världens energi. Dessutom är det viktigt att ta hänsyn till på vilket sätt den energi som används har framställts. Av denna anledning är det viktigt att ta hänsyn till hur energieffektiv ventilationen är, framför allt då befintlig ventilation ska bytas ut eller ett ventilationssystem ska dimensioneras för en byggnad.

Det är viktigt att hitta en balans mellan att energieffektivisera nya-, och befintliga ventilationssystem utan att försämra luftkvaliteten. Detta eftersom försämrade luftkvalité i sig bidrar till att smittspridning av sjukdomar ökar vilket i sin tur medför att människor blir sjuka av den inomhusmiljö som de vistas i.

Referenser

- 1177 (2019). *Så fungerar luftvägar och lungor*. 1177. <http://www.1177.se/liv--halsa/sa-fungerar-kroppen/luftvagar-och-lungor/> [2023-04-18].
- Allen, J. G., Iwasaki, A. & Marr, L. C. (2020). Opinion | This winter, fight covid-19 with humidity. *Washington Post*, 19 november 2020.
- Anuraghava, C., Abhiram, K., Reddy, V. N. S. & Rajan, H. (2021). CFD modelling of airborne virus diffusion characteristics in a negative pressure room with mixed mode ventilation. *International Journal for Simulation & Multidisciplinary Design Optimization*, 12 1–8. doi:10.1051/smdo/2021001.
- Arbetsmiljöverket (2020). AFS 2020:1 Arbetsplatsens utformning.
- Arbetsmiljöverket (2022a). *Smittspridning och ventilation - Arbetsmiljöverket*. <https://www.av.se/inomhusmiljo/luft-och-ventilation/smittspridning-och-ventilation/> [2023-03-2].
- Arbetsmiljöverket (2022b). *Luft och ventilation - Arbetsmiljöverket*. <https://www.av.se/inomhusmiljo/luft-och-ventilation/> [2023-04-4].
- Arvelo, I., Pagone, F., Persky, J., Carpio, C. E., Arnold, P. & Clements, N. (2022). Decay rates of two tracer gases compared to DNA-tagged liquid aerosol tracer particles: Impact of varying dilution rate and filtration. *Building and Environment*, 212 108819. doi:10.1016/j.buildenv.2022.108819.
- BFS 1998:38 (1998). *BOVERKETS FÖRFATTNINGSSAMLING*.
- Bivolarova, M. (1), Melikov, A. (1), Ondráček, J. (2) & Ždímal, V. (2) (2017). A comparison between tracer gas and aerosol particles distribution indoors: The impact of ventilation rate, interaction of airflows, and presence of objects. *Indoor Air*, 27(6), 1201–1212. doi:10.1111/ina.12388.
- Boverket (2018). *Boverkets byggregler, BBR, BFS 2011:6 med ändringar till och med 2018:4 (BBR 26)*. Karlskrona. No. 978-91-7563-581–1.
- Cengel, Y. & Cimbala, J. (2019). *FLUID MECHANICS: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS*. McGraw-Hill Education (Asia).
- Cui, S., Cohen, M., Stabat, P. & Marchio, D. (2015). CO2 tracer gas concentration decay method for measuring air change rate. *Building and Environment*, 84 162–169. doi:10.1016/j.buildenv.2014.11.007.

- Elsaid, A. M., Mohamed, H. A., Abdelaziz, G. B. & Ahmed, M. S. (2021). A critical review of heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) systems within the context of a global SARS-CoV-2 epidemic. *Process Safety and Environmental Protection*, 155 230–261. doi:10.1016/j.psep.2021.09.021.
- Fan, M., Fu, Z., Wang, J., Wang, Z., Suo, H., Kong, X. & Li, H. (2022). A review of different ventilation modes on thermal comfort, air quality and virus spread control. *Building and Environment*, 212 108831. doi:10.1016/j.buildenv.2022.108831.
- Folkhälsomyndigheten (2021). *Hur har folkhälsan påverkats av covid-19-pandemin?* No. 21022.
- Folkhälsomyndigheten (2022). *Om viruset och sjukdomen — Folkhälsomyndigheten*. <https://www.folkhalsomyndigheten.se/smittskydd-beredskap/utbrott/aktuella-utbrott/covid-19/om-sjukdomen-och-smittspridning/om-viruset-och-sjukdomen/> [2023-02-27].
- Globala målen (2022a). *Mål 3: God hälsa och välbefinnande*. Globala målen. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-3-halsa-och-valbefinnande/> [2023-04-10].
- Globala målen (2022b). *Mål 7: Hållbar energi för alla*. Globala målen. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/mal-7-hallbar-energi-alla/> [2023-04-10].
- Globala målen (2023). *Globala målen – Läs om Globala målen – 17 mål för hållbar utveckling*. Globala målen. <https://www.globalamalen.se/om-globala-malen/> [2023-04-10].
- Harrison, J., Saccente-Kennedy, B., Orton, C. M., McCarthy, L. P., Archer, J., Symons, H. E., Szczepanska, A., Watson, N. A., Browne, W. J., Moseley, B., Philip, K. E. J., Hull, J. H., Calder, J. D., Costello, D., Shah, P. L., Epstein, R., Reid, J. P. & Bzdek, B. R. (2023). Emission rates, size distributions, and generation mechanism of oral respiratory droplets. *Aerosol Science and Technology*, 57(3), 187–199. doi:10.1080/02786826.2022.2158778.
- Hu, H. H. (2012). Chapter 10 - Computational Fluid Dynamics. I Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (red.). *Fluid Mechanics (Fifth Edition)*. Boston: Academic Press, ss.421–472.
- Izadyar, N. & Miller, W. (2022). Ventilation strategies and design impacts on indoor airborne transmission: A review. *Building and Environment*, 218 109158. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109158.

Li, Y., Qian, H., Hang, J., Chen, X., Cheng, P., Ling, H., Wang, S., Liang, P., Li, J., Xiao, S., Wei, J., Liu, L., Cowling, B. J. & Kang, M. (2021). Probable airborne transmission of SARS-CoV-2 in a poorly ventilated restaurant. *Building and Environment*, 196 107788. doi:10.1016/j.buildenv.2021.107788.

Lindab Ventilation A/S (2023). Lindab FKD Flerkonspriadare.

Lipinski, T., Ahmad, D., Serey, N. & Jouhara, H. (2020). Review of ventilation strategies to reduce the risk of disease transmission in high occupancy buildings. *International Journal of Thermofluids*, 7–8 100045. doi:10.1016/j.ijft.2020.100045.

Mattsson M. 1999. *On the efficiency of displacement ventilation – with particular reference to the influence of physical activity*. Ph.D. thesis. Royal Institute of Technology, KTH Built environment, Stockholm. ISBN 91-628-3674-9. Available at University of Gävle.

Manas, C., Raju, P. L. N., Kumar, K. N. B. & Rajan, H. (2022). Impact of human–human virus transmission in an air-conditioned room with proper ventilation system. *International Journal for Simulation and Multidisciplinary Design Optimization*, 13 22. doi:10.1051/smdo/2022013.

Morawska, L., Tang, J. W., Bahnfleth, W., Bluysen, P. M., Boerstra, A., Buonanno, G., Cao, J., Dancer, S., Floto, A., Franchimon, F., Haworth, C., Hogeling, J., Isaxon, C., Jimenez, J. L., Kurnitski, J., Li, Y., Loomans, M., Marks, G., Marr, L. C., Mazzarella, L., Melikov, A. K., Miller, S., Milton, D. K., Nazaroff, W., Nielsen, P. V., Noakes, C., Peccia, J., Querol, X., Sekhar, C., Seppänen, O., Tanabe, S., Tellier, R., Tham, K. W., Wargocki, P., Wierzbicka, A. & Yao, M. (2020). How can airborne transmission of COVID-19 indoors be minimised? *Environment International*, 142 105832. doi:10.1016/j.envint.2020.105832.

Morris, D. H., Yinda, K. C., Gamble, A., Rossine, F. W., Huang, Q., Bushmaker, T., Fischer, R. J., Matson, M. J., Doremalen, N. van, Vikesland, P. J., Marr, L. C., Munster, V. J. & Lloyd-Smith, J. O. (2020). The effect of temperature and humidity on the stability of SARS-CoV-2 and other enveloped viruses.

Osman, O., Madi, M., Ntantis, E. L. & Kabalan, K. Y. (2022). Displacement ventilation to avoid COVID-19 transmission through offices. *Computational Particle Mechanics*, doi:10.1007/s40571-022-00492-8.

Su, W., Yang, B., Melikov, A., Liang, C., Lu, Y., Wang, F., Li, A., Lin, Z., Li, X., Cao, G. & Kosonen, R. (2022). Infection probability under different air distribution patterns. *Building and Environment*, 207 108555. doi:10.1016/j.buildenv.2021.108555.

- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T. & Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. git.
- Vlachokostas, A., Burns, C. A., Salsbury, T. I., Daniel, R. C., James, D. P., Flaherty, J. E., Wang, N., Underhill, R. M., Kulkarni, G. & Pease, L. F. (2022). Experimental evaluation of respiratory droplet spread to rooms connected by a central ventilation system. *Indoor Air*, 32(1), 1–10. doi:10.1111/ina.12940.
- Wang, Q., Li, Y., Lung, D. C., Chan, P.-T., Dung, C.-H., Jia, W., Miao, T., Huang, J., Chen, W., Wang, Z., Leung, K.-M., Lin, Z., Wong, D., Tse, H., Wong, S. C. Y., Choi, G. K.-Y., Lam, J. Y.-W., To, K. K.-W., Cheng, V. C.-C. & Yuen, K.-Y. (2022). Aerosol transmission of SARS-CoV-2 due to the chimney effect in two high-rise housing drainage stacks. *Journal of Hazardous Materials*, 421 126799. doi:10.1016/j.jhazmat.2021.126799.
- Warfvinge, C. & Dahlblom, M. (2010). *Projektering av VVS-installationer*. 1:19. Lund: Studentlitteratur.
- WHO (2021). *Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19*. <https://www.who.int/publications-detail-redirect/9789240021280> [2023-04-9].
- WHO (2023a). *Coronavirus*. https://www.who.int/health-topics/coronavirus#tab=tab_1 [2023-02-27].
- WHO (2023b). *WHO Coronavirus (COVID-19) Dashboard*. <https://covid19.who.int> [2023-02-27].
- Yang, B., Melikov, A. K., Kabanshi, A., Zhang, C., Bauman, F. S., Cao, G., Awbi, H., Wigö, H., Niu, J., Cheong, K. W. D., Tham, K. W., Sandberg, M., Nielsen, P. V., Kosonen, R., Yao, R., Kato, S., Sekhar, S. C., Schiavon, S., Karimipannah, T., Li, X. & Lin, Z. (2019). A review of advanced air distribution methods - theory, practice, limitations and solutions. *Energy and Buildings*, 202 109359. doi:10.1016/j.enbuild.2019.109359.
- Zhang, Y., Feng, G., Bi, Y., Cai, Y., Zhang, Z. & Cao, G. (2019). Distribution of droplet aerosols generated by mouth coughing and nose breathing in an air-conditioned room. *Sustainable Cities and Society*, 51 101721. doi:10.1016/j.scs.2019.101721.