

# Ventilationseffektivitet i kontorsmiljö

- En jämförelse av deplacerande och omblandande ventilation ur termisk komfort.



LUNDS  
UNIVERSITET

Lunds Tekniska Högskola

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Avdelningen för installationsteknik

Examensarbete:  
Alexander Erlandsson  
Carl-Johan Glyré



© Copyright Alexander Erlandsson, Carl-Johan Glyré

LTH Ingenjörshögskolan vid Campus Helsingborg  
Lunds universitet  
Box 882  
251 08 Helsingborg

LTH School of Engineering  
Lund University  
Box 882  
SE-251 08 Helsingborg  
Sweden

Tryckt i Sverige  
Media-Tryck  
Biblioteksdirektionen  
Lunds universitet  
Lund 2014

## Sammanfattning

Idag ligger ett större fokus än tidigare på energianvändningen i samband med nyuppförande av byggnader. Detta beror främst på noggrannare föreskrifter och högre energiklassningskrav. Med detta fokus visar undersökningar på, att kylning, som sker maskinellt, i kontorsutrymmen, medför stor energiförbrukning och höga driftskostnader. Därför är det intressant att undersöka om kylning endast med ventilationsluft kan nå jämförbara resultat. Om undersökningen sedan kan ge svar på att en viss ventilationsprincip är att föredra framför andra kan det leda till viktiga slutsatser rörande termisk komfort och energianvändning.

Denna studie inriktar sig på att utföra praktiska mätningar som kan ge svar på vilken av de två ventilationsprinciperna, deplacerande ventilation och omblandande ventilation, som är lämpligast att använda i ett typkontor en vår- eller höstdag med för årstiden normalt klimat. Studien bygger på två tidigare undersökningar som behandlar ämnet och problemställningen.

Mätningar gjordes med tre olika tilluftsdon: två deplacerande ventilationsdon och ett omblandande ventilationsdon. Inför mätningarna utformades ett typkontor och två försök gjordes för respektive ventilationsutförande. Medan försöken gjordes, hölls tilluftsmängden och tilluftstemperaturen konstanta. Denna studie skiljer sig främst från föregående försök genom att vi nu hade ett för ändamålet reserverat bättre anpassat försöksrum samt att varierande värmebelastning används i större grad.

Resultaten visar att samtliga tilluftsdon uppnådde tillfredsställande termiska förhållanden med en del inbördes avvikelser.

Båda deplacerande tilluftsdonen bidrog med en lägre lufttemperatur i vistelsezonen för sittande personer än vid användning av det omblandande ventilationsdonet. De uppmätta värdena för försöken med deplacerande ventilation ligger upp mot 1,2 °C lägre temperatur än värdena vid motsvarande försök med omblandande ventilation. Försöken ger relativt tydliga resultat som påverkar energiförbrukningen för kylning. Resultaten indikerar på att deplacerande ventilation behöver mindre kylenergi än omblandande ventilation för att uppnå samma ställda krav på termisk komfort.

I tidigare undersökningar i ämnet har energiberäkningar kunnat visa på stora besparingar endast genom att höja tilluftstemperaturen i ett utrymme med 1-2 °C. Deplacerande ventilation kan därmed ha en högre tilluftstemperatur och därmed minska energiförbrukningen vid kylning av utomhusluften samtidigt som den termiska komforten upprätthålls.

Nyckelord: Deplacerande ventilation, omblandande ventilation, temperaturverkningsgrad, ventilationseffektivitet, variabel värmelast, tilluft, frånluft.

## **Begreppsförklaring**

### *Temperaturverkningsgrad*

Ett mått på ett förhållande mellan temperaturerna som råder vid tilluften, andningszonen och frånluften.

### *Ventilationseffektivitet*

Ett mått på hur effektivt föroreningar transporteras bort och beräknas genom förhållandet mellan partikelnivån i tilluften, frånluften och andningszonen.

### *Deplacerande ventilation*

Ventilationsprincip där tilluften har en låg temperatur och dras mot varma källor, där luften sedan stiger med varma luftströmmar, uppkomna av värmekällorna. Denna luft kyler konvektionsströmmen och skapar ett nedre, rent skikt och ett övre, förorenat skikt.

### *Omblandande ventilation*

Ventilationsprincip som går ut på att uppnå maximal omblandning utan drag i vistelsezonen så att de termiska förhållandena och den slutliga föroreningskoncentrationen jämnas ut.

### *Transmissionsförluster*

Värmeförluster som läcker ut via väggar, fönster, tak och golv.

### *Ventilationsförluster*

Värme som leds ut via ventilationssystemet.

### *Värmelast*

De enheter som ger värme och bidrar till att konvektionsströmmar uppstår i försöksrummet. Exempel: människor och datorutrustning.

### *Temperaturgradient*

Temperaturskillnaden i höjddled, intressant att undersöka i samband med deplacerande ventilationssystem.

### *Konvektionsströmmar*

Uppstår när luft kommer i kontakt med en värmekälla, blir uppvärmd av denna och stiger.

### *U-värde*

Beskriver värmtransporten genom ett material. Ju bättre isoleringsförmåga ett material har desto lägre U-värde. Enheten är  $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$ .

## Abstract

Today there is a high focus on the energy use when constructing new buildings. This mainly depends on the increased regulations and energy classifications that have been issued. Because of this, studies have shown that mechanical cooling in office environments leads to high energy consumption and service costs. This has led to an increased interest in analyzing if cooling only through ventilation air can reach comparable results. If the analysis could lead to answers where a certain ventilation principle is to prefer to another, this could lead to important conclusions concerning thermal comfort and energy use.

This study focuses on performing practical measurements that could tell which of the following ventilation principles, displacement ventilation and mixing ventilation, is most suitable to use in a typical office on a day with medium climate values. The study is based on two earlier investigations regarding the subject and problem.

Measurements were made with three different air supplies, two displacement ventilation air supplies and one mixing ventilation air supply. Before the measurements were made a typical office was set up and two measurements of each of the ventilation air supplies were made. During the measurements the ventilation air supply amount and the ventilation air supply temperature were hold constant. This study is mainly distinguished from the other through a better adapted test room and a higher use of varying heat load.

The results show that all of the ventilation air supplies reached satisfying thermal conditions with some differences between them. Both displacement ventilation supplies led to a lower air temperature in the zone where people are expected to be than using the mixing ventilation supply. The measured values regarding the experiments with displacement ventilation is found up to 1,2 °C lower than the temperature on corresponding experiments made with mixing ventilation. The experiments show relatively distinct results which affects the energy consumption for cooling. The results indicate that displacement ventilation needs less cooling energy than mixing ventilation to reach the same demands on thermal comfort.

In earlier investigations in the subject energy calculations have shown a high saving potential only by increasing the supply air temperature in a room by 1-2 °C. Therefore, displacement ventilation could have a higher supply air temperature thus lowering the energy consumption for cooling the outdoor air while reaching thermal comfort.

Keywords: Displacement ventilation, mixing ventilation, temperature efficiency, ventilation efficiency, varying heat load, supply air, extract air.



## Förord

Detta examensarbete, vid högskoleingenjörsprogrammet byggteknik med arkitektur, har genomförts vid avdelningen för installationsteknik i samarbete med AirSon Engineering i Ängelholm.

Vi vill gärna tacka Dennis Johansson, vår handledare på Avdelningen för Installationsteknik, LTH. Du har utan att tveka hjälpt oss med utförliga svar på frågor som har dykt upp. Du har även kommit med goda förslag till förbättring och nya tankar som berikar vårt arbete.

Vi vill även tacka Dan och Jan Kristensson på AirSon Engineering för ett varmt välkomnande och många timmars arbete med att hjälpa oss att förstå innebörden och tillvägagångssättet vid de försök som utfördes. Till detta har vi fått möjlighet att arbeta på plats hos er vilket har gett oss goda kommunikationsmöjligheter.

Vidare vill vi tacka Per Olsson, styrtekniker för kommunikationssystemet till försöksrummet, som stått till tjänst flera gånger med vägledning och programmering efter våra förutsättningar.

Ett stort tack vill vi även rikta till övriga anställda på AirSon Engineering som gjorde vår tid i Ängelholm inspirerande.

Helsingborg, maj 2015

*Alexander Erlandsson, Carl-Johan Glyré*

# Innehållsförteckning

<b>Begreppsförklaring</b> .....	<b>5</b>
<b>1 Inledning</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Bakgrund</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Syfte och målsättning</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3 Problemformulering</b> .....	<b>4</b>
<b>1.4 Metod</b> .....	<b>4</b>
<b>1.5 Avgränsningar</b> .....	<b>5</b>
<b>2 Inomhusklimatet</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Luftkvalitet</b> .....	<b>9</b>
<b>2.2 Termiskt klimat</b> .....	<b>9</b>
2.2.1 Termisk komfort .....	9
2.2.2 Upplevelsen av inomhusklimatet .....	10
2.2.3 Lufttemperatur .....	11
2.2.4 Operativ temperatur .....	11
2.2.5 Ekvivalent temperatur .....	11
2.2.6 Asymmetrisk strålning .....	11
2.2.7 Varmt och kallt golv .....	12
2.2.8 Kallras .....	12
2.2.9 Vertikal lufttemperaturgradient .....	12
2.2.10 Effektbehov och värmeförluster .....	13
<b>2.3 Luftrörelser</b> .....	<b>13</b>
2.3.1 Vistelsezon och närzon .....	14
2.3.2 Drag .....	14
2.3.3 Termiska konvektionsströmmar .....	15
2.3.3.1 <i>Termiska konvektionsströmmar i rum med termisk skiktning</i> .....	16
<b>3 Ventilationsprinciper</b> .....	<b>17</b>
<b>3.1 Ventilationseffektivitet</b> .....	<b>17</b>
<b>3.2 Omblandande ventilation</b> .....	<b>18</b>
<b>3.3 Deplacerande ventilation</b> .....	<b>20</b>
3.3.1 Undertemperaturkontrollerad laminär lufttillförsel (TLA) .....	23
3.3.2 Undersökning relaterad till deplacerande ventilation .....	23
<b>3.1 Energibesparingar</b> .....	<b>28</b>
<b>4 Försöksbeskrivning</b> .....	<b>29</b>
4.1.1 Försöksrummet .....	29
4.1.1.1 <i>Nuvarande försöksrum</i> .....	29
4.1.1.2 <i>Tidigare försöksrum</i> .....	31
<b>4.2 Värmelasterna</b> .....	<b>31</b>
4.2.1 Nuvarande mätningar .....	31

4.2.1.1	<i>Människan</i> .....	33
4.2.1.2	<i>Datorutrustning</i> .....	34
4.2.1.3	<i>Fönstersimulator</i> .....	34
4.2.1.4	<i>Belysning</i> .....	35
4.2.2	Tidigare mätningar .....	35
<b>4.3</b>	<b>Tilluftsdonen</b> .....	<b>36</b>
<b>4.4</b>	<b>Mätningar</b> .....	<b>37</b>
<b>4.5</b>	<b>Mätutrustning</b> .....	<b>39</b>
4.5.1	Nuvarande mätningar .....	39
4.5.2	Tidigare mätningar .....	40
<b>4.6</b>	<b>Försöksprocedur</b> .....	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>Resultat</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Kontroll före mätning</b> .....	<b>43</b>
<b>5.1</b>	<b>Första försöksomgången</b> .....	<b>44</b>
5.1.1	Försök 1:1 – Vertikalt deplacerande ventilation .....	44
5.1.2	Försök 1:2 – Konventionellt deplacerande ventilation .....	44
5.1.3	Försök 1:3 – Omblandande ventilation .....	45
5.1.4	Justeringar .....	45
<b>5.2</b>	<b>Andra försöksomgången</b> .....	<b>47</b>
5.2.1	Försök 2:1 – Vertikalt deplacerande ventilation .....	47
5.2.1.1	<i>Temperaturvariation</i> .....	48
5.2.1.2	<i>Temperaturverkningsgrad</i> .....	49
5.2.1.3	<i>Lufthastighet</i> .....	51
5.2.1.4	<i>Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum</i> ...	52
5.2.1.5	<i>Sammanfattning</i> .....	53
5.2.2	Försök 2:2 – Konventionellt deplacerande ventilation .....	53
5.2.2.1	<i>Temperaturvariation</i> .....	54
5.2.2.2	<i>Temperaturverkningsgrad</i> .....	55
5.2.2.3	<i>Lufthastighet</i> .....	56
5.2.2.4	<i>Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum</i> ...	57
5.2.2.5	<i>Sammanfattning</i> .....	58
5.2.3	Försök 2:3 – Omblandande ventilation .....	58
5.2.3.1	<i>Temperaturvariation</i> .....	59
5.2.3.2	<i>Temperaturverkningsgrad</i> .....	60
5.2.3.3	<i>Lufthastighet</i> .....	61
5.2.3.4	<i>Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum</i> ...	62
5.2.3.5	<i>Sammanfattning</i> .....	63
<b>5.3</b>	<b>Jämförelser mellan försöken</b> .....	<b>64</b>
<b>6</b>	<b>Diskussion</b> .....	<b>67</b>
<b>6.1</b>	<b>Deplacerande ventilation</b> .....	<b>67</b>
6.1.1	Vertikalt deplacerande ventilation .....	67
6.1.2	Konventionellt deplacerande ventilation .....	70

<b>6.2 Omblandande ventilation .....</b>	<b>71</b>
<b>6.3 Jämförelser med tidigare studier .....</b>	<b>73</b>
<b>6.4 Värmeförluster .....</b>	<b>74</b>
<b>6.5 Resultterande termisk komfort .....</b>	<b>74</b>
<b>7 Slutsats .....</b>	<b>77</b>
<b>8 Referenslista .....</b>	<b>79</b>
Tryckta källor .....	79
Elektroniska källor .....	79
Muntliga källor .....	80
<b>Bilagor .....</b>	<b>81</b>





# 1 Inledning

## 1.1 Bakgrund

En viktig faktor för att vi ska må bra och hålla oss friska är inomhusklimatet. Det styrs i hög grad av luftkvalitet och termisk komfort. För att uppnå en god luftkvalitet i en byggnad krävs bra byggnadsmaterial och en väl fungerande ventilation. Ventilationen leder bort föroreningar och fukt som avges från byggnadsmaterial och inredning samt från människor i varierande grad beroende på aktivitet. Inomhusklimatet baseras på ett utbyte av luft där filtrerad och tempererad uteluft når de områden som vi vistas i. Termisk komfort beror på förhållandet mellan temperaturen i luften och omgivande ytor och lufthastigheten. Utöver detta ska temperaturskillnaden inte var för hög vid olika höjder i rummet. (Warfvinge, 2010)

För att beskriva ventilationens verkningsgrad används begreppet ventilationseffektivitet. Detta är ett mått på hur effektivt föroreningar transporteras bort och beräknas genom förhållandet mellan partikelnivån i tilluften, frånluften och andningszonen. Ett högre tal innebär en effektivare borttransport. Beroende på ventilationsprincip leds föroreningar i rummet bort, varvid temperatur är en betydande drivkraft. Genom att undersöka temperaturförhållandena som råder i rummet för respektive ventilationssystem, kan systemets ventilationseffektivitet redovisas i form av en så kallad temperaturverkningsgrad. Temperaturverkningsgraden kan närmast beskrivas som ett förhållande mellan temperaturerna som råder i tilluften, andningszonen och frånluften. (Ref: Dan Kristensson, 2014)

En god termisk komfort innebär en bra balans mellan lufttemperatur och omgivande ytors temperatur samt låga lufthastigheter i vistelsezonen. I en kontorsmiljö avger människor och utrustning värme som bidrar till en uppvärmning av rumsluften. Denna värme måste kunna föras bort och ett kylbehov för att skapa en god termisk komfort uppstår. (Warfvinge, 2010)

Idag är det huvudsakligen två ventilationsprinciper som används i kontorslokaler, omblandande ventilation och deplacerande ventilation. Omblandande ventilation är den mest utbredda principen.

Två varianter av deplacerande ventilation finns att tillgå. Ena varianten bygger på högt placerade vertikalt deplacerande tilluftsdon. Andra varianten är av konventionell karaktär med lågt placerade (golvmonterade) deplacerande tilluftsdon. Båda går ut på att tillföra luft med en lägre temperatur som kommer in i rummet med en låg hastighet. Tilluften dras till konvektionsströmmarna från varma källor i rummet.

Omblandande ventilation går ut på att uppnå maximal omblandning utan drag i vistelsezonen så att de termiska förhållandena och den slutliga föroreningskoncentrationen jämnas ut. Båda systemen har sina fördelar och nackdelar. (Warfvinge, 2010)

I kontorsmiljöer kan lokal mekanisk kylning användas, som bidrar till att utomhusluften kyls innan den tillförs rummet. Denna kylning medför hög energianvändning och stora ekonomiska konsekvenser. Om kylning med hjälp av ventilationsluften kan effektiviseras och utomhusluftens kyla utnyttjas under en större del av året finns möjlighet till oerhört stora energibesparingar.

Även om energibehovet som krävs för att kyla temperaturen i rummet är motsvarande behovet för uppvärmning, är det däremot mer kostsamt med kyleffekt än gällande effekt för uppvärmning. (Ref: Dennis Johansson, 2014)

Inblåsningstemperaturerna för de båda systemen skiljer sig åt. För deplacerande ventilation krävs normalt inte lika låg tilluftstemperatur som för omblandande ventilation, varför behovet av mekanisk kyla begränsas till kortare perioder om året. Vidare innebär en högre tilluftstemperatur att behovet av mekanisk kyla skall beräknas utifrån en lägre temperatursänkning. Således, antas både effektbehov och drifttiden bli lägre för ett deplacerande system än för motsvarande omblandande system.

Om i stället tilluftstemperaturen är lika i de båda systemen leder detta till att vistelsezonen får en lägre temperatur med deplacerande ventilation jämfört med omblandande ventilation. Med denna slutsats antas tilluftstemperaturen kunna vara högre för deplacerande ventilation för att få samma temperatur i vistelsezonen jämfört med omblandande ventilation, som antas behöva en betydligt lägre ingångstemperatur för att få lika temperatur i vistelsezonen. (Ref: Dan kristensson, 2014)

Det finns två tidigare studier som berör ämnet ventilationseffektivitet mellan de båda ventilationsprinciperna. Dessa studier ansågs brista i både metod och kvalitet, vilket resulterade i en otillfredsställande variation.

Den första studien fick väldigt fina resultat och den andra fick betydligt sämre. En annan teknisk studie gjordes 2004 vid namn "Low energy cost and less sick leave with displacement ventilation versus mixing ventilation". Studien belyser ämnet med goda resultat. Den brister dock i sin dokumentation och mät noggrannhet och försöksrummet som testerna genomfördes i hade för stor avkylande effekt på grund av för svag isolering. I denna studie användes verklig personlast under verklig arbetstid.



Den andra studien, ”Room air distribution for comfort cooling”, ett Masterarbete från 2012, kom fram till resultat i linje med den första, men variationen dem emellan var alltför stor för att anses tillfredställande. Försöken gjordes i samma bristfälliga försöksrum, med den stora skillnaden att man använde sig av simulerade värmelaster i kontinuerlig drift. Det senare antas innebära alltför stora skillnader mot verklig drift för att kunna dra tillämpliga slutsatser av resultaten. Det bristfälligt isolerade försöksrummet bidrog negativt med en alltför stor avkylande effekt, vilket fick stor felmarginal som följd.

Examensarbetet kommer att relatera till och i möjligaste mån upprepa tillämpliga delar av de båda tidigare studierna, samt optimera mätmetoden från dessa och utvärdera temperaturverkningsgraden. De viktigaste skillnaderna består i ett helt nytt bättre anpassat och isolerat försöksrum, samt variabla värmelaster mer likt verkliga förhållanden.

Eftersom en högre temperaturverkningsgrad inte får uppnås på bekostnad av upplevd komfort, kompletteras utvärderingen med en undersökning av resulterande lufthastigheter.

## **1.2 Syfte och målsättning**

Syftet med studien är att jämföra två ventilationsprinciper, deplacerande ventilation och omblandande ventilation, med hänsyn tagen till temperaturverkningsgrad som mått på ventilationseffektivitet.

Jämförelsen ska ge svar på hur kylenergin och därmed driftskostnaden kan minskas genom deplacerande ventilation, samt om skillnader mellan de deplacerande donen kan urskiljas. Resultaten ska sedan jämföras med två studier inom samma område som tidigare utförts.

För att undersöka den totala ventilationseffektiviteten mellan de två ventilationsprinciperna bör ett antal olika parametrar beaktas och jämföras. De parametrar som främst bör undersökas är partikelnivåkoncentration, koldioxidhalt och temperaturverkningsgrad. En hög ventilationseffektivitet ger, som tidigare nämnts, en lägre energiförbrukning och minskade kostnader. Om även lufthastighet och relativ fuktighet mäts på motsvarande punkter, kan det säkerställas, att även upplevd komfort blir tillfredsställande. Tillsammans kan detta visa vilket ventilationsdon som ger mest gynnsamt inomhusklimat.

Målsättningen är att visa att deplacerande ventilation kan hålla en gynnsammare termisk komfort med en högre tilluftstemperatur än för omblandande ventilation. De deplacerande donen ska sedan jämföras avseende samma parametrar.

Därmed kan slutsatser dras gällande minskad kyleffekt, kylenergi samt minskad drifttid och driftskostnad. Detta ska undersökas vid en typisk kylsituation för ett typkontor avsett för en person under en medeldag på året beträffande utomhusklimat och vardagssituation.

Den upplevda komforten säkerhetsställs genom mätning av resulterande lufthastigheter som kan ge drag.

### **1.3 Problemformulering**

Examensarbetet kommer, efter temperaturmätning och resonemang kring resulterande lufthastighet med rådande förutsättningar, att sträva efter att ge svar på frågan vilken ventilationsprincip och i synnerhet vilket ventilationsdon som ger störst termisk komfort.

### **1.4 Metod**

Undersökningen görs på tre ventilationslösningar med varierande tilluftsdon;

- En omblandande ventilationslösning med användning av ett tilluftsdon med dysor i taket.
- En deplacerande ventilationslösning med ett konventionellt tilluftsdon vid golvnivå.
- En deplacerande ventilationslösning med vertikalt tilluftsdon på vägg vid taknivå.

Tilluftstemperaturen och tilluftsfloppet ska hållas konstant under mätningarna. Undersökningen av de tre ventilationslösningarna kommer att ske i ett uppbyggt försöksrum, som ska motsvara ett typkontor avsett för en person. Försöksrummet är omslutet av ett annat rum, i vilket samtliga ytor är klädda med 150 mm polystyrenplast för minimering av värmelagring och värmetransmission från omgivande utrymmen.

Försöken går ut på att mäta det termiska klimatet, med hjälp av givare som mäter lufttemperatur. Givarna placeras vid golvnivå och vid andningszon för sittande samt stående person. Utöver dessa placeras givare vid till- och frånluftsdonet. Dessa placeras för undersökningen längs mittdelen av rummet

på mätstänger med ett lämpligt avstånd emellan. Lufttemperaturen kommer senare att analyseras som ett mått av verkningsgrad, skillnaden mellan tilluft, andningszon och frånluft över mätperioden.

Vidare kommer lufthastigheten att mätas för att säkerställa upplevd komfort. Denna undersöks vid golvnivån och vid höjden för en sittande person, jämsides med temperaturgivarna. Lufthastigheterna kommer att jämföras med arbetsmiljöverkets kriterier för när drag uppstår. De försäkrar att kraven på upplevd komfort uppfylls.

För att urskilja strömningsbilden för de olika systemen, kommer denna att verifieras med rök inne i försöksrummet. Därmed kan luftrörelserna följas, vilket leder till att resonemang lättare kan föras kring deras beteende.

Slutligen kommer uppmätta värden och gjorda uträkningar att jämföras, analyseras och diskuteras.

Försöksrummet utrustas med simulatorer motsvarande en verklig person i sittande arbete, datorutrustning, panel motsvarande solinstrålning genom ett fönster med avskärmning samt verklig lysrörsarmatur. Solinstrålningen kommer att vara baserad på en kurva över dygnet motsvarande en medeldag på året.

Värmekällorna i rummet utgörs därmed av

- En cylinder med diameter på 32 cm med 100 W glödlampa
- Två cylindrar med en diameter på 20 cm samt två glödlampor på 52 W vardera.
- Två sammantejpade gipsskivor på 2,35 meters längd och 90 cm höjd med en värmeslinga innanför på maximalt 155 W.
- En lysrörsarmatur på 72 W

## **1.5 Avgränsningar**

Examensarbetet fokuserar på temperaturverkningsgrad och upplevd komfort med hänsyn till lufthastighet. Andra parametrar som partikelnivåkoncentration, koldioxidhalt, luftkvalitet, akustik, fukt, energianvändning samt miljömässiga och ekonomiska konsekvenser ligger utanför examensarbetet. Dessa bör undersökas i framtida studie för att ge en helhetsbild av vilket system som resulterar och skapar det mest optimala inomhusklimatet och störst ventilationseffektivitet i ett kontor med hänsyn till alla parametrar.

Mätning av lufthastigheten utfördes varken vid höjden för stående person eller i till- och frånluft. Denna avgränsning gjordes på grund av brist på tid och antal givare. Därför gjordes en avvägning utifrån vad som är angeläget att undersöka med examensarbetet. Eftersom en person i ett kontor i huvudsak är sittande, valdes sittande position för undersökningen. Att undersöka lufthastigheten i rummet även i djupled utöver mätning i längdled, exempelvis genom parallell mätning i djupled, hade även gett en större bekräftelse på vad det kan finnas drag och därmed bristande upplevd komfort. Även detta avgränsades på grund av brist på tid och antal givare.

Påverkande faktorer som inte har studerats är till exempel öppnandet av kontorsrummets fönster och öppnandet av dörr in till rummet. Sådana studier har bedömts alltför tidskrävande och ryms inte i arbetet. Alla beräkningar som är utförda är jämviktsberäkningar.

Personsimulatorn går på tidsinställt schema och har en viss eftervärme då denna simuleras att ”lämna rummet” under exempelvis lunch eller fikaraster, vilket inte sker i verkligheten. Simulatorn kyls trots det av relativt fort och bör inte anses orsaka avsevärd påverkan för mätningarna.

Simulatorn som motsvarar datorutrustningen är inte schemalagd för viloläge eller dylikt, vilket påverkar effekten avsevärt. Det förväntas att pauserna är så korta att det ska vara rimligt att anta att sådana inställningar inte tillämpas i kontorsmiljö.

Ventilationssystemet som används i försöken är inte behovsstyrt utan har samma flöde över hela dygnet.

I undersökningen kommer endast ventilationseffektiviteten i rummet enligt ventilationsprinciperna att undersökas och testas. Dessa är inte kopplade till något värmeåtervinnande system, som exempelvis ett FTX-system.

Beräkning av konvektionsströmmarna kommer inte att ske, eftersom beräkningarna blir för avancerade med hänsyn till den varierande värmebelastning som kommer att användas.

Inget beaktande av nedkylning (kallras) från fönstersimulatorn sker, eftersom det förväntas att uppvärmning i huvudsak sker från fönsterrutan.

Eftersom temperaturavvikelseerna innanför och utanför försöksrummet kontrolleras enligt ett strikt bestämt gränsvärde, samt att försöksrummets U-värde beräknas vara mycket lågt, förutsätts därför att all värmeavgivning från

försöksrummet leds ut genom frånluften. Därmed beaktas inte beräkningar av ventilationsförluster och transmissionsförluster.

Det undersöks inte med samtliga värmelaster avaktiverade eller aktiverade på full effekt över ett dygn. Resultatet hade varit av intresse genom att utvärdera den varierande värmebelastningens inverkan på rummet utan att andra faktorer påverkar, såsom eventuella värmeförluster. Det hade bidragit till ett mer tillförlitligt resultat.



## **2 Inomhusklimatet**

Klimatet är en viktig del i den dagliga kontorstillvaron. Vi avger värme, liksom det tekniska utrustning runtomkring oss. En effektiv komfortventilation blir därför en viktig parameter för en effektiv och behaglig arbetsmiljö. I ett oventilerat kontor stiger värmen till taket. Om denna uppvärmda luft inte evakueras och klimatskalet i övrigt är adiabatiskt (d v s saknar avkylande effekt) värms luften i rummet till en hälsovidrig nivå. (Endal Rognes, 2012) (Ref: Dan Kristensson, 2014)

### **2.1 Luftkvalitet**

Föroreningar som påträffas inomhus påverkar luftkvaliteten negativt. Luftkvaliteten förvärras av emissioner från byggnadsmaterial, fukt, lukt, inredning och människor, i varierande grad beroende på aktivitet. Det bör därför vara av stor vikt att sådana föroreningar ventileras bort. Beroende på hur hög föroreningshalten som ska evakueras är, bör ventilationsflödet avgöras därefter. (Warfvinge, 1996). Numera är det dock oftast behovet av komfortkyla som bestämmer storleken på ventilationsflödet. Föroreningarnas spridning i rummet beror bland annat på de förorenande partiklarnas egenskaper, men även temperaturförhållandet mellan tilluft och rumsluft, hur placeringen av don och värmekällor sker, egenskaper hos tilluftsdon och impulsen i tilluftströmningen påverkar spridningen av föroreningar. Det finns inte någon självklar koppling mellan luften som tillförs och upplevelsen av luftkvaliteten. (Sandberg, 1994)

### **2.2 Termiskt klimat**

#### **2.2.1 Termisk komfort**

Termisk komfort är ett begrepp som beskriver hur vi människor upplever den omgivande temperaturen. Tillståndet råder när vi varken önskar det varmare eller kallare i omgivningen. Det finns inget inomhusklimat som tillfredsställer alla samtidigt i en större grupp. Vi är alla olika och upplever klimatet i omgivningen på olika sätt, även om vi har likartade kläder och håller samma aktivitetsgrad.

Upplevelsen kan även bero på andra faktorer, som vilken ålder man är i samt vilken erfarenhet man har. Exempelvis kan en person som tycker att klimatet känns behagligt, varken för varmt eller kallt, trots detta känna obehag på grund av andra faktorer. Termisk komfort är med andra ord tillfredställelsen med de termiska omgivningarna som kan uppstå vid förhållanden som asymmetrisk strålning, kontakt med varmt och kallt golv, en vertikal lufttemperaturgradient och lokal konvektiv kylning (drag). (Warfvinge, 2010)

## 2.2.2 Upplevelsen av inomhusklimatet

Hur inneklimatet upplevs kan bero på väldigt många olika faktorer, bland annat klädsel, aktivitetsgrad, ålder, erfarenhet och även dagsform och hur man mår. Klädseln har en stor inverkan på hur vi upplever det termiska inneklimatet. Kläders värmeisolerande förmåga anges i clo och en clo motsvarar  $0,155 \text{ K}\cdot\text{m}^2/\text{W}$ . Definitionen av 1 clo är klädseln hos en person som upplever termisk komfort vid stillasittande i ett rum med den operativa temperaturen  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

En annan viktig faktor som påverkar hur vi upplever inneklimatet är vilken aktivitetsgrad vi håller. Värmeproduktionen i kroppen varierar kraftigt med personens fysiska aktivitet. Då en person är sittande som vid kontorsarbete, är den fysiska aktiviteten ca  $60 \text{ W}/\text{m}^2$  kroppsytan och kroppsytan hos en vuxen person är cirka  $1,8 \text{ m}^2$ . Vid mycket hög kroppsansträngning kan den fysiska aktiviteten stiga upp till  $450 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Den värme som kroppen alstrar kan avges till omgivningen på fyra olika sätt: konvektion, strålning, avdunstning och ledning. Vid stillasittande kontorsarbete i normal rumstemperatur så avges 40 % av kroppens värme genom konvektion, 40 % genom strålning, 15 % genom avdunstning och 5 % genom ledning. Avgivningen i form av konvektion och strålning ökar inte särskilt mycket med ökad ansträngning, medan avdunstning ökar radikalt. Detta beror på att konvektion och strålning påverkas av kroppens ytemperatur och vid ökad ansträngning kan kroppen genom andning och svettning hålla den någorlunda konstant. Ökad avgiven värme i form av avdunstning och ledning torde ändå ligga till last i rummets kylberäkning.

Bedömning av termisk komfort bestäms med hjälp av indexen PMV och PPD. PMV står för predicted mean vote och är en metod med vilken man bestämmer den förväntade upplevelsen av klimatet hos en grupp personer med given klädsel och aktivitet. Människor får definiera sin upplevelse av det termiska klimatet på en skala från +3 (mycket varm) till -3 (mycket kallt). Det termiska klimatet anses vara behagligt då värdet ligger mellan -0,5 och +0,5. Ett PPD-värde visar hur många som är missnöjda med det termiska inneklimatet uttryckt i procent. PPD betyder Predicted Percentage of Dissatisfied d.v.s. förväntat procentantal missnöjda. Värdet utgår efter en 7-punktskala som visar hur många som upplever det hett, varmt, kyligt eller kallt. (Warfvinge, 2010)



### 2.2.3 Lufttemperatur

Lufttemperatur är ett av flera olika sätt att beskriva termisk komfort på, dock ett utav de sämre alternativen eftersom hänsyn varken tas till värmestrålning eller lufthastighet. Under sommarhalvåret stiger temperaturen utomhus och följaktligen stiger även inomhustemperaturen. Då accepteras också något högre temperatur inomhus, mellan 22 och 25 °C. Under den kallare delen av året brukar temperaturen ligga mellan 18 och 22 °C i bostäder och lokaler. Personer som är äldre eller personer med funktionsnedsättning behöver lite högre temperatur än personer som är yngre och friska. (Friedrich, 2011)

### 2.2.4 Operativ temperatur

Operativ temperatur är ett annat temperaturmått som inte bara beskriver lufttemperaturen utan tar även hänsyn till inverkan av omgivande ytors värmestrålning, till exempel väggar, golv och fönster samt människors värmestrålning. Operativ temperatur beskriver temperaturupplevelsen eller komforten bättre än bara lufttemperaturen. Ju närmare och ju kallare ytan är desto större blir dess påverkan på medelstrålningstemperaturen. I ett rum med 24 °C lufttemperatur och ytor som har 16 °C kan den upplevda temperaturen vara 21 °C. Den operativa temperaturen måste beaktas under alla årstider. Under vintern blir fönsterytor väldigt kalla, vilket kräver en högre lufttemperatur för en behaglig temperaturupplevelse i rummet. Det finns även ett specialfall av operativ temperatur som kallas för riktad operativ temperatur, som tar hänsyn endast till strålning från en kall yta. Detta används i BBR för att ställa krav på det termiska klimatet. (Friedrich, 2011)

### 2.2.5 Ekvivalent temperatur

Vid stillastående luft är operativ temperatur och ekvivalent temperatur samma sak, men i ekvivalent temperatur inkluderas förutom luft- och strålningstemperatur också luftrörelsens påverkan på temperaturupplevelsen. Begreppet 'ekvivalent temperatur' används precis som 'operativ temperatur' som ett fysiologiskt upplevelsemått för att beskriva upplevelsen av det termiska klimatet. (Warfvinge, 2010)

### 2.2.6 Asymmetrisk strålning

Denna typ av strålning uppstår vid skillnader i temperatur mellan väggar, en kall fönsterruta eller varm radiator eller liknande. Dessa inverkar på den operativa temperaturen och därmed den upplevda temperaturen. (Endal Rognes, 2012)

### 2.2.7 Varmt och kallt golv

Golvtemperaturen upplevs olika trots samma yttemperatur, beroende på vilket material golvet består av. Om ett betonggolv jämförs med ett trägolv där båda golven har yttemperaturen 20 °C, kommer betonggolvet att upplevas kallare än vad trägolvet gör. Detta beror på att betong har högre värmeledningsförmåga och är på så sätt bättre på att transportera bort värme och fötterna blir därför kallare. Sten och betonggolv måste därför ha en högre yttemperatur jämfört med textil (mattor) och trägolv. (Warfvinge, 2010)(Socialstyrelsen, 2005)

### 2.2.8 Kallras

Kallras uppstår då det är kallare utomhus än inomhus och bildas genom naturliga konvektionsströmmar. Fönsterytan och även rumsluften närmast denna kyls. Eftersom kallare luft är tyngre än varmare, sjunker den nedkylda luften närmast ytan ner till golvet och strömmar in i rummet som kallras. Det finns flera sätt att motverka kallras. Ett är att placera radiatorer under fönstren, varvid den avkylda luften vid fönstren värms upp och motverkar därmed kallras. Ett annat sätt är att byta till fönster med ett bra U-värde. (Friedrich, 2011)

### 2.2.9 Vertikal lufttemperaturgradient

Med temperaturskillnaden i luften mellan golv och tak uppstår en vertikal lufttemperaturgradient. Detta kan uppstå av exempelvis låg tilluftstemperatur och stora värmekällor i rummet. Om temperaturskillnaden mellan luften vid huvudet och luften vid anklarna blir för stor, kan det resultera i att termisk komfort inte kan nås. Vertikal temperaturgradient är temperaturskillnader i höjddled. En stor temperaturskillnad i höjddled kan orsaka obehag hos stillasittande personer. Om skillnaden i lufttemperatur vid huvud och fötter är större än 3 °C kan det upplevas som obehagligt.

Golvets material samt golvtemperaturen har betydelse för hur man upplever temperaturen. Betong- och stengolv upplevs som mycket kallare än t ex trä eller textil trots samma yttemperatur på golvytan. Detta beror på att betong och sten har högre värmeledningsförmåga och är på så sätt bättre på att transportera bort värmen från fötterna. Normalt uppstår inga problem om golvtemperaturen håller sig inom 20-24 °C. (Endal Rognes 2012)

### 2.2.10 Effektbehov och värmeförluster

För att ett utrymmes inomhustemperatur ska hållas konstant, krävs att värmeförlusterna som uppstår ersätts med motsvarande mängd värme. Effektbehovet bestäms av värmelasternas storlek, antal och placering. Storleken på effekbehovet är också beroende av väder, täthet och byggnadsdelars värmetröghet.

Värmeflödet som uppstår genom omkringliggande ytor, som tak, väggar och fönster benämns som transmissionsförluster.

Genom att mäta temperaturavvikelse utan- och innanför ett utrymme kan värdet för transmissionsförlusten genom väggen sedan beräknas. Transmissionsförlusten beräknas genom sambandet nedan. (Warfvinge, 1996)(REF: Dan Kristenssen, 2014)

$$Q_{trans} = U \cdot A \cdot \Delta T$$

där

$U$  = Värmegenomgångskoefficient,  $W/m^2 \cdot K$

$A$  = Ytan genom vilken värmen leds,  $m^2$

$\Delta T$  = Skillnad i temperatur utanför och innanför rum

Ventilationsförlusten beräknas här med sambandet nedan;

$$Q_{vent} = q \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T_{frånluft} - T_{tilluft})$$

där

$Q_{vent}$  = Ventilationsförlust [W]

$q$  = ventilationsflödet [ $m^3/h$ ]

$\rho$  = Luftens densitet [ $Kg/m^3$ ]

$C_p$  = luftens specifika värmekapacitet [ $J/kg \cdot ^\circ C$ ].

$T$  = Temperatur [ $^\circ C$ ]

## 2.3 Luftrörelser

Konvektionsflödet på grund av värmekällor är proportionellt mot avgivande effekt upphöjt till en tredjedel. Med andra ord ökar konvektionsflödet bara med 26 % vid en fördubbling av värmeeffekten. (Sandberg, 1994)

Boverket ställer ett ventilationskrav vid vistelse i rummet på 0,35 l/s per kvadratmeter golvarea, det så kallade hygienflödet. Detta flöde behöver i ett deplacerande system uppnå samma värde som konvektionsflödena. När ingen

vistas i rummet får däremot uteluftsflödet gå ner till 0,10 l/s per kvadratmeter golvarea.

Boverket ställer krav på endast ca 10 l/s i normflöde i ett rum av genomsnittlig kontorsstorlek. Om endast detta flöde följs, kommer det att leda till omblandande ventilation oavsett val av tilluftsprincip eller tilluftsdon. Vid normal praxis är det dock temperaturkomforten som bestämmer valet av luftflöde, och ett normalkontor för en person brukar landa kring 33 l/s.

Luftutbyteseffektivitet och lokalt index är mått på ventilationssystemets förmåga att tillföra uteluft till vistelsezonen. Boverket har allmänna råd som anger att luftutbyteseffektiviteten bör ligga på 40 procent eller däröver. Lokalt index är en normalisering av luftens lokala medelålder motsvarande ett perfekt omblandat system, som ska vara 1 eller mer. Om värdet underskrider detta beror det främst på stagnationspunkter i rummet. (Boverket, 2011)(Dan Kristensson, 2014)

### 2.3.1 Vistelsezon och närzon

Vistelsezon: Zonen i rummet där personen eller personerna uppehåller sig. Här måste komfortkriterierna vara uppfyllda. (Boverket, 2011)

- 0,6 meter från yttervägg och mellanväggar
- 1 meter in vid fönster och dörr.
- 0,1 - 2 meter över golv

Närzon: Begreppet används i samband med deplacerande ventilation som utgör sträckan mellan tilluftsdonet och en punkt med en lufthastighet över 0,2 m/s. Denna zon får inte överlappa vistelsezonen. (Warfvinge, 2010).

### 2.3.2 Drag

Drag definieras som en oönskad lokal kylning av den mänskliga kroppen orsakad av luftrörelser. Det är en av de vanligaste orsakerna till klagomål i uppvärmda eller kyllda byggnader och i transportbilar. Drag är ett sammansatt fenomen som kan förekomma även vid låga lufthastigheter. Känslan av drag är beroende av bland annat var på kroppen luftstrålen träffar, beklädnad, lufttemperatur, lufthastigheten och turbulensintensiteten. Nacken är en del av kroppen som är känslig för drag, och även anklarna är utsatta.

Maximal lufthastighet som inte ska kunna ge känsla av drag sätts ofta till 0,15 m/s för vinterförhållanden och 0,25 m/s för sommarförhållanden. Orsaken till en lägre lufthastighet sommartid är att högre lufttemperatur kan bidra med att

reducera känslan av drag. I Arbetsmiljöverkets föreskrifter om arbetsplatsens utformning, AFS 2009:02, kan även denna rekommendation utläsas. Även vid lufthastigheter under dessa gränser kan drag uppkomma på grund av hög turbulensintensitet. Drag är orsakat av hög genomsnittshastighet eller hög turbulensintensitet. De mest använda standarderna har inte tagit hänsyn till turbulensintensitet, vilket antagligen är något av förklaringen till att drag är ett av de vanligaste klagomålen. (Awbi, 2003).

### 2.3.3 Termiska konvektionsströmmar

Termiska konvektionsströmmar uppkommer kring värmekällor och har stor inverkan på såväl luftkvalitet som temperatur i ett rum. Termiska konvektionsströmmar uppstår när luft kommer i kontakt med en värmekälla, blir uppvärmd och stiger. Allt eftersom den stiger drar den in rumsluft och luftmängden i strömmen ökar, samtidigt som dess hastighet avtar. Konvektionsströmmen blir alltså påverkad av värmekällans effektavgivning genom strålning och konvektion, geometri, rumsluftens rörelser och eventuella temperaturgradienter i rummet. (Endal Rognes, 2012). Kroppskonvektionsströmmen från en sittande vuxen person i stilla arbete stiger med ca 0,16 m/s, uppmätt 15 cm ovanför hjässan. (Internt arbete AirSon, 2004)

En konvektionsström beräknas genom användning av en imaginär punkt- eller linjekälla. Med denna metod förutsätts det att konvektionsströmmen har en utbredningsvinkel på 25°. Därefter är det möjligt att räkna sig bakåt till en punkt som hade gett samma konvektionsström vid liknande effekt i rummet (Endal Rognes, 2012). I och med att en konvektionsström är beroende av värmekällans geometri och strömningsförhållandet runt källan är detta en förenklad procedur. Det finns flera framtagna beräkningsmetoder för att finna detta avstånd, bland annat den så kallade max/min-metoden. (Skistad, et al., 2004). Med denna metod bestäms ett övre och ett lägre gränsvärde. Det övre gränsvärdet motsvarar den nivå där den verkliga värmekällan ersätts med en 'punktkälla', som leder till att gränsen till konvektionsströmmen ovanför punktkällan passerar genom den övre kanten av den verkliga källan. Det lägre gränsvärdet motsvarar den nivå där diametern av konvektionsströmmens minsta tvärsnitt är ungefär 80 % av den övre ytdiametern. Den bestäms som ca en tredjedels diameter ovanför den verkliga källan. (Skistad, et al., 2004). I båda fallen sker beräkningarna utifrån en spridningsvinkel på 25°. I litteraturen rekommenderas maximum-metoden för lågtemperaturkällor och minimum-metoden för större källor med högre temperaturer.

$y_0$  för metoderna blir för maxvärdet  $y_0 = 2,3 \cdot D$  och minvärdet  $y_0 = 1,8 \cdot D$

där

$y_0$  = avståndet mellan toppen av den verkliga värmekällan till den virtuella värmekällan.

D = diametern på den verkliga värmekällan.

### *2.3.3.1 Termiska konvektionsströmmar i rum med termisk skiktning*

I rum ventilerade med deplacerande ventilation påträffas ingen homogen temperatur i omgivningen i och med att en temperaturgradient förekommer i rummet. Detta påverkar konvektionsströmmarna eftersom de drivs av temperaturskillnaden mellan luften i konvektionsströmmen och den omliggande luften. (Awbi, 2003).

Allt eftersom konvektionsströmmen stiger kommer temperaturskillnaden att minska på grund av att den blandas ut med kallare rumsluft, men även eftersom rumsluftens temperatur ökar med höjden. Konvektionsströmmen kommer till slut att nå ett skikt där ingen temperaturskillnad råder och konvektionsströmmen mister därmed sin drivkraft. På grund av konvektionsströmmens rörelsemängd kommer den med tiden att fortsätta att stiga tills rörelsemängden slutligen försvinner. Höjden där den termiska drivkraften försvinner kommer med andra ord att nås tidigare i ett rum med en temperaturgradient än i ett rum där ingen temperaturgradient råder. (Awbi, 2003)

Genom användning av deplacerande ventilation bildas en uppdelning av två zoner i rummet, en nedre zon med tilluftsströmning och en övre med omblandad luft. Gränsskiktet bildas där temperaturskillnaden är noll. Detta skikt är till viss del diffust och kan ha en höjd på ca en meter. (Sandberg, 1994)

## 3 Ventilationsprinciper

### 3.1 Ventilationseffektivitet

Ett mått på hur effektivt en viss förorening förs bort från det ventilerade rummet benämns som ventilationseffektivitet. Detta är direkt beroende av var föroreningarna befinner sig och hur luftströmmarna sker i rummet (Sandberg, 1994).

Om en god luftkvalitet inomhus ska nås gäller det att ta hänsyn såväl till luftkvaliteten utanför byggnaden som till ventilationssystemets möjligheter till att minska föroreningarna från friskluften och att ersätta den befintliga luften i rummet med ny, frisk luft.

Beräkningsmodellen av ventilationseffektivitet är baserad på förhållandet mellan partikelnivån i tilluften, frånluften och andningszonen. Ett högre tal innebär en effektivare borttransport.

$$\varepsilon_p = \frac{C_f - C_t}{C_a - C_t} \cdot 100$$

där

$C_f$  är koncentrationen i frånluften

$C_t$  är koncentrationen i tilluften

$C_a$  är koncentrationen vid uppmätt höjd andningszon

En betydande drivkraft för hur föroreningarna fördelas och förs ut ur rummet är temperaturen. Genom att undersöka de temperaturförhållanden som råder i tilluften, frånluften och andningszonen kan sambandet gällande systemets ventilationseffektivitet utnyttjas genom avläsning av temperatur istället för koncentrationen vid de olika mätpunkterna. Detta uttryck har inget definierat namn utan benämns i studien som temperaturverkningsgrad. Detta bidrar således med ett mått på ventilationseffektiviteten, baserat på temperaturfördelningen. (Ref: Dan Kristensson, 2014)

Utrycket beskrivs enligt följande:

$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är temperaturen i frånluften

$T_t$  är temperaturen i tilluften

$T_a$  är temperaturen vid uppmätt höjd i andningszonen

### 3.2 Omblandande ventilation

Ventilationsprincipen bygger på att sträva efter en fullständig omblandning i rummet. Med detta menas att en helt jämn rumstemperatur och lika mängd föroreningar finns i samtliga delar av rummet. Med andra ord är luften i rumsluft uppblandad med tilluften. Vid fullständig omblandning krävs ett luftombyte med samma avkylande effekt som rummets ackumulerade värmelaster för att nå ett jämviktsläge. Ett perfekt (fullständigt) omblandat system ger en verkningsgrad på 1:1 gällande temperatur och koncentration. Om värdet underskrider detta beror det på stagnationspunkter i rummet, det vill säga delar där luften står still och inte tillåts cirkulera. Om systemet ska verka optimalt måste tillräcklig omblandning ske. Detta görs antingen genom termiskt styrd luftströmning eller höghastighetsteknik. (Sandberg et al, 1995). Figur 1 visar karaktären av omblandande ventilation i en kontorsmiljö.





*Figur 1. Principen av ett kontor utrustat med omblandande ventilation.*

Med termiskt styrd luftströmning strömmar tilluft med lägre temperatur ut vid taket. Den undertempererade tilluften bidrar med en högre densitet än luften i rummet. Denna luft kommer därför att sjunka och blandas med luften i rummet och skapar omblandning (Sandberg et al, 1995).

Höghastighetstekniken bygger på att en turbulent jetstråle tillförs, vilken bidrar till att luften omkring medejkteras. Detta leder till ett ökande flöde längre bort från tilluftsdonet tillsammans med en minskande hastighet. Medejkteringen och det ökande flödet skapar stora luftströmmar i rummet som leder till att omblandning sker. (Sandberg et al., 1995). Med dessa förhållanden placeras tilluftsdonet lämpligast vid tak och utanför vistelsezonen. För att undvika drag i vistelsezonen ska tilluften kunna färdas längs taket, genom att den så kallade Coanda-effekten utnyttjas (Nilsson, et al., 2008). Effekten uppkommer vid takytan där luftstrålen sugas mot taket. Detta leder till att hastigheten på jetstrålen avtar långsammare och ger längre kastlängd, som oftast är till fördel. (Warfvinge, 2010)

Det är av vikt att kastlängden blir tillräckligt stor för att leda tilluften till samtliga delar av rummet. Om kastlängden blir alltför lång, kan denna vika ner vid väggen och bidra till drag i vistelsezonen. Ett ungefärligt mått på kastlängden kan sättas till 2/3 av längden på rummet.

Om tilluft med högre temperatur än rådande luft strömmar ut i rummet, kan den lägre densiteten göra att den inte blandas med luften i rummet ordentligt utan förblir vid taket som en värmekudde.

Om tilluften istället är för undertempererad, leder det till att lufthastigheterna i rummet blir högre och kan leda till sämre komfort. (Sandberg, 1995)

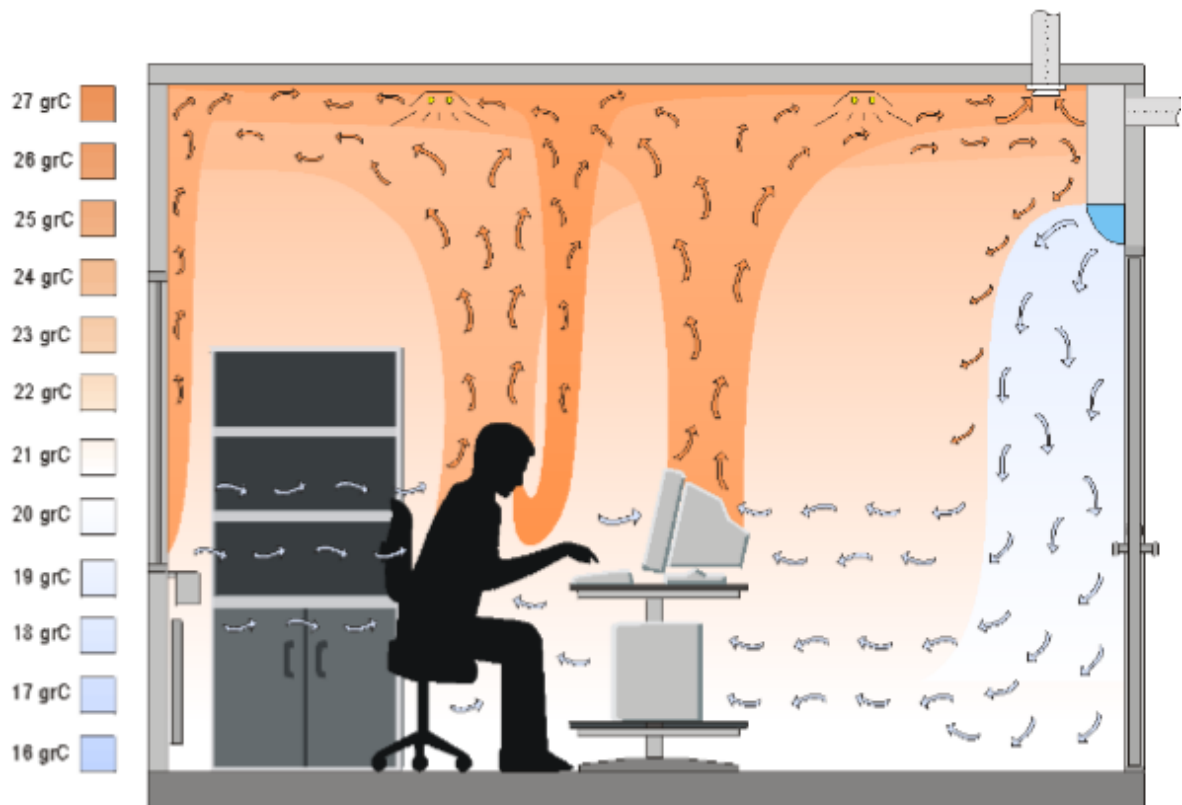
Eftersom det i rumsluften i teorin råder full omblandning är det därför mindre krav på var frånluftsdonet är placerat. Om däremot avståndet mellan tilluftsdonet och frånluftsdonet blir för kort kan det leda till att en del av tilluften förs direkt ut genom frånluftsdonet utan att hinna blandas ut med rumsluften och kyla rummet. Ett för kort avstånd gör i sådant fall att tilluften försvinner direkt ut genom frånluftsdonet.

Det är av stor vikt att ta hänsyn till föremål som är placerade i taket, som annars kan leda till att luftstrålen faller ner i rummet tidigare än önskvärt och leda till drag.

I denna studie utnyttjas ett tilluftsdon med radiellt spridningsmönster. Dessa ventiler är placerade strax under tak, vilket är fördelaktigt eftersom placeringen ger ventilen möjlighet att sprida luften jämnt över hela rummet. Stort tilluftsflöde möjliggörs, och vid för hög kastlängd kommer luften att sprida sig ner längs väggarna och förebygga risken för att drag uppkommer. (Skåret, 2000).

### **3.3 Deplacerande ventilation**

Förträngningsventilation eller deplacerande ventilation är en princip där tilluft med en lägre temperatur tillförs i rummet med låg hastighet och sjunker. När tilluften stöter på varma källor, värms den omkringliggande luften upp, stiger och skapar en konvektionsström. (Warfvinge, 2007). Detta är en princip som ger en förbättrad luftutbyteseffektivitet genom att luften för med sig föroreningar upp och ger en gynnsam temperatur- och koncentrationsgradient i rummet. (Skåret, 2000). Tilluftsdonet placeras vanligen vid golvnivå, där tilluften får ett lågturbulent flöde som följer ett visst riktningsmönster. Tekniken leder till en bättre luftkvalitet längre ner i rummet och föroreningarna hindras att transporteras från den övre till nedre zonen. (Warfvinge, 2007) (Sandberg, 1994). I figur 2 skönjas karaktären av ett kontor med vertikalt deplacerande ventilation.



Figur 2. Principen av ett kontor utrustat med vertikalt deplacerande ventilation.

Luften tillförs med en låg hastighet ur ett don med en stor yta. Detta leder till en täthetsström, som drivs av densitetsskillnaden (genom skillnader i temperatur) och skjuter undan den varmare inomhusluften. Tilluftsskiktet är tunt, endast ca 100 mm. När tilluftsstrålen sjunker, accelereras denna genom sin tyngd i förhållande till omgivande luft (Sandberg, 1994). När tilluften sprids längs golvnivån, trängs befintlig luft undan tills den möter en värmekälla. Vid denna värms luften upp, en konvektionsström uppstår vid värmekällan, som leder bort föroreningarna från källan i den stigande strömmen. Värmekällorna strävar efter att skapa ett gränsskikt med friskluft genom tilluftströmningen, som ger en hög luftkvalitet i andningszonen. Frånluftsdonet bör placeras vid tak, då luften här är varmast och koncentrationen av föroreningar är högst.

En viktig förutsättning med denna princip är att hindra tillbakaströmning i så god mån möjligt, vilket leder till att luft i övre skikt leds ner i vistelsezonen. Detta uppstår vid kallras, nedåtgående konvektionsströmmar från kalla ytor eller rörelse som skapar en omblandning av rumsluften. Normalt går inte all tillbakaströmning att undvika. Storleken på konvektionsströmmarna varierar i ett rum och beror av värmekällans avgivande effekt och utformning, som även avgör var strömmarna uppstår.

För att nå den mest gynnsamma temperaturgradienten i rummet krävs en tillräcklig mängd tilluft. Genom detta eftersträvas att den varma, förorenade luften stiger och placerar sig i olika lager ovanför vistelsezonen. Därmed kan höjden på det övre förorenade skiktet bestämmas genom tilluftsflödet. Detta beräknas genom att tilluftsflödet ska motsvara det luftflöde som samtliga konvektionsströmmar behöver för att nå önskad höjd.

Principen leder till en lägre temperatur i den nedre zonen, vistelsezonen, vilket även gynnar kylbehovet för utrymmet. Vid beräkning av temperaturfördelningen delas rummet in i två delar. Ena delen är där temperaturökning sker längs golvet. Kallare tilluft blandas med rumsluft längs golv, där golvet i sig har värmeutbyte med luften. Den andra delen är där luft kommer i kontakt med en värmekälla och stiger. Temperaturfördelningen har med denna ventilationsprincip en näst intill linjär karaktär i ett rum till den nivå där frånluften tas ut (Skistad, et al., 2004).

En beräkningsmodell för detta är den så kallade 50 % regeln som anger att halva den totala temperaturökningen i rummet sker vid golvnivå och andra halvan från golv till tak. Denna används när osäkerhet gäller för strömningsbilden i rummet. En annan beräkningsmodell som kan utnyttjas, utgår även denna från två steg.

Sambandet anger en temperaturökning över golv och resterande med linjär förändring mot tak med konstant temperaturgradient. Till skillnad från föregående metod sker temperaturökningen med en annan startpunkt från golv till tak och därmed en annan temperaturgradient (Mundt, 1996).

De metoder för lufttillförsel som kommer att undersökas är i denna studie genom golvplacerade tilluftsdon med horisontell utströmning och tilluftsdon vid taknivå med horisontell utströmning och låghastighetsteknik.

Tilluftsdonet får en närzon närmast donet. Temperaturskillnaden bör inte överstiga 8 grader mellan rummet och tilluften, då detta kan upplevas som obehagligt. Kall luft faller ner och accelererar längs golv och drag kan uppstå. Därför är det viktigt att inte placera tilluftsdonet för nära en arbetsyta eller andra platser där folk ofta rör sig.

Lufttillförseln med deplacerade tilluftsdon placerat vid tak sker med en undertemperatur i förhållande till luften i zonen under taket. Temperaturskillnaden kommer att leda till att tilluften faller ner medan temperaturskillnaden mellan tilluften och rumslufttemperaturen blir reducerad. Luften kommer vid en särskild höjd att stanna och kan beräknas så att den lägger sig i andningszonen. (Skåret, 2000). Ofta tillförs luft i rummet med temperatur lägre än vid nivån vid golvet, vilket teoretiskt sett leder till att

tilluften faller till golvet innan jämvikt med temperaturen i omgivande luft nås. Värmelasterna ersätter sin konvektionsluft med ersättningsluft från sidan, som leder till att tilluften ”sugs” mot värmelasten trots att dess temperatur är lägre än vid golvnivå. Genom att luften bromsas i god tid vid kontakt med värmelasterna motverkas drag i vistelsezon jämfört med konventionellt deplacerande ventilation.

En effektbalans kommer att uppstå mellan värmelasternas sammanlagda effekt och tilluftsflödets kylande effekt, vilket leder till att rumstemperaturen kan bibehållas. Att uppnå denna balans är däremot komplicerat i verkligt sammanhang, eftersom variabla värmelaster bidrar med mycket svårberäknade konvektionsflöden.

### 3.3.1 Undertemperaturkontrollerad laminär lufttillförsel (TLA)

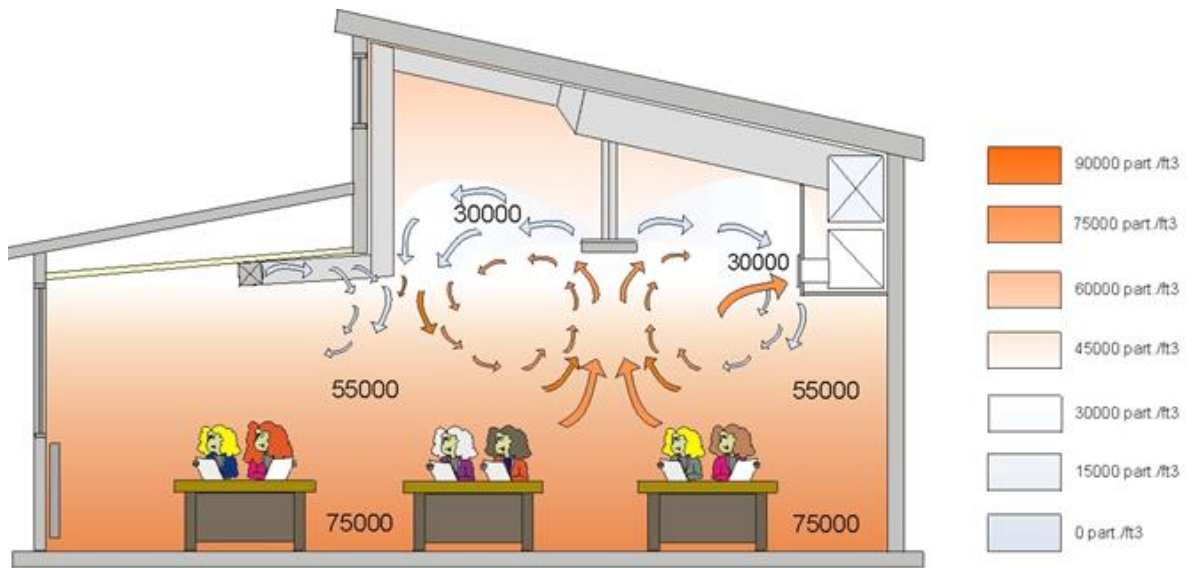
En omfattande forskning har lagts ner på tekniken att tillföra laminär luft med en lägre tilluftstemperatur som hålls konstant för att åstadkomma en minimal impuls. Förutom att tekniken utnyttjas i de tilluftsdon som används i studien, implementeras den även i industriell renrumsventilation, operationsventilation och astmabehandling. Forskingen har bidragit till att utveckla den första ventilationstekniska och allergenpreventiva behandlingen av astma. Det är även den första evidensbaserade behandlingen som inte är farmaceutisk. Behandlingen heter Airsonett och har genomgått ett stort antal tekniska, kliniska och hälsoekonomiska studier under snart 20 år. Det är den första medicintekniska behandlingen som har utvärderats av Läkemedelsverket och den är numera en del av behandlingstrappan för svår allergisk astma. Bolaget är en avknoppning från AirSon och utsågs till årets medicinteknikföretag i Sverige 2010. Behandlingen uttrycktes som "The most important finding of the year" inom allergi, astma och immunologi när resultaten från en internationell fas 3 studie publicerades samma år. Nyckeln till framgången utgörs av en extremt god kontroll av tilluftens fallhastighet och ventilationsdonets förmåga att initiera en luftström och luftflöde med minimal inblandning av omgivande luft. På samma sätt har tekniken för lufttillförseln och AirSons implementering av denna på kort tid blivit den mest förskrivna principen för operationsventilation i Sverige. (Intern studie AirSon, 2010)

### 3.3.2 Undersökning relaterad till deplacerande ventilation

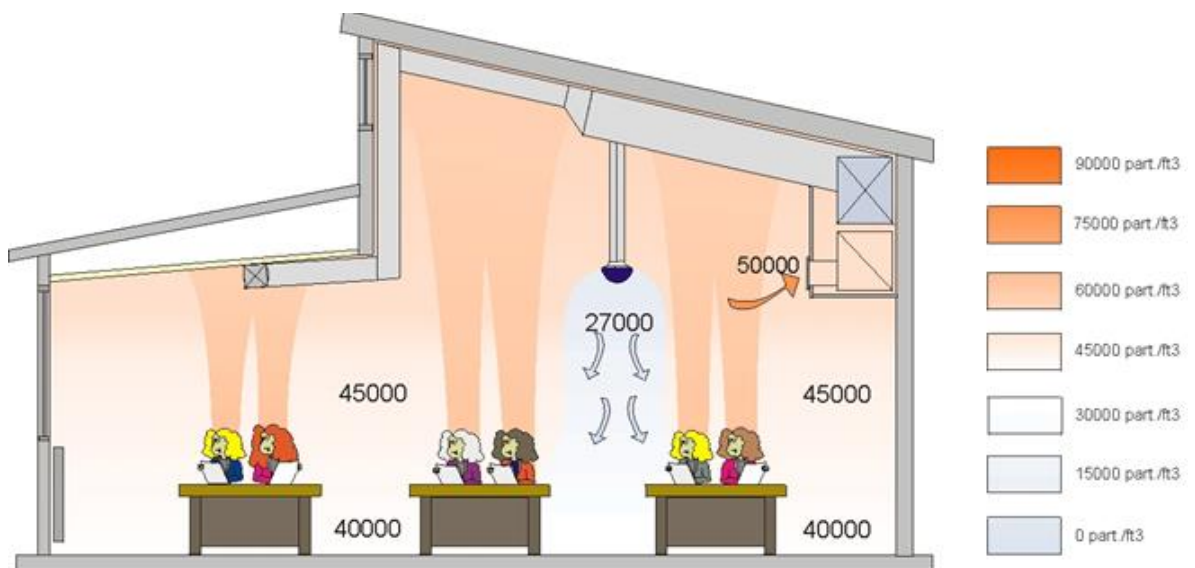
En genomförd studie gjord på en skola i Norge visar på att vertikalt deplacerande ventilation bidrar till ett mer gynnsamt inomhusklimat än ett omblandande ventilationssystem. Studien undersöker partikelnivåhalten i

inomhusluften systemen emellan. Detta ligger utanför våra undersökningar men kan trots detta vara av intresse att se resultatet av.

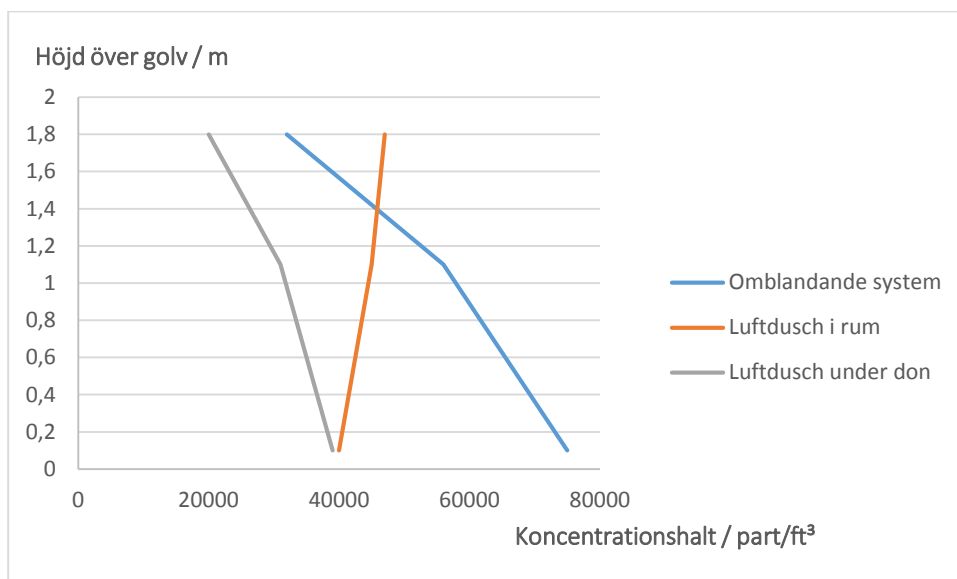
På Trasopsskolan i Oslo installerades ett takdeplacerande system och ett omblandande system i två nästintill identiska klassrum. I genomsnitt fanns där 23 elever och en lärare dagligen. Undersökningen visar först och främst en mätning av skillnaden i partikelnivå som mäts i partiklar/kubikfot. Resultaten som kan utläsas i figur 3 och figur 4 skiljer sig radikalt systemen emellan med genomsnittliga värden under dagen. Vad gäller det omblandande systemet uppmättes en koncentration på 55 000 part/ft<sup>3</sup> vid andningszonen och en koncentration på 70 000 part/ft<sup>3</sup> vid golvet. Dessa värden jämfördes med klasrummet som har det vertikalt deplacerande systemet, där en koncentration på 45000 part/ft<sup>3</sup> uppmättes vid andningszonen och en koncentration på 40 000 part/ft<sup>3</sup> vid golvet.



Figur 3. Partikelnivåer med användning av omblandande ventilation.



Figur 4. Partikelnivåer med användning av deplacerande ventilation.



Figur 5. Koncentrationshalten i förhållande till rumshöjden.

I figur 5 kan koncentrationshalten utläsas för de båda mätningarna i förhållande till höjden i rummet.

I jämförelse av koncentrationen i frånluften rummen emellan hade klassrummet med det omblandande systemet en koncentration på 30 000 part/ft<sup>3</sup> och klassrummet med det vertikalt deplacerande systemet en koncentration på 50 000 part/ft<sup>3</sup>. Detta visar på att det vertikalt deplacerande systemet renar rummet på betydligt fler partiklar än vad ett omblandande system gör.

När dessa mätningar utfördes lades det inte vikt vid betydelsen av att skilja mellan inomhus- och utomhusproducerade partiklar, vilket gör att skillnaden mellan inomhusproducerade partiklar i andningszonen bör vara större än vad mätningarna ger sken av. Tar vi bort tillskottet utifrån hamnar vi på en halvering av inomhusproducerade partiklar.

Vad som är särskilt intressant i den norska skolan är att sjukfrånvaron, liksom partikelhalten, är halverad i klassrummet med vertikalt deplacerande ventilation. Rapporten av sjukfrånvaron presenteras i figur 6. Sjukfrånvaron bygger på drygt tre års statistik och är enbart gjord på de två klassrummen, vilket inte är tillräckligt statistiskt bevis men ger ändå en indikation som grund för ytterligare studier av andra installationer. (Intern studie AirSon, 2004)



FRA :

FAXNR. :

21 Mar. 2003 14:19 S1

**TRASOP SKOLE**

Hellerudveien 63  
0672 Oslo  
Telefon: 22 76 18 50  
FAX: 22 76 18 64

**TELEFAX**TIL: PER EIDE DYR HAUGFRA: Trasop skole - DAGMAR SLETTESTØL

FAKS - 22 19 98 71

ANG.:

FRAVÆR:		ROM 5:	ROM 6:
SKOLEÅRET	98/99	141 s: 3.09%	76 s: 1.7%
"	99/00	134 s: 3.7%	67 s: 1.4%
"	00/01	179 s: 4.49%	173 s: 4.3%
"	01/02	226 s: 5.9%	64 s: 1.8%

ANTALL SIDER INKL. DENNE: 1

Dersom ikke alle sidene er mottatt, vennligst ring eller fax.

Dato: 21.03.03.

Figur 6. Redovisning av sjukfrånvaron. Rum 5 gäller omblandande ventilation och rum, vertikal deplacerande ventilation.

### 3.1 Energibesparingar

I studien som föranledde denna, ”Room air distribution for Comfort Cooling”, gjordes beräkningar med slutsatsen att effektbehovet och därmed den bidragande energiförbrukningen kunde minskas eftersom tilluftstemperaturen tilläts vara högre med vertikalt deplacerande ventilation. Luften kan därmed kylas under en större del av året utan att maskinell kylning krävs, då utomhustemperaturen ligger under den önskade tilluftstemperaturen.

Av studien kunde det utläsas att effektbehovet minskades med 43,3 W vid en ökning av 1 °C i tilluftstemperaturen med 84 W vid 2°C ökning och användning av 130 m<sup>3</sup>/h i tilluftsflöde. Vidare kan det utläsas att en ökning i tilluftstemperatur från 1 °C samt 2 °C från 16°C förlänger tiden utan behov av mekanisk kylning med 309 respektive 647 timmar på ett år. Även energiberäkningen visar på en stor möjlighet till besparingar med en höjning av tilluftstemperaturen. Däremot nämns att det inte är ovanligt att en ventilationsanläggning under sommartid drivs dygnet runt, vilket kan påverka energiförbrukningen och möjligheten till energibesparingar markant. (Rognes, 2012)

## 4 Försöksbeskrivning

### 4.1.1 Försöksrummet

#### 4.1.1.1 Nuvarande försöksrum

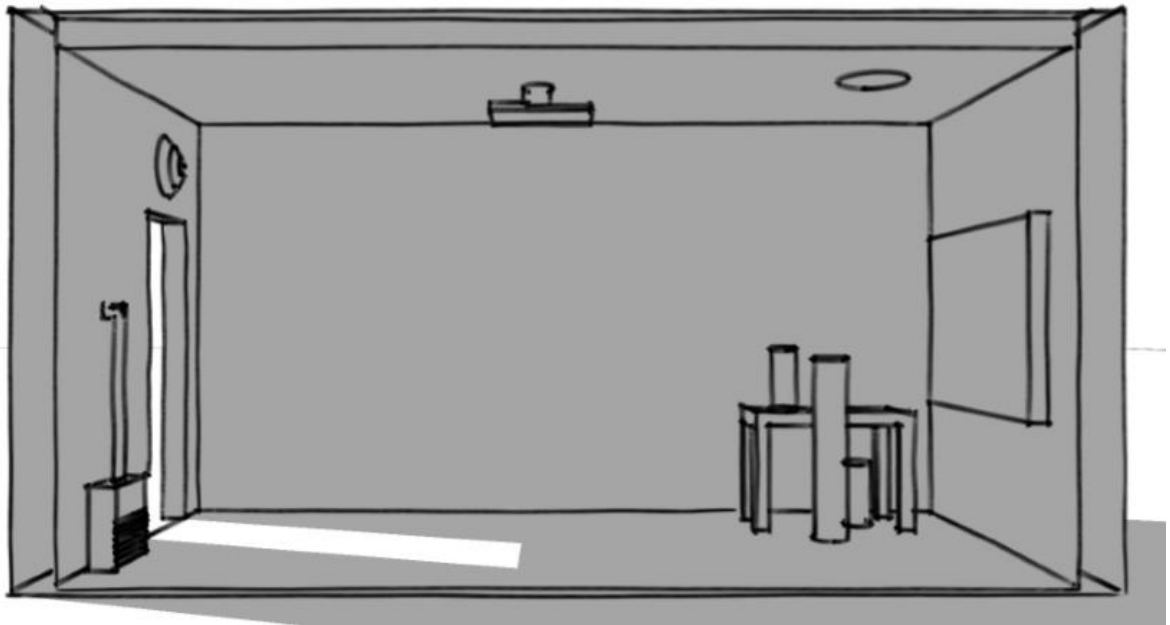
Försöksrummet för detta arbete färdigställdes 2012 och har använts för mätningar sedan dess. Figur 7 ger en överblick av försöksrummet. Rummets innermått är längd 5,10 m, bredd 2,40 m med ett vid försökstillfället upphöjt golv så att invändig takhöjd motsvarade 2,70 m. Figur 8 återger försöksrummet på en planritning. Rummet är helt omslutet av ett annat utrymme med högt till tak och stora fönsterpartier som avskärmats med vita lamellgardiner. Försöksrummet och det angränsande utrymmet har även dimensionerats att ge 25 hPa övertryck mot övriga rum i byggnaden.

Samtliga omslutande ytor med undantag för fönster är beklädda med 150 mm extruderad polystyrencellplast med värmeledningsförmåga  $\lambda = 0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , ett betydligt tjockare skikt än i föregående studier. Detta medför att värmetransmissionen minimeras genom försöksrummets klimatskal. Samtliga innerytor exklusive fönsterytor färgas svarta för att luftflöden med tillsättning av rök enklare ska kunna urskiljas.

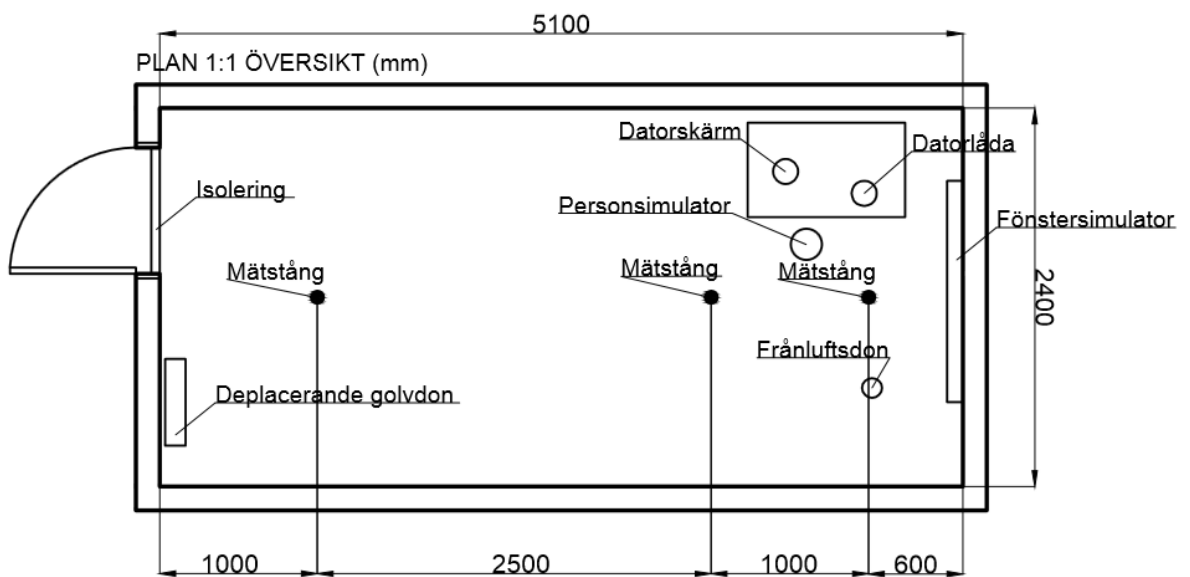
Rummet har även fyra 3-glasfönster, två placerade på respektive långsida, som mäter 0,3 m bredd och 2 m höjd från golvnivå för att medge insyn och belysning utifrån utan att äventyra värmetransmission från försöksrummet. Rummet är bedömt utifrån yta och utrustning till att vara ett typexempel av ett kontor anpassat för en person. Rummets U-värde beräknas till  $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Väggarnas U-värde utmärker sig i isolerande förmåga genom det nya U-värdet på  $0,3 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  jämfört med studien som låg som grund för masterarbetet ”Room air distribution for comfort cooling”, där väggarna hade  $0,64 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , ett mer än fördubblat värde.

Dörren är på motsatt sida om skrivbordsutrymmet, längs ena kortsidan. I detta utrymme är värmelasterna samlade med kort avstånd från varandra, vilket bedömdes som en vanlig förekommande disposition av ett normalt kontorsrum.



Figur 7; Skiss av försöksrummet



Figur 8; Planritning av försöksrummet

#### 4.1.1.2 Tidigare försöksrum

Försöksrummet som använts vid tidigare studier hade dimensionerna bredd 2,4 m, längd 4,1 m och höjd 2,55 m till innertak samt höjd 0,3 m från innertak till yttertak. Taket gränsade mot kontor i etaget ovanför. Väggarna angränsade mot ett större vistelserum. Vistelserummet användes frekvent av personal med ett klimat inställt att kontrollera temperaturen innanför en viss temperaturavvikelse. Denna avvikelse kontrollerades bristfälligt och blev för hög.

Rummets väggar utgjordes av sandwichelement bestående av två tunna metallplattor med 50 mm mineralull emellan med U-värde  $0,64 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Ena väggen bestod från början av fönsterrutor med ett glas. Detta ändrades i den andra studien genom att 50 mm Isopor-isolering placerades innanför glaspartierna. Taket bestod av isolering bestående av 25 mm isolaminplattor, och golvet bestod av samma golvbeläggning som i övriga utrymmen i lokalerna, en plastmatta limmad på betong. I den andra studien som genomfördes placerades 25 mm isolaminplattor på golvet.

## 4.2 Värmelasterna

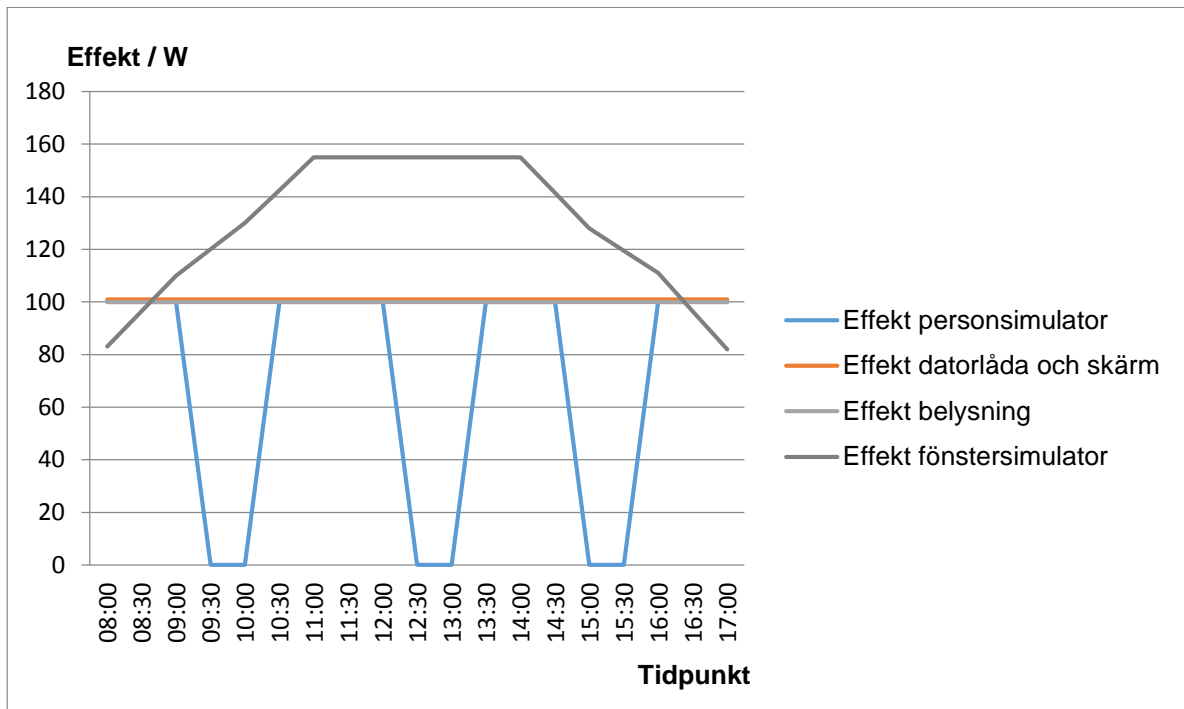
### 4.2.1 Nuvarande mätningar

Kontoret utrustas med en personsimulator motsvarande en sittande människa i arbete, datorutrustning, lysrörsarmatur och en fönstersimulator i form av en panel för att motsvara solinstrålning med avskärmning.

Samtliga värmelaster utom personlasten aktiveras en timme före arbetsdagens början, kl. 07.00, och går därefter enligt föreskrivet schema. Värmelasterna avaktiveras en timme efter att arbetsdagen förväntas vara färdig, kl. 18.00. Värmelasterna kontrolleras med ansluten effektmätare till dess stickkontakt. Därmed kan värmelastens effektvärde verifieras med de värden som registreras i styrenheten och i sin tur kurvan för värmelasternas aktivitet i mjukvaran. I tabell 1 presenteras värmelasterna med bidragande värmeeffekt. I figur 9 kan värmelasternas tidsschema över dagen avläsas.

Tabell 1: Värmelasterna i försöksrummet och tillförd värmeeffekt

Värmelaster	Tillförd värmeeffekt
Personsimulator	Variabel, max 100 W, medel 72 W
Datorsimulator	52 W
Skärmssimulator	52 W
Fönstersimulator	Variabel, max 155 W, medel 95 W
Lysrörsarmatur	72 W



Figur 9. Värmelasternas tillförda effekt under arbetsdagen.

#### 4.2.1.1 Människan

För att motsvara en mer realistisk värmeavgivning från en person används ett papprör, i fackterm "gjutrör", som material för personsimulatorens. Detta draperas sedan i måttligt veckat svart tyg, som möjliggör att strömningsflödet lättare kan urskiljas genom tillsättning av rök. Papprörets diameter mäter 320 mm med en höjd på 1 200 mm med förslutning i båda ändar.

En total area beräknas till ca 1,85 m<sup>2</sup>, som motsvarar en person på 70 kg med längden 1,73 m. (Warfvinge, 1996) Innanför pappröret är ett mindre rör i metall placerat med en diameter på 160 mm och höjden 400 mm. I bottendelen, i det inre röret av personsimulatorens är glödlampa placerad. Denna placering förhindrar att den stora cylindern får en för hög ytemperatur som skulle leda till en orealistisk konvektionsström.

Värmeavgivningen från en person kan delas upp i en sensibel och en latent del. I försöken är det endast den sensibla delen som blir undersökt. Den består av konvektion och strålning. Den latent delen, som handlar om värmeenergi som frigörs när fukt från kroppen avdunstar, är svårare att återspegla. Den står inte för en temperaturökning (Rengholt, 1991). Den sensibla delen står för 75-95 W med en omgivningstemperatur på 20-25 °C för en stillasittande person i arbete. Röret har därför försetts med en glödlampa på 100 W. Denna är specialgjord för att motsvara mänsklig värmeavgivning.

Tiderna för när ett kontor är bemannat varierar under dagen. En arbetsdag är oftast 9 timmar, dock ter det sig inte troligt att kontoret är bemannat under samtliga dessa timmar. Under försöken förutsätts att ett särskilt arbetsmönster följs. Arbetsmönstret baseras på en studie gjord på närvaro under olika timmar på dygnet och veckodagar på ett kommunalt kontor med procentuell sannolikhet. En slumpgenerator används därefter för att avgöra ifall personen befinner sig i rummet eller inte. (Johansson, 2005)

Genom detta simulerade arbetsmönster kommer personlasten i försöken att ge maximal effekt vid sin närvaro på kontoret och ingen effekt vid frånvaro. Arbetsmönstret presenteras i tabell 2.

Tabell 2: Personsimulatorns närvaro

<b>Klockslag</b>	<b>Aktivitet/Effektvärde</b>
08.00-09.30	Bemannat (100W)
09.30-10.00	Obemannat (Paus) (0 W)
10.00-12.00	Bemannat (100W)
12.00-13.30	Obemannat (Lunch) (0 W)
13.30-15.00	Bemannat (100W)
15.00-15.30	Obemannat (Paus) ( 0 W)
15.30-17.00	Bemannat

#### *4.2.1.2 Datorutrustning*

För att motsvara en stationär dator och plattskärm motsvaras vardera av ett ventilationsrör av metall med glödlampa innanför. De yttre rören målas vita utvändigt för att bättre motsvara verklig strålningsavgivning. Båda ventilationsrören placeras på och under skrivbordet. Ventilationsrören mäter 200 mm i diameter, 400 mm höjd och är av samma anledning som för personsimulatorn försedda med ett 160 mm ventilationsrör med mindre diameter innanför med glödlampa. Glödlampan i simulatorn för den stationära datorn mäter en effekt av 60 W och i skärmsimulatorn finns en 30 W lampa. Datorutrustningen simuleras med full effekt under arbetsdagen, eftersom det bedömdes som osannolikt att vilolägesinställningen används i verklig kontorsmiljö under maximalt 90 minuters frånvaro.

#### *4.2.1.3 Fönstersimulator*

För att simulera ett fönster med solinstrålning används en uppbyggd panel. Denna består av en elektrisk värmekabel som placeras mellan två gipsskivor på 13 mm vardera. Skivorna mäter 2,3 m i längd och 0,9 m i bredd. Mellanrummet mellan skivorna försluts med tejp för att förhindra att luft sugas in och därmed skapar alltför stor konvektionsström.

Hela dagen simuleras med solinstrålningskurvan, även med soluppgång och solnedgång. Denna utgår från en studie baserad på maximal solinstrålning på 3,2 m<sup>2</sup> yta över en medeldag på året. Studien är gjord på förhållandevis klara och halvklara dagar och dagar som är helt mulna. Breddgraden motsvarar Oslos då denna var den sydligaste angivna breddgraden i studien.



Instrålningsvärdena från solkurvan är baserade på särskild solhöjd och azimut (riktning). Dessa data valdes för att basera kurvan för den 15:e augusti för det mest kritiska väderstrecket. Denna månad väljs då särskilt normala värden per timme påvisas i förhållande till årets övriga månader. Tabellvärden i studien anger solinstrålningen för respektive timme genom ett glas. Ett tre-glasfönster valdes med invändig avskärmning som gör att värmen huvudsakligen avges längs fönstrets insida istället för i rummet. I studien angavs en uträknad faktor på 0,82 som ska multipliceras med den framtagna solinstrålningen för att motsvara ett 3-glasfönster. (Blom et.al, 1992) Med användning av ParaSol, en mjukvara utvecklad av LTH, kunde ett g-värde beräknas till 0,201 med användning av avskärmningen ”Suncool Brilliant 30/17” som finns definierad i mjukvaran. Faktorn som utgör den del av solinstrålningen som återstrålas från golvet utlästes till 0,144. Om denna siffra dras ifrån g-värdet ges den solinstrålning som når fönstrets insida. Eftersom faktorn för solinstrålningen från golvet utgör en så liten del försummas denna i beräkningarna då den inte kunde återskapas med enkla medel. Denna lösning anses även vara relevant i samband med uppförande av nya kontorslokaler. Dessa värden inmatas därefter i en styrenhet som reglerar värmelasternas schema och effekt, där värmekabeln kontinuerligt regleras mellan 0 och 155 W genom en spänningsregulator för motsvarande effektvärde.

#### 4.2.1.4 Belysning

En verklig belysning används i form av en armatur placerad vid tak bakom skrivbordsutrymmet med två lysrör på 36 W vardera och ett armaturgods i metall.

Belysningen är tänd på full effekt under hela arbetsdagen, även då personen i rummet inte förväntas vara närvarande. Den är släckt från den tidpunkt arbetsdagen räknas som slutförd fram till kommande arbetsdag.

#### 4.2.2 Tidigare mätningar

Samtliga simulatorer användes i föregående studier, med undantag för personen. I den första studien användes under verklig arbetstid en verklig personlast som hade ett särskilt arbetsmönster under tre månader. (Svensson, 2004) I nästföljande studie utnyttjades en simulerad kontinuerlig personlast, som var aktiv under arbetsdagens alla timmar. (Rognes, 2012) Detta är således inte särskilt likt ett verkligt driftsfall med normal närvaro. I studierna beräknades fönstersimulatorens efter en solinstrålningskurva baserad på utvändigt avskärmning med effekt upp till maximalt 134 W. I dessa studier placerades en 50 mm djup Isoporskiva mellan panel och vägg för att undvika

transmissionsförluster genom väggen. Isoleringen i det nya försöksrummet bedöms ha tillräckligt låg värmeledningsförmågan för att inte nämnvärt påverkas av transmissionsförluster så länge temperaturavvikelsen är tillräckligt liten. Den används inte i nuvarande mätningar.

### 4.3 Tilluftsdonen

Två olika tilluftsdon testas för deplacerande ventilation. Ena varianten är en modell med väggkanal och av typen Swegon DIR-c-600 med väggkanal DIRT 4-600, som figur 10 visar. Denna placeras vid golvet intill dörren till rummet.



*Figur 10. Deplacerande golvdon med väggkanal från Swegon.*

Den andra deplacerande tilluftsventilen, AirSons Airshower, är ett väggmonterat deplacerande tilluftsdon med halvsfärisk luftutbredning. Tilluftsdonet placeras vid tak ovanför dörren, 20 cm under innertak, se figur 11. Placeringen är praktisk med enkel kanalanslutning till samlingskanaler i utrymmet utanför och med minimal påverkan i vistelsezonen.



*Figur 11. Deplacerande väggdon från Airson.*

Tanken med ventilen från Airson är att den kallare luften, utan att blanda ut sig nämnvärt med rumsluften, ska kunna falla ner mot golvet och därefter skapa deplacerande ventilation, precis som med andra deplacerande tilluftsventiler. Denna luft värms upp på vägen och risken för drag vid golvnivå är därför lägre än för ett traditionellt golvplacerat tilluftsdon.

De båda deplacerande tilluftsdonen placeras vid dörren och därmed med stort avstånd från skrivbordsutrymmet på ett område där personer sällan befinner sig mer än vid in- och utpassage. Således får tilluften goda möjligheter att värmas upp av rumsluft tills den når värmelasterna.

Det omblandande tilluftsdonet undersöks med modellen Swegon Colibri med anslutningslåda ALSd 125-200, se figur 12. Ventilationsdonet placeras mitt i rummet i taknivå med dysor riktade för radiell spridning.



*Figur 12; Omblandande takdon från Swegon.*

Tilluftsdonen ansluts till en kanal som leder luft via en roterande värmeväxlare från en angränsande uppvärmd lokal. Frånluftsdonet leder ut luften till samma lokal. I det angränsande utrymmet tillförs luften med vertikalt deplacerande tilluftsdon på hög höjd. Frånluftsdonet placeras strax ovanför skrivbordsutrymmet och består av en ventil som mäter 160 mm i diameter. I föregående försök har samma don använts med tillhörande anslutningar, däremot i anslutning till ett annat kanalsystem.

#### **4.4 Mätningar**

Mätningar genomförs på lufttemperatur och lufthastighet i rummet. Lufttemperaturen kommer senare att analyseras med tanke på verkningsgrad över mätperioden och lufthastigheten kommer att jämföras med hänsyn till

drag. Mätmetodikerna skiljer sig minimalt från föregående studier. Dock används bättre givare för mätning av lufthastighet.

Lufttemperaturen mäts på tre olika platser med mätinstrument placerade på metallstativ för höjderna 0,1 m, 1,1 m och 1,8 m. Höjderna är bestämda efter var intressanta temperaturavvikelser kan föreligga i vistelsezon. Mätningar sker även vid till- och frånluftsdonet samt utanför försöksrummet. Höjden 1,1 m väljs eftersom det är en höjd som motsvarar höjden för andningszon för en stillasittande människa. Höjden 1,8 m väljs som rimlig höjd för att motsvara en stående person.

Med hänsyn till kontorets storlek och de värmelaster som finns, väljs tilluftsmängden i samtliga fall till 35 l/s. Ventilationen ställs in för att nå balanserad ventilation, så att mängden tilluft motsvarar mängden frånluft. Tilluftstemperaturen sätts i samtliga fall till 18 °C som är en erfarenhetsmässigt vedertagen temperatur för att nå gynnsamma termiska förhållanden i rummet. Innan mätningarna utförs ska kontroll göras att tilluftstemperaturen kan hållas nästan konstant på  $18 \pm 0,2$  °C.

Det omgivande utrymmet har stora fönster riktade mot utsidan i västerläge med relativt kraftig solintrålning som följd. De är till stor del avskärmade med lamellgardiner. Klimatet utanför testrummet regleras därför för konstant rumstemperatur ( $18 \pm 1$  °C) med en maximal tillåten avvikelse på  $\pm 2$  °C. För att säkerställa en konstant miljö betjänar ett särskilt luftbehandlingsaggregat det omgivande utrymmet. Om försöken äger rum under soliga dagar kan det behövas komplettering med ytterligare rumskylare.

Under mätningarna kontrolleras temperaturen i det omgivande rummet. Denna givare är centralt placerad i utrymmet vid "sitthöjd", ca 1,1 m. Värdet kan sedan jämföras med en medeltemperatur i försöksrummet beräknad utifrån avlästa värden på givarna vid 1,1 m höjd. Genom denna jämförelse kan maximal temperaturavvikelse mellan de båda utrymmena säkerställas. Transmissions- och ventilationsförlusten från de omslutande ytorna till försöksrummet kan sedan beräknas.

Temperaturgivarna är anslutna till en styrenhet som registrerar temperaturen för aktuell tidpunkt. Styrenheten reglerar även tilluftstemperaturen samt till- och frånluftsflödet. Den översänder informationen till en mjukvara som simultant återger temperaturgivarnas värde illustrerat på respektive placering i försöksrummet i form av en situationsbild. Värdena utifrån temperaturgivarna registreras samtidigt i form av en kurva som anger temperaturen vid andningszonen samt för till- och frånluft. I mjukvaran presenteras även aktuellt värde på till- och frånluftsflöde. Mjukvaran i datorn beräknar kontinuerligt

temperaturverkningsgraden och en kurva för denna som funktion av tidpunkten skrivs. Simulatorerna i försöksrummet bidrar var och en med viss värmeeffekt som kan regleras efter önskemål med särskilda tidsintervall över dygnet. Solinstrålningskurvan är efter beräkningar även utvecklad och inlagd i denna styrenhet, som reglerar dess effekt över dagen. Värmelasternas effekt och aktivitet registreras även dessa kontinuerligt i en kurva som funktion av tidpunkten.

Mätningen av lufthastigheter görs vid tre punkter i försöksrummets längdled på höjderna 0,1 m och 1,1 m med samma placering som temperaturgivarna. Mätpunkten vid 0,1 m väljs eftersom maximal lufthastighet i ett rum har påvisats vid och under denna höjd över golvet. Höjden 1,1 m väljs eftersom den motsvarar en sittande människas höjd. Båda höjderna är därför intressanta i undersökning om drag föreligger. Utanför rummet mäts lufthastigheten före respektive försök vid samma mätpunkt som för temperaturgivaren.

När mätningarna för lufthastighet sker placeras givarna för hand i rummet varefter personen i fråga direkt lämnar rummet. Instrumentet får sedan vara igång i fem minuter innan avläsning på instrument sker utanför rummet. Genom denna procedur med kort tid mellan placering och avläsning kan luftrörelser och värmebelastning påverka mätningen. Denna påverkan anses dock vara marginell, varför mätning sker som beskrivits.

Den relativa fuktigheten mäts och registreras före mätperioden utan- och innanför försöksrummet.

I den föregående studien undersöktes temperaturvärden, utöver nämnda höjder, även på 0,6 m höjd. (Rognes, 2012)

## **4.5 Mätutrustning**

### **4.5.1 Nuvarande mätningar**

För temperaturmätning används 11 givare av typen PT1000 med gods av rostfritt stål och mätnoggrannheten  $\pm 0,1^\circ \text{C}$ . Styrenheten som kontinuerligt tar emot informationen är utvecklad av Bastech av typen BAS2 XE16 – COM. Samtliga givare kalibreras före mätning genom att de samlas tätt ihop och sänks ner i ett 10 liters vattenkärl, där den relativa temperaturen kontrolleras och kalibreras enligt ett schema. Efter försöken verifieras kalibreringen. Temperaturen i utrymmet utanför försöksrummet uppmäts med en temperaturgivare som registrerar temperaturen kontinuerligt. Denna kalibreras inte som givarna placerade i försöksrummet, då den anses vara av liten betydelse för analysen. (Ref: Dan Kristensson, 2014).

Samtliga temperaturgivare är anslutna till en gemensam mottagare som är programmerad att registrera temperaturen under försöksperioden var femte sekund.

Mätning av lufthastigheter sker med hjälp av tre riktningsoberoende givare av typen SWEMA 03 med mätnoggrannheten  $\pm 0,03$  m/s vid 0,05-1,0 m/s vid temperaturen 23 °C. Avläsning sker vid maximalt rådande lufthastighet inom 15 sekunders avläsning. Kalibrering sker genom att samla instrumenten och justera hastigheten i respektive mottagare för att ge överensstämmande mätvärde. Mätningen av relativ fuktighet sker med hjälp av en givare utvecklad av Termokon av typen LCN-FTK140VV med mätnoggrannheten  $\pm 3\%$  mellan 20-80 % relativ fuktighet.

#### 4.5.2 Tidigare mätningar

I de försök som utfördes i samband med de föregående studierna gjordes mätningar på temperatur och lufthastighet med instrument av typen TSI 9555-P med en 964-probe. Mätnoggrannheten för instrumentet är  $\pm 0,3^\circ$  C.

### 4.6 Försöksprocedur

Innan mätningarna utförs ska följande kontroller utföras:

- Tilluftstemperaturen ska kunna hållas konstant på  $18 \pm 0,2$  °C.
- Den relativa fuktigheten ska mätas och registreras utan- och innanför försöksrummet och hålla cirka 60 %.
- Utanför rummet mäts lufthastigheten och kontrolleras att hålla låg nivå, det vill säga  $\leq 0,03$  m/s.

Situationsbilderna är samtliga tagna under eftermiddagstid med samtliga värmelaster aktiverade. Försöken som ligger till grund för studien kommer att utföras enligt schemat i tabell 3.

Tabell 3. Försöksupplägg inför första testomgången.

Försök	Vent.princip	Tilluftsdon	Tilluftstemperatur	Tilluftsfloöde	Försökstid
1:1	Deplacerande ventilation	Väggdon, AirSon	+18 °C	130 m <sup>3</sup> /h	9 h
1:2	Deplacerande ventilation	Golvdon, Swegon	+18 °C	130 m <sup>3</sup> /h	9 h
1:3	Omblandande ventilation	Takdon, Swegon	+18 °C	130 m <sup>3</sup> /h	9 h

Samtliga försöks utförs under ett dygn. Dock presenteras resultatet endast för 9 h, mellan kl. 08:00 och kl. 17:00, för att lättare få en överblick av resultatet för en arbetsdag samt för att stationära förhållanden ska säkerställas.

Utanför testrummet skall konstant rumstemperatur ( $18 \pm 1$  °C) råda. Maximal tillåten avvikelse i förhållande till försöksrummets medeltemperatur i vistelsezonen får vara  $\pm 2$  °C.



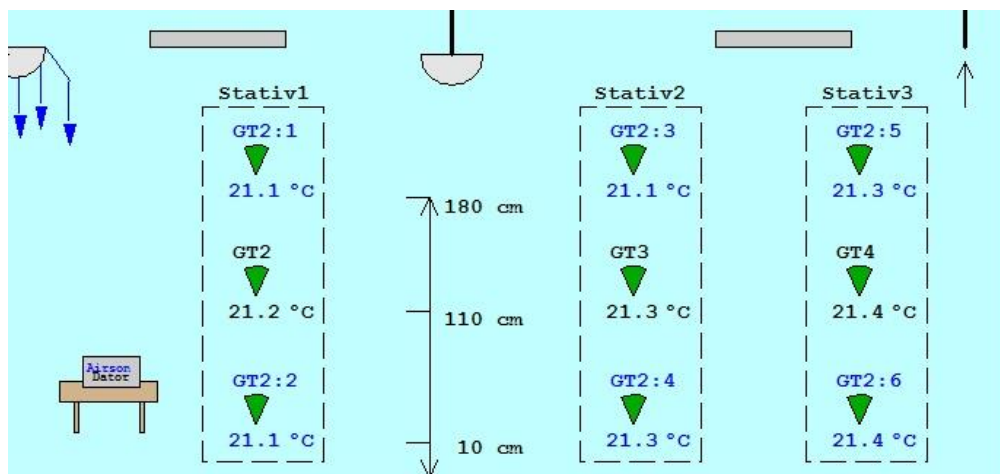


## 5 Resultat

Mätningarna gick ut på att undersöka temperaturen över en arbetsdag i ett försöksrum med variabla värmelaster för att utvärdera det termiska klimatet. Mätningarna utfördes med användning av två ventilationsprinciper och tre olika tilluftsdon. Därefter beräknades en temperaturverkningsgrad som ett mått på ventilationseffektiviteten för att kunna utvärdera hur effektivt eventuella föroreningskällor kan transporteras ut ur rummet. Utöver detta undersöktes lufthastigheterna för att säkerställa att termisk komfort uppfylldes.

### 5.1 Kontroll före mätning

Till att börja med gjordes en temperaturmätning där det kontrollerades att temperaturgivarna förhöll sig inom minimalt intervall. Detta gjordes genom att invänta ett jämviktstillstånd i försöksrummet utan användning av värmelaster eller rådande luftflöde genom rummet. Situationsbilden i figur 13 visar temperaturgivarnas värde då ingen värmelast är aktiverad. Givarna i jämnhöjd borde här ge lika temperatur eftersom ingen influens råder av något tilluftsdon. Avvikelsen på  $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  fick accepteras. Utifrån temperaturgivarnas bruksanvisning är mätonoggrannheten  $\pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .



Figur 13; Situationsbild i jämviktstillstånd efter kalibrering av temperaturgivare, utan rådande ventilationsflöde eller värmelaster.

## 5.1 Första försöksomgången

De inledande mätningarnas resultat avvek stundtals avsevärt från vad som förväntades. Under bilagor presenteras de fullständiga mätresultaten. En felsökning påbörjades där en del brister upptäcktes som kunde vara bidragande orsak. Här beskrivs resultaten i helhet samt de justeringar som följde.

### 5.1.1 Försök 1:1 – Vertikalt deplacerande ventilation

I första testomgången undersöktes vertikalt deplacerande ventilation. Det användes 130 m<sup>3</sup>/h i ventilationsflöde genom försöksrummet och en konstant tilluftstemperatur på 18 °C. Kriteriet för temperaturen utanför rummet (18±1 °C) lyckades inte uppfyllas utan avvek med 2 °C. Däremot var temperaturskillnaden mellan försöksrummets in- och utsida endast 1 °C. Temperaturavvikelserna torde inte ha haft någon större inverkan.

Temperaturvariationen i tilluft, frånluft och andningszonen var under arbetsdagen någorlunda stabil trots inverkan av de variabla värmelasterna. Medeltemperaturen i andningszonen kom att bli mot förväntningarna, 20,7 °C och 21,4 °C i frånluften. Temperaturskillnaden mellan golv och tak vid andningszonen blev 1 °C vilket någorlunda motsvarar vad som förväntades, då temperaturgradienten i litteraturen är ganska markant.

Däremot gav temperaturverkningsgraden ett sämre resultat än förväntat. Den förhöll sig under dagen på värden mellan 1,25 och 1,3. Med andra ord var temperaturen vid andningszonen för hög med det värde som påträffades vid frånluften. Trots att temperaturen blev behaglig i vistelsezonen kyldes värmekällorna inte i tillräcklig grad. Enligt tidigare mätningar bör värden överstigande minst 1,6 påträffas. Detta gav alltså en indikation på att borttransporten av föroreningar från rummet var sämre än förväntad.

### 5.1.2 Försök 1:2 – Konventionellt deplacerande ventilation

I testomgången som följde undersöktes konventionellt deplacerande ventilation med tilluftsdon placerat vid golvnivån. Samma förutsättningar förelåg gällande flöde och tilluftstemperatur. Under arbetsdagen kunde även här en stabil temperaturvariation skönjas med en medeltemperatur i andningszonen på 20,5 °C. Skillnaden i temperatur mellan in- och utsida var endast 1 °C, trots att kriteriet för temperaturförhållandena utanför försöksrummet (18±1) °C överskreds med 1 °C. Vad som även här gav oroväckande resultat var att temperaturverkningsgraden enligt tidigare studier inte borde ha skiljt sig i alltför hög grad från försöket med vertikalt

deplacerande ventilation. Den hölls som regel på värden kring 1,27 över dagen och borde därför ha haft gemensamma parametrar med det andra deplacerande tilluftsdonet som påverkat resultatet.

### 5.1.3 Försök 1:3 – Omblandande ventilation

I den tredje och sista mätningen undersöktes omblandande ventilation. Temperaturvariationen var även här stabil på ca 20,9 °C i andningszonen och 21,3 °C i frånluften. I situationsbilden över rummet kunde även en någorlunda jämn temperatur urskiljas. Vad som här avvek från litteraturen var att temperaturen i frånluften var svagt högre än vid andningszonen. Med ett relativt kort avstånd mellan till- och frånluftsdonet bör 'kortslutningseffekten' av tilluft ha bidragit med en svagt lägre temperatur vid frånluften än i övriga delar av rummet. Detta berodde på att luftströmmen från tilluftsdonet inte kunde utnyttja sin coanda-effekt vid takytan utan föll mot värmelasterna nedanför och skapade ett feldimensionerat system. Detta kunde verifieras med rök och var troligtvis anledningen till att temperaturverkningsgraden hade värden över 1. I övrigt skilde sig temperaturen mellan försöksrummets in- och utsida 2 °C och även här överskreds kriteriet ( $18 \pm 1$  °C) med 3 °C för temperaturen utanför försöksrummet. Detta var den högsta påträffade avvikelserna mellan mätningarna. Detta kan även ha haft en viss inverkan på resultatet.

### 5.1.4 Justeringar

Efter en felsökning kunde ett antal parametrar konstateras som har haft viss inverkan på resultatet. En del var endast små misstag som kan ha fått stora konsekvenser. Eftersom samtliga justeringar gjordes samtidigt, före nästföljande försöksomgång är det svårt att bedöma i vilken grad dessa parametrar har kunnat påverka.

En allmän förändring som gjordes var att öka tilluftsflödet från 130 m<sup>3</sup>/h till 140 m<sup>3</sup>/h för att få ett snabbare flöde genom rummet och därmed en effektivare ventilation. Detta utgjorde endast en liten förändring och bedömdes inte påverka risken för drag. Däremot kunde vissa förbättringar urskiljas vad gäller temperaturverkningsgraden med ett snabbare flöde. Därför bedömdes detta vara en rimlig justering.

Spjället som reglerar till- och frånluftsflödena felsöktes och det kunde konstateras att frånluftsspjället inte tillät lika stort flöde som tilluftsspjället. Detta kalibrerades så att flödet blev lika. I tidigare tester har inte luftflödet kunnat ledas ut i lika hög grad som det tillförs vilket leder till en viss

uppvärmning i rummet, eftersom konvektionsströmmarnas bidragande värme inte evakueras så effektivt som tänkt.

I kanalen till tilluftsdonet upptäcktes dessutom ett luftläckage, som kan ha bidragit till ett lägre tilluftsflöde. Detta kan till viss del ha varit till oförväntad fördel med tanke på att frånluftsspjället var kalibrerat för ett alltför svagt flöde i testerna. Luftläckaget i kanalen borde ha gett utslag i styrenheten men detta gjordes inte eftersom flödesmätaren var placerad längre bak i tilluftskanalen. Eftersom luftläckaget påträffades längre fram i kanalen var luftflödet redan reglerat och registrerat. Allt luftläckage åtgärdades och därefter mättes luftflödet längst fram i tilluftsröret närmast donet för hand som försäkran att rätt mängd nådde fram.

I styrenheten som används till mätningarna upptäcktes att det omblandande ventilationsdonets spridningsbild var inställd på "halvt don". Denna inställning är utvecklad för att återge spridningsbilden för ett halvsfäriskt deplacerande tilluftsdon, i detta fall alltså för ett vertikalt deplacerande tilluftsdon. Inställningen kan därför ha bidragit till en felaktig spridningsbild då det omblandande tilluftsdonet är placerat vid tak mitt i rummet och är konstruerat för spridning åt alla håll.

För att kunna se hur luftströmmarna rörde sig användes en rökmaskin. Således kunde det urskiljas hur och åt vilket håll ventilationsluften rörde sig. Med hjälp av röken upptäcktes att tilluftsstrålen som ska klistras längs taket för det omblandande luftdonet hindrades till viss del av lysrörsarmaturen som hängde ner ca 10 cm från takytan. För att förhindra detta togs lysrörsarmaturen ner. Ett löst problem ledde däremot till ett annat, då en värmeeffekt på 72 W togs bort. Tanken var därför att simulera en användning av LED-belysning där värmeeffekten eventuellt kunde försummas, men den uppvärmande effekten torde enligt energimyndigheten ändå motsvara närmare 30 W. En korrekt justering hade varit att fälla in en annan typ av belysning eller sänka armaturen med vajrar, men detta gavs det inte tid till. Detta kan till viss del ha påverkat mätningarna i kommande testomgångar, då den sammanlagda värmeeffekten kan varit för låg för att simulera ett typkontor för en person och därmed bidra med en för svag sammanlagd uppvärmning i rummet.

Det omblandande tilluftsdonet hängde även ca 10 cm ner från takytan i testerna. Genom att noggrannare fälla in tilluftsdonet i taket kunde luften få en bättre spridning och omblandning i rummet, då tilluften lättare kunde klistras längs takytan i rummet. Den borttagna armaturen och det mer noggrant infällda tilluftsdonet medgav nu en placering längs takytan, där det nu inte längre fanns som hindrade luften att släppas från dess klistring. Därigenom bidrog förändringen till en effektivare luftström och en bättre omblandning.

## 5.2 Andra försöksomgången

Nästa omgång tester kom att genomföras utifrån nedanstående schema och förutsättningar, enligt tabell 4.

Tabell 4. Försöksupplägg inför andra testomgången.

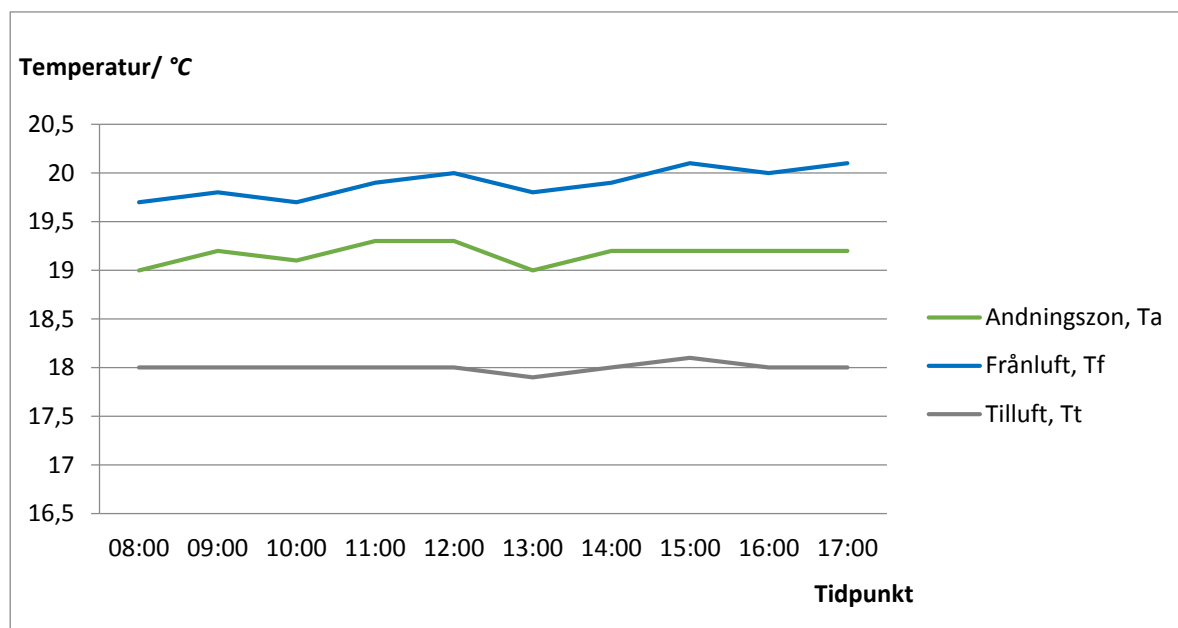
Försök	Vent.princip	Tilluftsdon	Tilluftstemp	Tilluftsflo	Försökstid
2:1	Deplacerande ventilation	Väggdon, AirSon	+18 °C	140 m <sup>3</sup> /h	9 h
2:2	Deplacerande ventilation	Golvdon, Swegon	+18 °C	140 m <sup>3</sup> /h	9 h
2:3	Ombländande ventilation	Takdon, Swegon	+18 °C	140 m <sup>3</sup> /h	9 h

### 5.2.1 Försök 2:1 – Vertikalt deplacerande ventilation

Det första ventilationsutförandet att undersöka är, såsom i föregående testomgång, vertikalt deplacerande ventilation. Tilluftsdonet placeras här ovanför dörren till vänster, se figur 14. Förhoppningen var att efter justeringarna som gjordes uppnå en bättre ventilationseffektivitet. Inför mätningen kontrollerades att tilluftstemperaturen stabiliserades inom intervallet 18±0,2 °C. Den relativa fuktigheten utanför försöksrummet kontrollerades och uppmättes till 60 %. Inne i försöksrummet var den 61 %. Lufthastigheten utanför försöksrummet uppmättes till 0,02 m/s.

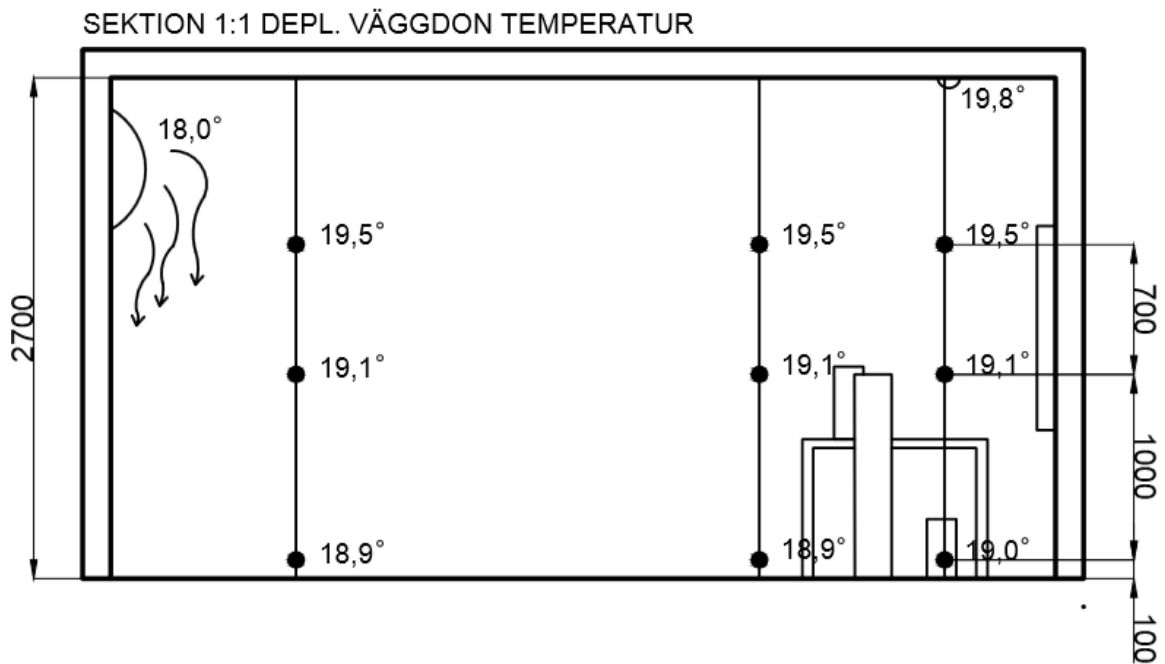
### 5.2.1.1 Temperaturvariation

I figur 14 presenteras resultatet av temperaturvariationen över arbetsdagen.



Figur 14. Försök 2:1, temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.

Utifrån resultatet kan någorlunda jämna värden utläsas trots inverkan av variabla värmelaster. En medeltemperatur påträffas över dagen på 19,2 °C. En ganska svag temperaturgradient med en temperaturskillnad på 1 °C från golv till tak kan utläsas. Detta tillsammans med den särskilt låga temperaturen i andningszonen, är förmodligen en följd av den något försvagade uppvärmningen i rummet i samband med denna testomgång. Detta är även ett positivt resultat sett utifrån termisk komfort, då temperaturavvikelsen i höjddled gärna ska understiga 2 °C / m. Vad som är särskilt intressant är de svaga temperaturförändringarna under de tider som personlasten slås på och av. Dessa regleras ganska följsamt såväl i andningszonen som i frånluften och därmed temperaturgradienten. Undersökningen med tillsättning av rök visar att skiktningen mellan den renare zonen och den omblandande zonen ligger strax under taknivån i rummet. I litteraturen anges att skiktningen ska befinna sig strax ovanför andningszonen i ett perfekt dimensionerat system. Detta kan endast åstadkommas om konvektionsströmmarnas höjd beräknas, och detta är för avancerat med användning av variabla värmelaster. I figur 15 kan en situationsbild utläsas från en eftermiddag med samtliga värmelaster igång, då temperaturen är svagt ökande med höjden i rummet och återspeglar en något svagare karakteristisk deplacerande ventilationsprincip.



Figur 15. Situationsbild av temperaturen i °C i förhållande till höjden i mm över golvnivå.

Andningszonens medeltemperatur,  $T_{a,medel}$ : 19,2 °C

Frånluftens medeltemperatur,  $T_{f,medel}$ : 19,9 °C

Tilluftens medeltemperatur,  $T_{t,medel}$ : 18,0 °C

### 5.2.1.2 Temperaturverkningsgrad

Följande samband råder:

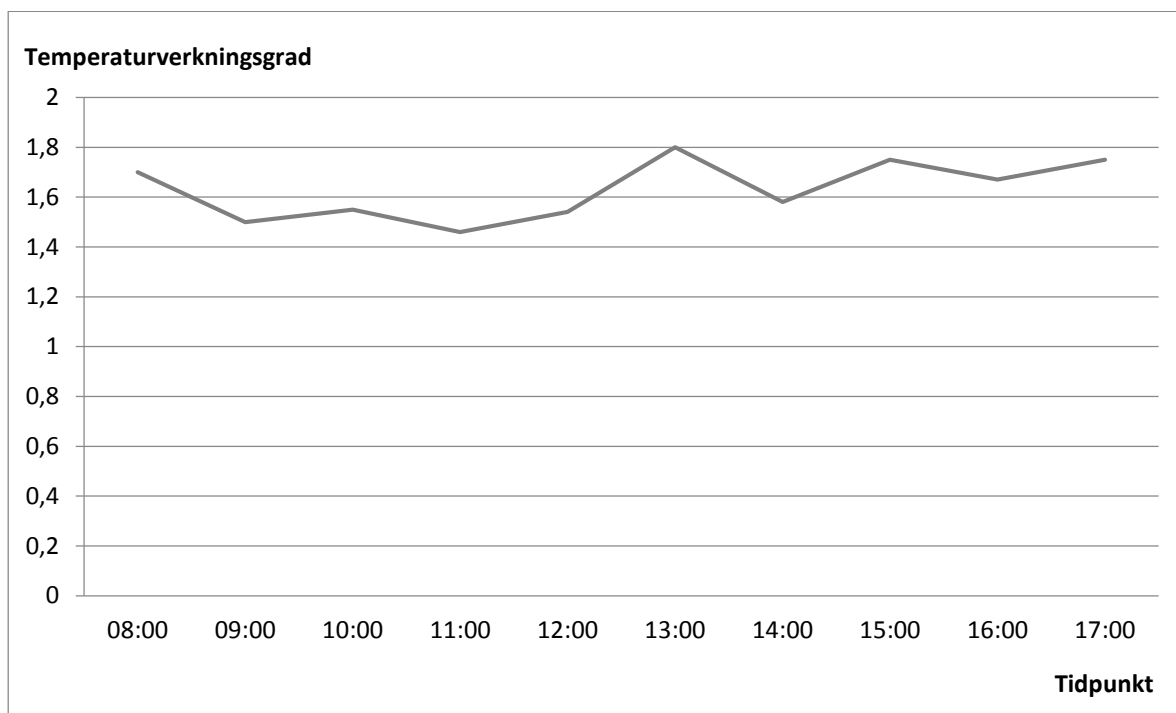
$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen



*Figur 16; Försök 2:1, temperaturverkningsgrad över arbetsdagen i förhållande till tidpunkten i andningszonen.*

Andningszonens medeltemperaturverkningsgrad,  $\varepsilon_T$ : 1,62.

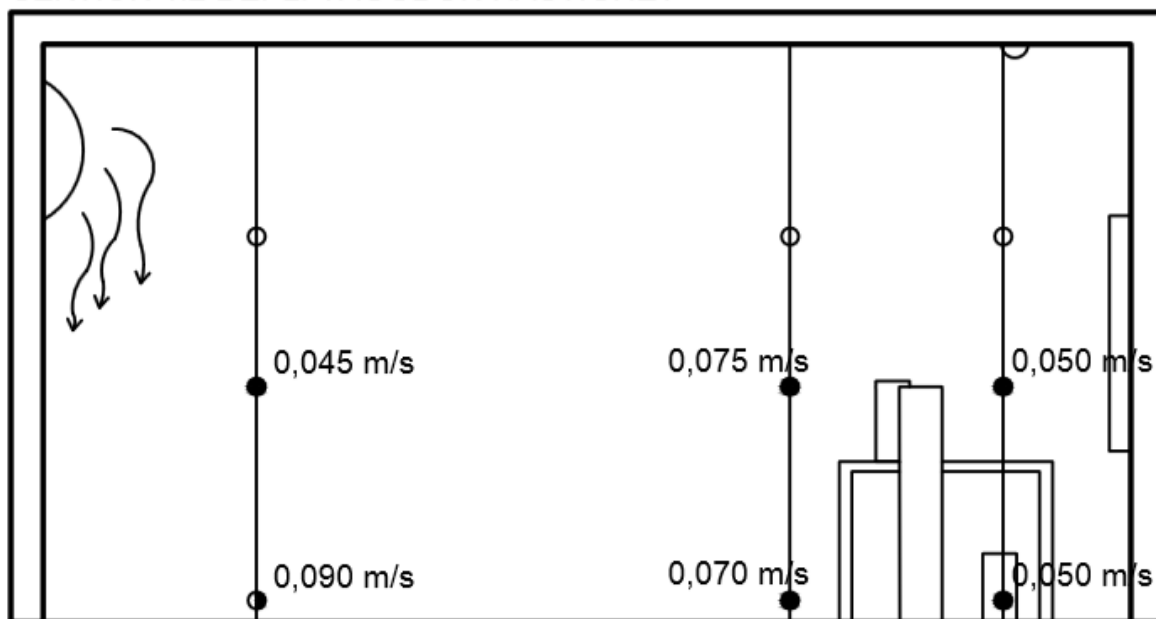
Efter justeringarna kunde en betydligt förbättrad temperaturverkningsgrad utläsas, utifrån figur 16, på ca 1,6 över arbetsdagen. Maxvärdet, ca 1,8, påträffas mitt på dagen. Detta beror på att temperaturen i vistelsezonen tillfälligt minskas på grund av att personsimulatorens slås av. Samtidigt är temperaturen i frånluften relativt oförändrad, vilket bidrar till en ökad temperaturverkningsgrad. I övrigt är temperaturvariationen i frånluften och andningszonen över tiden endast skild av enstaka tiondelar. Det gör att noggrannare slutsatser kring de variabla värmelasternas påverkan på temperaturverkningsgraden blir alltför svåra att dra.



### 5.2.1.3 Lufthastighet

Mätningen av lufthastigheten genomfördes på samma punkter som temperaturgivarna, men eftersom rummet är tänkt för en sittande person, valdes höjden 1,1 m. Utöver det gjordes mätningarna vid golv, då risken för drag förväntas vara högst där. I figur 17 presenteras lufthastigheterna i en situationsbild för respektive punkt.

SEKTION 1:2 DEPL. VÄGGDON HASTIGHET



Figur 17: Lufthastigheten i förhållande till höjd över golvnivå.

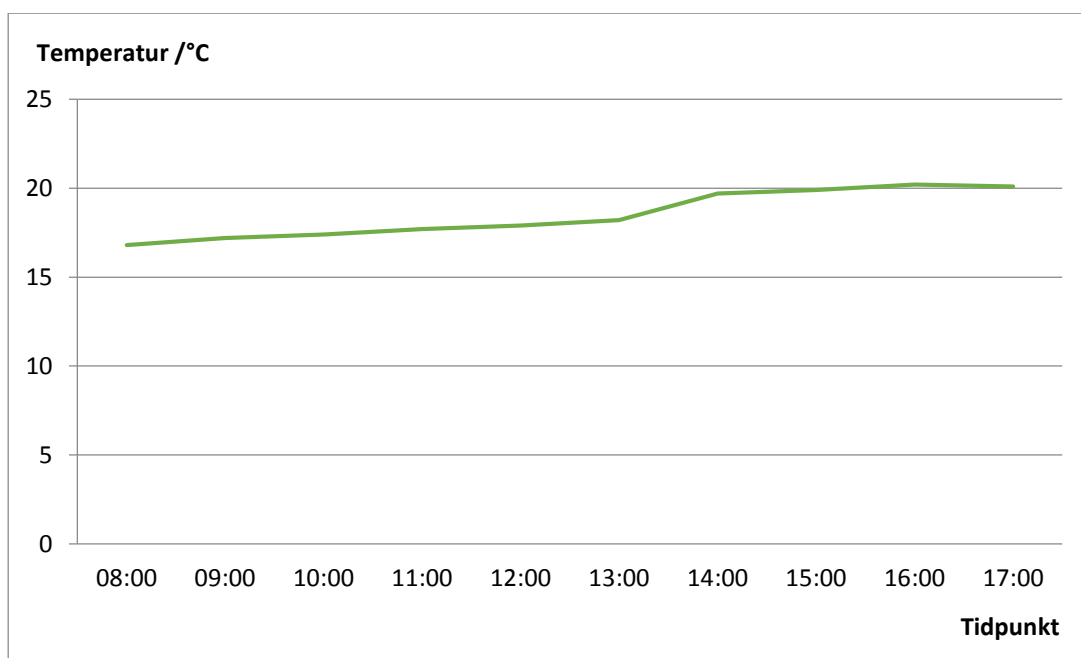
Lufthastigheten når högst värde vid golvnivå närmast tilluftsdonet. Den ligger trots detta ordentligt under gränsvärdet 0,2 m/s. Över detta gränsvärde kan drag upplevas, vilket främst torde bero på accelerationen i den fallande, tillföra luften. Vid vistelsezonen nås väldigt behaglig lufthastighet. Efter att den tillförda luften har kommit i kontakt med de närmsta värmekällorna tycks hastigheten minska något.

#### 5.2.1.4 Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum

Det är av även av intresse att undersöka temperaturskillnaden mellan försöksrummet och det omslutande rummet. Detta beror på att en för stor skillnad kan bidra till att förändra temperaturvärdena i försöksrummet på ett oönskat sätt genom att värme transmitterats in till eller ut från försöksrummet.

Ett kriterium på att det omslutande rummet ska hålla  $18 \pm 1$  °C visade sig vara svårt att uppnå även i denna testomgång. Temperaturen avvek med ca 1 °C och kan ha haft en mindre påverkan på resultatet. En kylanordning för att säkerställa detta planerades men kunde inte ordnas av tidsskäl. Därför fick denna avvikelse accepteras.

Temperaturen i det omslutande rummet är långsamt stigande under dagen, se figur 18. Detta beror troligtvis på ökad solinstrålningen trots användning av invändig avskärmning. En medeltemperatur utanför beräknas till 18,5 °C. I försöksrummet beräknas medeltemperaturen till 19,2 °C. Med medeltemperaturerna i beräkning blir avvikelsen endast 0,7 °C och underskrider den maximala temperaturavvikelsen mellan de båda rummen.



Figur 18. Försök 2:1, temperaturvariationen utanför försöksrummet över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.

Medeltemperaturen i det omslutande rummet,  $T_{medel,ute}$ : 18,5 °C.

Medeltemperatur i försöksrummet,  $T_{medel,inne}$ : 19,2 °C.

Temperaturavvikelsen mellan ut- och insida,  $\Delta T$ : 0,7 °C.

### 5.2.1.5 Sammanfattning

Inför testomgången önskades särskilt att en förbättrad temperaturverkningsgrad kunde urskiljas. Efter mätningen kan det konstateras att detta uppfyllts. Av de justeringar som gjordes inför testomgången är det troligtvis den svaga ökningen av flödet i rummet och den korrekt dimensionerade frånluften tillsammans med en noggrannare tätning av tilluften som gav de förbättrade resultaten.

Vad som också kan ha kommit att påverka resultatet positivt var den minskade avgivna värmeeffekten i rummet till följd av den borttagna lysrörsarmaturen. Detta ledde till en minskad total uppvärmning. Temperaturskillnaden mellan frånluften och andningszonen blev lika stor i båda mätningarna med samma tilluftstemperatur. Utifrån sambandet för temperaturverkningsgrad kan slutsatsen dras, att värdet blir känsligare och mer föränderligt ju mindre temperaturen i andningszonen och frånluften avviker från tilluftens temperatur. I denna mätning blir skillnaden relativt liten för båda differenserna i sambandet. Detta leder till stora förändringar i temperaturverkningsgrad med ganska små förändringar i temperatur.

Med tillsättning av rök kunde det urskiljas en skiktning av en nedre, omblandande zon och en övre, renare zon först vid taknivån. Detta kan vara en viss indikering på att systemet är överdimensionerat för att ersätta värmelasternas konvektionsströmmar i rummet. Litteraturen anger att skiktningen ska ske redan ovanför andningszon.

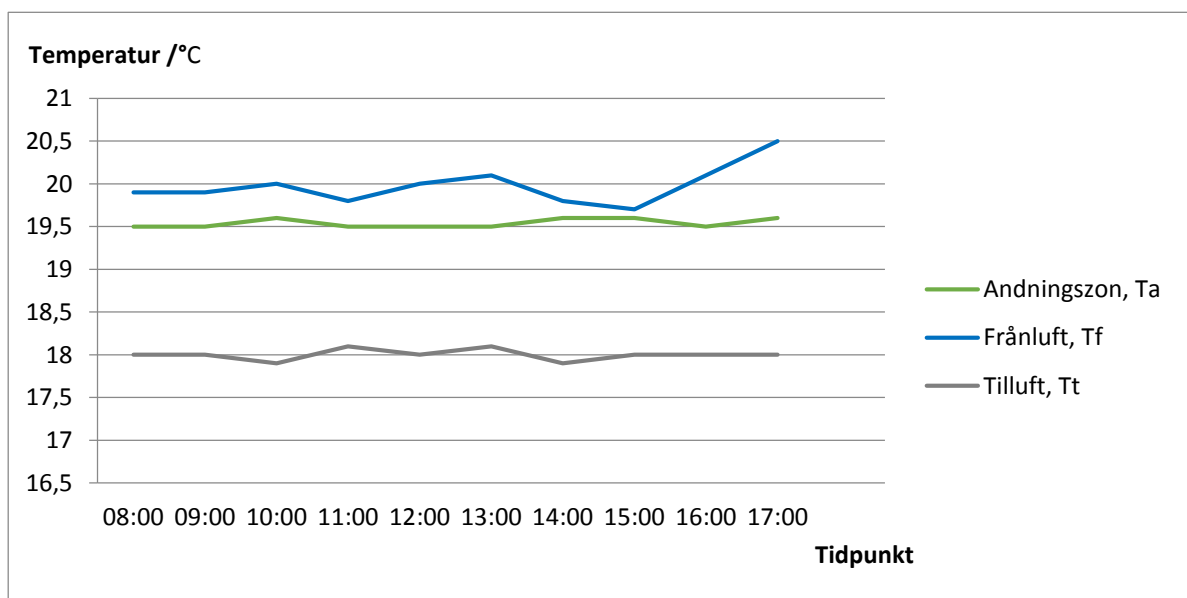
### 5.2.2 Försök 2:2 – Konventionellt deplacerande ventilation

Ventilationsutförandet, vilket undersöktes härnäst, var konventionellt deplacerande ventilation. Tilluftsdonet placerades intill dörren vid golvnivå till vänster i figur 20. I föregående mätomgång uppnåddes en relativt svag temperaturverkningsgrad mot vad som förväntades. Denna var inte tänkt att avvika nämnvärt i mätningen från vertikalt deplacerande ventilation. Även inför den nya mätningen bör därför justeringar som påverkade det andra utförandet vara till fördel.

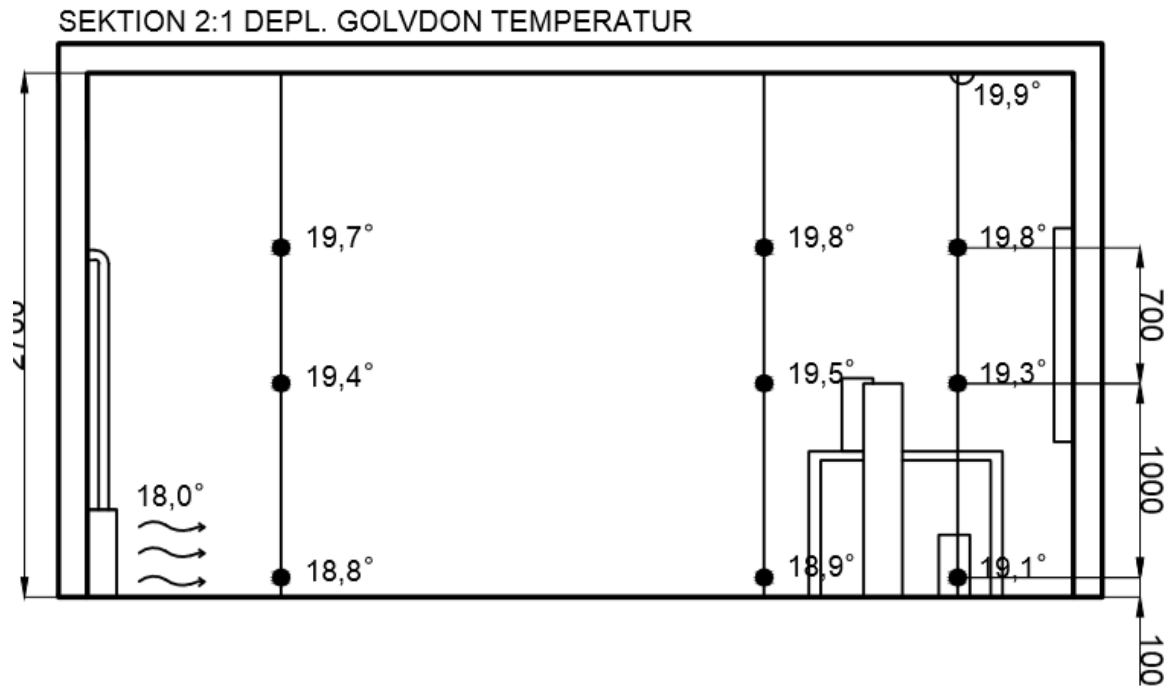
Inför mätningen kontrollerades det att tilluftstemperaturen stabiliserades inom intervallet  $18 \pm 0,2$  °C. Den relativa fuktigheten kontrollerades utanför försöksrummet och mätte 60 %. Innanför försöksrummet mätte den 61 %. Lufthastigheten utanför försöksrummet uppmättes till 0,02 m/s.

### 5.2.2.1 Temperaturvariation

Över arbetsdagen kan en oerhört jämn temperaturvariation skönjas vid andningszonen, se figur 19. Temperaturen är även svagt högre här jämfört med mätningen av vertikalt deplacerande ventilation. Temperaturen i frånluften var däremot inte lika följsam som i fallet för vertikalt deplacerande ventilation. Detta kan bero på de variabla värmelasterna. Under tiden personlasten är fränkopplad bidrar inte de sammanlagda konvektionsströmmarna med lika mycket värme. Eftersom tilluftsflödet egentligen ska vara dimensionerat att ersätta konvektionsströmmarna kan detta leda till att ersättningsluften mättar de värmelaster som är aktiverade, medan den återstående ersättningsluften blir kvar i den nedre delen av rummet, där den succesivt värms upp av omgivande luft innan den stiger. Detta bidrar till en svagt försämrad luftcirkulation jämfört med när samtliga värmelaster är igång.



Figur 19. Försök 2:2, temperaturvariationen över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i förhållande till tidpunkten.



Figur 20: Situationsbild av temperaturen i °C i förhållande till höjden över golvnivå.

Andningszonens medeltemperatur,  $T_{a,medel}$ : 19,5 °C.

Frånluftens medeltemperatur,  $T_{f,medel}$ : 20,0 °C

Tilluftens medeltemperatur,  $T_{t,medel}$ : 18,0 °C.

Situationsbilden i figur 20 återspeglar någorlunda karaktären av ett deplacerande system. Däremot bildas en relativt svag temperaturgradient, då frånluftstemperaturen endast är 0,5 °C högre än vid andningszonen.

### 5.2.2.2 Temperaturverkningsgrad

Undersökningen av temperaturverkningsgrad är presenterad i figur 21.

Följande samband råder:

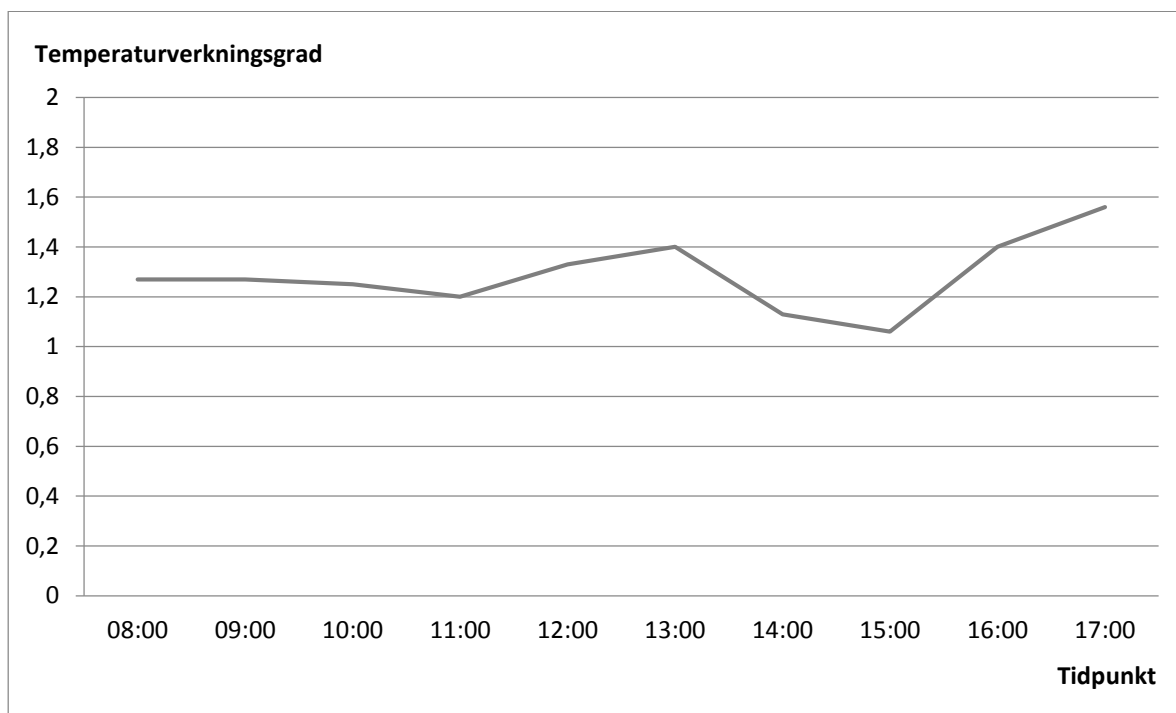
$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen



Figur 21. Försök 2:2, temperaturverkningsgrad över arbetsdagen i förhållande till tidpunkten i andningszonen.

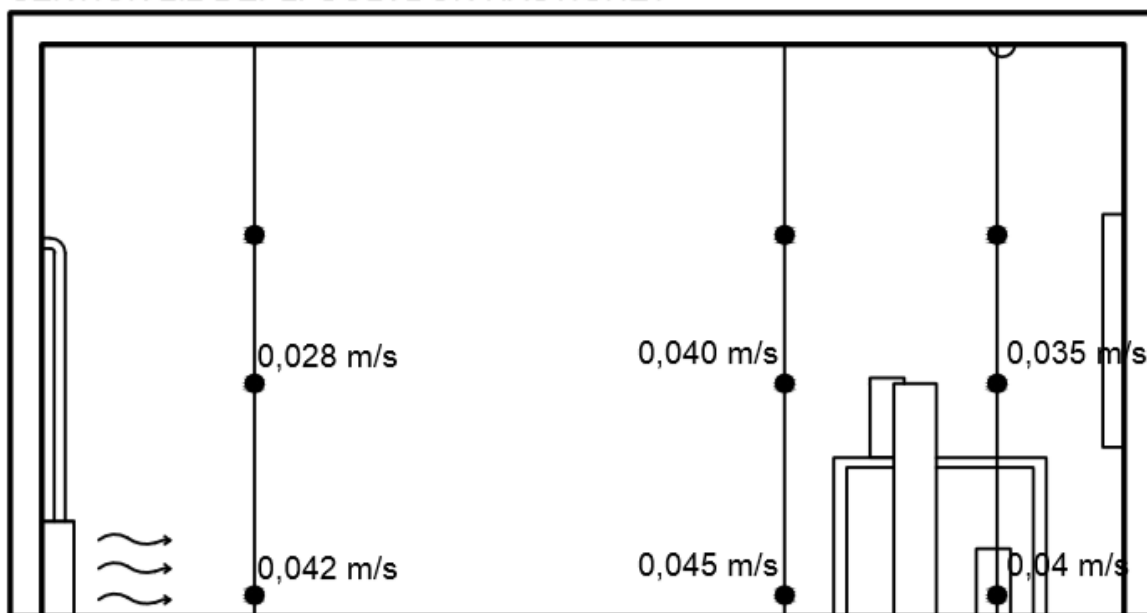
Andningszonens medeltemperaturverkningsgrad,  $\varepsilon_T$ : 1,29.

Temperaturverkningsgraden visade sig till vår förvåning vara ungefär lika låg som i föregående mätomgång. I figur XX varierar denna stort över arbetsdagen, från 1,25 på morgonen till som högst i mitten och slutet på dagen och som lägst nära 1 under eftermiddagen. Vad som troligtvis ligger till grund för detta är att temperaturen i andningszon och frånluft inte alls är lika följsam under dagen. Detta kan som beskrivet i avsnitt 5.2.2.1, bero på de variabla värmelasterna, för vilka det vertikalt deplacerande ventilationsutförandet hanterar bättre. Som nämnts i avsnitt 5.2.1.5 kan även den i allmänhet svaga uppvärmningen av rummet påverka resultatet och ge viss känslighet när temperaturavvikelserna är så små mellan tilluft, frånluft och andningszonen.

### 5.2.2.3 Lufthastighet

Mätningen av lufthastigheten skulle ge svar på om risken för drag i rummet eventuellt förändrats mot vertikalt deplacerande ventilation. En situationsbild som illustrerar resultatet från mätningen presenteras i figur 22.

## SEKTION 2:2 DEPL. GOLVDON HASTIGHET

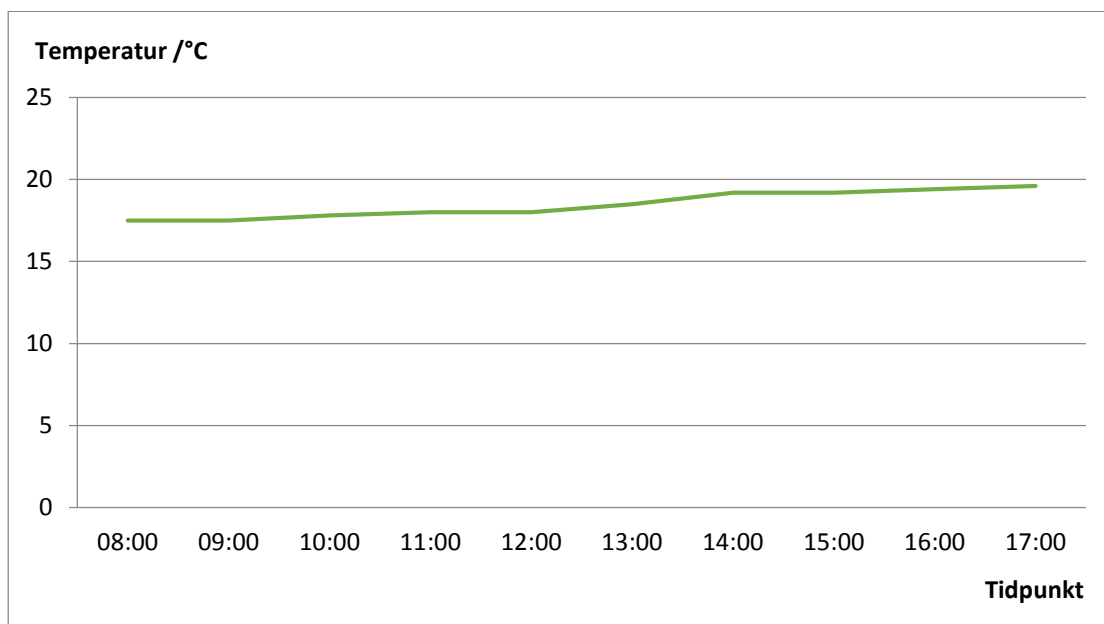


Figur 22. Lufthastigheten i förhållande till höjd över golvnivå.

Högst värde uppmäts vid golvnivån och behåller hastigheten till stor del även vid mötet med värmelasterna, som trots detta ligger ordentligt under gränsvärdet 0,2 m/s, från vilket drag kan upplevas. Lägsta värdet anträffas på 1,1 m på mätstängens närmast tilluftsdonet. Detta kan bero på att den tillförda luften förflyttar sig under denna punkt. Genom hela rummet kan däremot en svagt lägre lufthastighet skönjas än vid vertikalt deplacerande ventilation.

### 5.2.2.4 Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum

I figur 23 presenteras mätresultatet av temperaturvariationen i det omslutande rummet. Såsom i föregående mätning kom temperaturen att svagt stiga under dagen, förmodligen på grund av den ökade solinstrålningen. Detta ledde till att det uppsatta kriteriet ( $18 \pm 1$  °C) överskreds. En jämförelse av medeltemperaturerna utan- och innanför försöksrummet över arbetsdagen ger däremot en avvikelse på endast 1 °C och bör inte ha påverkat mätningen i högre grad.



Figur 23. Försök 2:2, temperaturvariation utanför försöksrummet över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.

Medeltemperaturen i det omslutande rummet,  $T_{medel,ute}$ : 18,5 °C

Medeltemperatur i försöksrummet,  $T_{medel,inne}$ : 19,5 °C.

Temperaturavvikelsen mellan ut- och insida,  $\Delta T$ : 1 °C.

### 5.2.2.5 Sammanfattning

Mätningen gällande konventionellt deplacerande ventilation kom att ge ett sämre resultat än förväntat sett till temperaturverkningsgraden. Den förväntades ligga på samma nivå som för vertikalt deplacerande ventilation men var alltför varierande och avvek stundtals markant. Undersökningen med tillsättning av rök visade att skiktningen mellan den nedre, renare zonen och den övre, omblandande zonen låg på en mycket hög nivå i rummet, däremot vid en svagt lägre nivå än för vertikalt deplacerande ventilation.

### 5.2.3 Försök 2:3 – Omblandande ventilation

Det tredje och sista systemet att undersökas, omblandande ventilation, utgår från en helt annorlunda princip mot deplacerande ventilation. I den förra testomgången påträffades en del brister mot vad som beskrivs i litteraturen. I huvudsak var temperaturen i andningszonen lägre än i frånluften. Här ska en viss kortslutning av tilluften bidra till en kylning vid frånluften. Förutom detta kunde det med rök urskiljas att en del av den tillförda luften föll ner i vistelsezon på grund av att coandaeffekten inte kunde uppfyllas. Detta kunde bidra med viss kylning vid denna zon, eftersom tilluften inte får möjlighet att värmas upp av omgivande rumsluft nämnvärt innan kontakten med

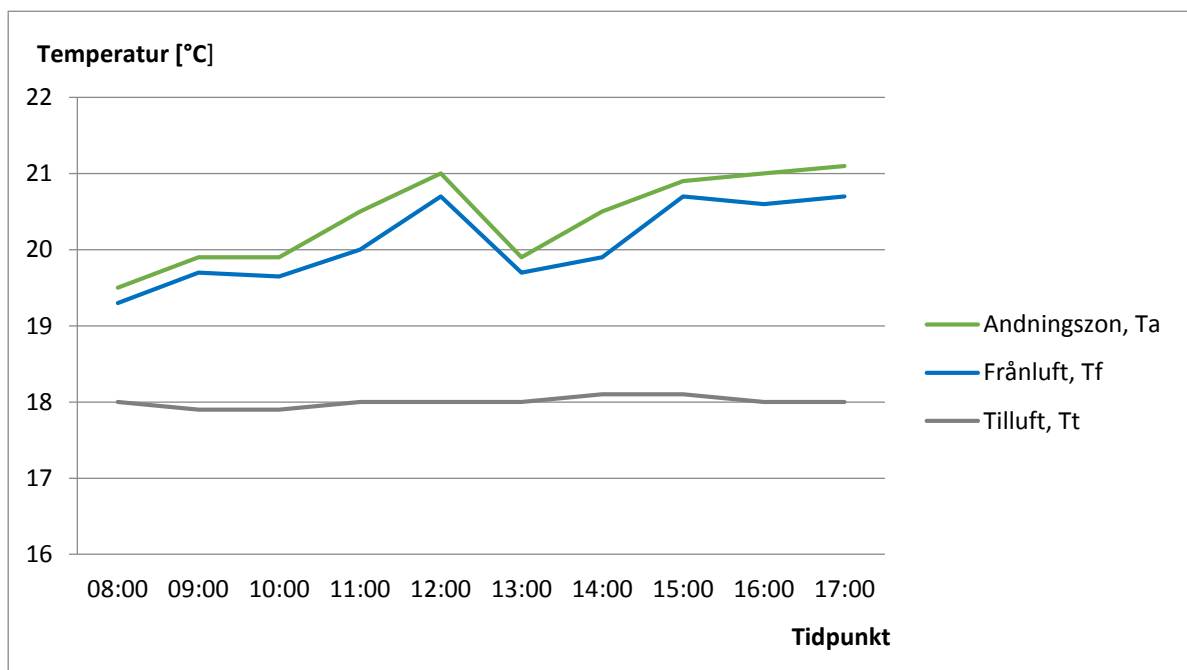


värmekällorna. Efter att armaturen monterats ner och tilluftsdonet fått en noggrannare placering närmare takytan, var förhoppningen att dessa brister hade åtgärdats.

Inför mätningen kontrollerades det att tilluftstemperaturen kunde stabiliseras inom intervallet  $18 \pm 0,2$  °C. Den relativa fuktigheten kontrollerades utanför försöksrummet och mätte 61 %, samt inuti försöksrum även där 61 %. Lufthastigheten utanför försöksrummet uppmättes till 0,03 m/s.

### 5.2.3.1 Temperaturvariation

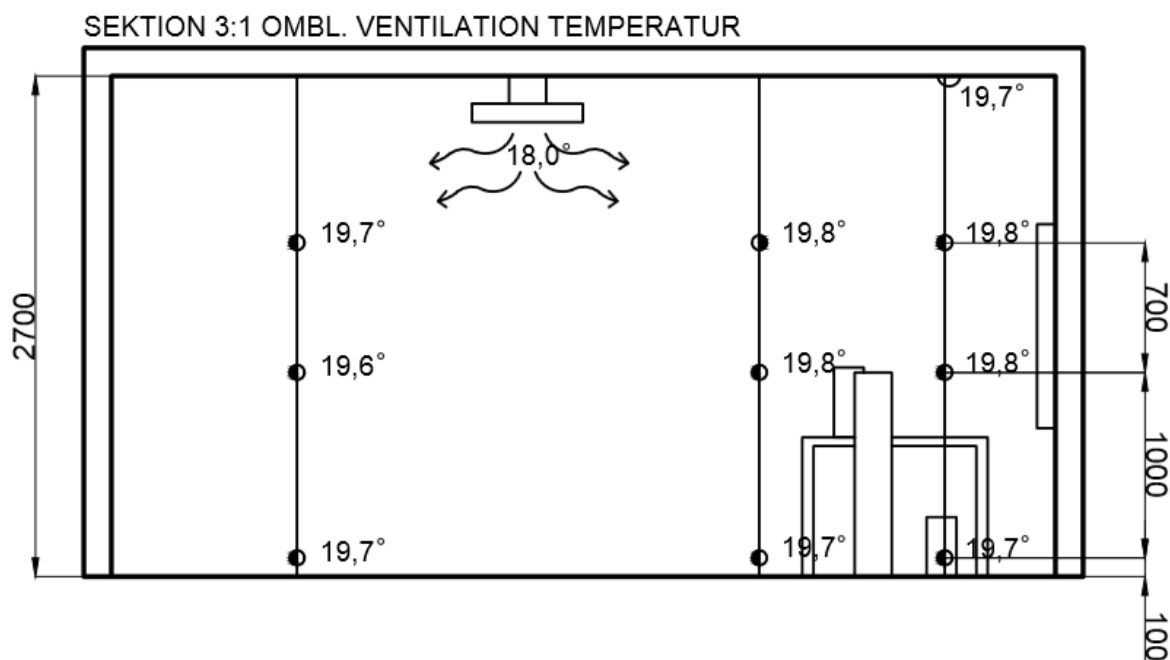
Undersökningen av temperaturvariationen gav ett någorlunda följsamt resultat, vilket är just vad som önskas, då tanken med denna ventilationsprincip är att uppnå i princip lika temperatur över hela rummet. Vad som tydligt avviker från den andra ventilationsprincipen är de kraftiga temperaturskiftningarna vid både andningszonen och frånluften under arbetsdagen. Av figur 24 framgår det att temperaturen stiger fram mot middagstid för att sedan avta förhållandevis mycket på kort tid innan den återigen stiger framåt eftermiddagen.



Figur 24. Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.

Av de mätningar som tidigare gjorts i denna testomgång på temperaturvariationen under arbetsdagen kunde det urskiljas någorlunda följsamma kurvor utan större variationer. Med omblandande ventilation sker däremot förhållandevis rejäla temperaturförändringar över dagen. Detta bör

bero på känsligheten kring inverkan av variabla värmelaster. Då personlasten är av under lunchtid sjunker temperaturen rejält. Detta är ett tydligt exempel på ventilationsprincipens känslighet för hastiga temperaturförändringar i vistelsezonen. Med andra ord har omblandande ventilation inte en lika självreglerande effekt som vad båda varianterna av deplacerande ventilation tycks ha, när det kommer till påverkan av variabla värmelaster.



Figur 25. Situationsbild av temperaturen i °C i förhållande till höjden över golvnivå.

Andningszonens medeltemperatur,  $T_{a,medel}$ : 20,4 °C.

Frånluftens medeltemperatur,  $T_{f,medel}$ : 20,1 °C.

Tilluftens medeltemperatur,  $T_{t,medel}$ : 18,0 °C.

Situationsbilden i figur 25 återger i stort drag karaktären av omblandande ventilation med i stort sett lika temperatur över hela rummet. Vid frånluften uppmäts en lägre temperatur än i andningszonen, vilket beror på den kortslutning som sker av tilluft och evakueras utan att kyla rummet.

### 5.2.3.2 Temperaturverkningsgrad

I föregående testomgång uppnåddes en verkningsgrad på över 1, vilket inte överensstämmer med en korrekt dimensionering. Förhoppningen var att justeringarna skulle leda till en temperaturverkningsgrad som hölls så nära 1 som möjligt, då detta värde indikerar på att en nära fullständig omblandning råder. Av figur 26 kan resultatet utläsas över arbetsdagen.

Följande samband råder:

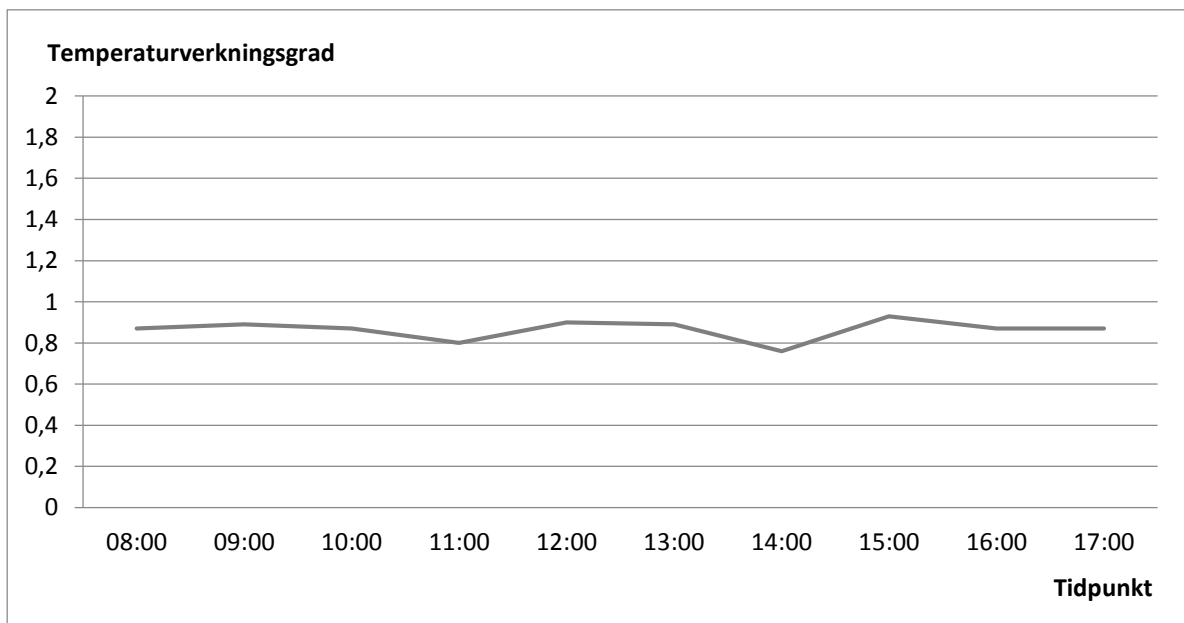
$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen



Figur 26. Försök 2:3, temperaturverkningsgrad över arbetsdagen i förhållande till tidpunkten i andningszonen.

Andningszonens medeltemperaturverkningsgrad,  $\varepsilon_T$  : 0,87.

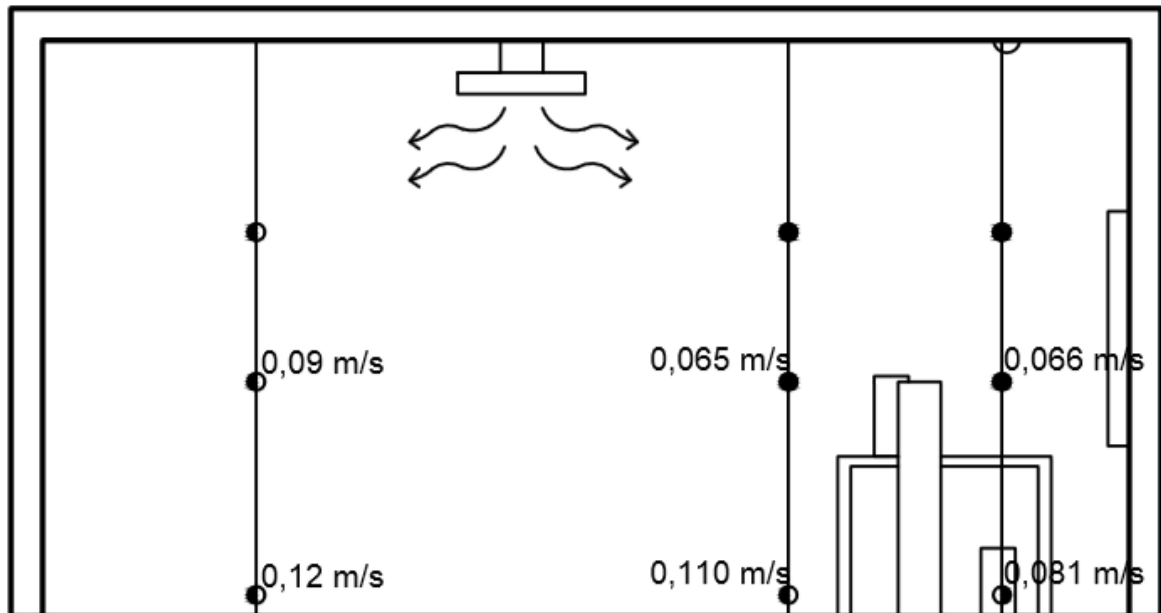
Mätresultatet från försöket visar på en relativt jämn nivå över arbetsdagen med ett medelvärde i andningszonen på 0,87. Detta ger en tydlig indikation på att justeringarna som gjordes gav ett förbättrat resultat, då detta är mer påminnande om ett korrekt dimensionerat system. Trots den anpassade försöksmiljön möjliggör inte utförandet en fullständig omblandning.

### 5.2.3.3 Lufthastighet

Vad som utgör en risk med användning av denna ventilationsprincip är att drag kan förekomma om inte systemet är korrekt inställt. Den högre ingående

impulsen och bidragande acceleration längs med ytorna riskerar att nå en hastighet över gränsvärdet 0,2 m/s innan den når värmelasterna. Därför är det av intresse att se hur lufthastigheten på olika delar av rummet varierar, och om dessa påverkar vistelsezonen. I figur 27 kan en situationsbild på lufthastighetmätningen avläsas.

#### SEKTION 3:2 OMBL. VENTILATION HASTIGHET

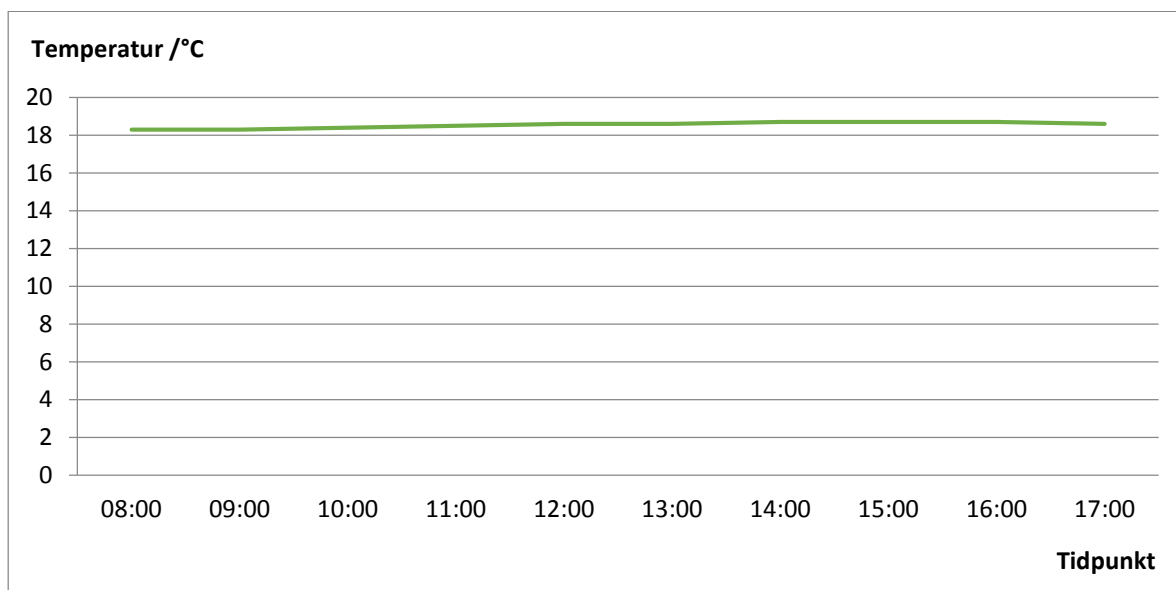


Figur 27. Lufthastigheten i förhållande till höjd över golvnivå.

Mätningarna visar ett svagt varierande värde över rummet. Högst värde påträffas vid golvnivån, troligtvis tack vare att den tillförda luftstrålen relativt hinderfritt kan behålla hastigheten längs ytorna före kontakt med värmelasterna. Vid dessa påträffas ett nära halverat värde vid 1,1 m.

#### 5.2.3.4 Temperaturskillnad utanför och innanför försöksrum

I det omslutande rummet är temperaturen under mätningen nära konstant, se figur 28. Kriteriet på  $18 \pm 1$  °C underskreds för första gången i denna mätning, vilket bör varit en följd av en förhållandevis låg solinstrålning under försöksperioden jämfört med vid föregående mätningar.



Figur 28. Försök 2:3, temperaturvariation utanför försöksrummet över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.

Medeltemperaturen i det omslutande rummet,  $T_{medel,ute}$ : 18,5 °C  
 Medeltemperatur i försöksrummet,  $T_{medel,inne}$ : 20,4 °C.  
 Temperaturavvikelsen mellan ut- och insida,  $\Delta T$ : 1,8 °C.

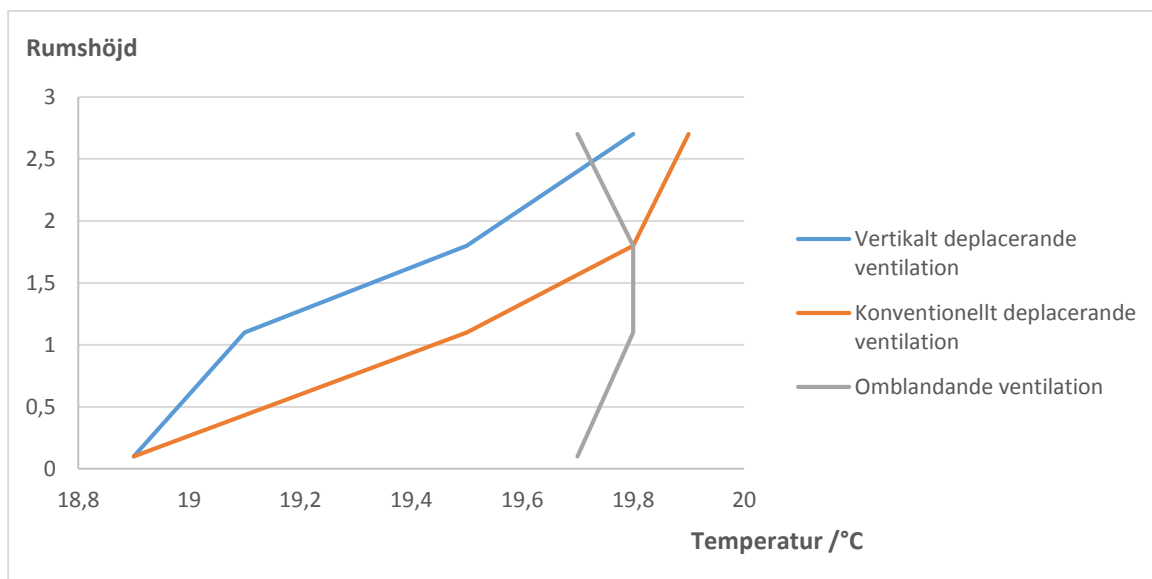
### 5.2.3.5 Sammanfattning

Mätningen av omblandande ventilation gav ett mycket karaktäristiskt resultat i fråga om temperaturfördelning i rummet och temperaturverkningsgrad. Däremot, vid underökningen av temperaturvariationen i rummet kunde stora temperaturavvikelser skönjas under arbetsdagen. Dessa bör ha orsakats av den varierande värmebelastning, som de variabla värmelasterna bidrog med. I jämförelse med deplacerande ventilation var detta utförande betydligt känsligare för denna inverkan, vilket i verkligt fall kan leda till obekväma temperaturvariationer över dagen.

Vid tillsättning av rök kunde mätresultaten verifieras, då luften i större delen av rummet var omblandad förutom vid fönstersimulatorn, där en mindre stagnationspunkt hade uppkommit. Denna har förmodligen uppkommit på grund av att den tillförda luftstrålen mött övriga värmelaster och skapat en cirkulation innan kontakt med fönstersimulatorn. En sådan oönskad punkt är svår att undvika även i försöksmiljö.

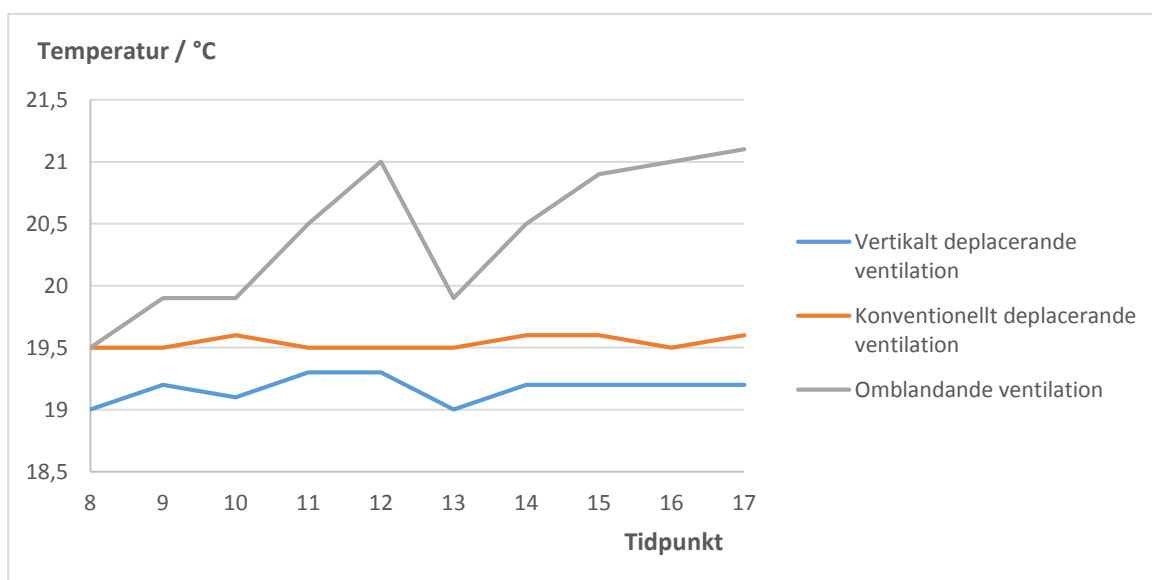
### 5.3 Jämförelser mellan försöken

Försöken som gjordes i den andra omgången presenteras i de jämförande figurerna 29, 30 och 31.



Figur 29. Temperaturvariationen i förhållande till höjden i rummet. Värden tagna från situationsbilder.

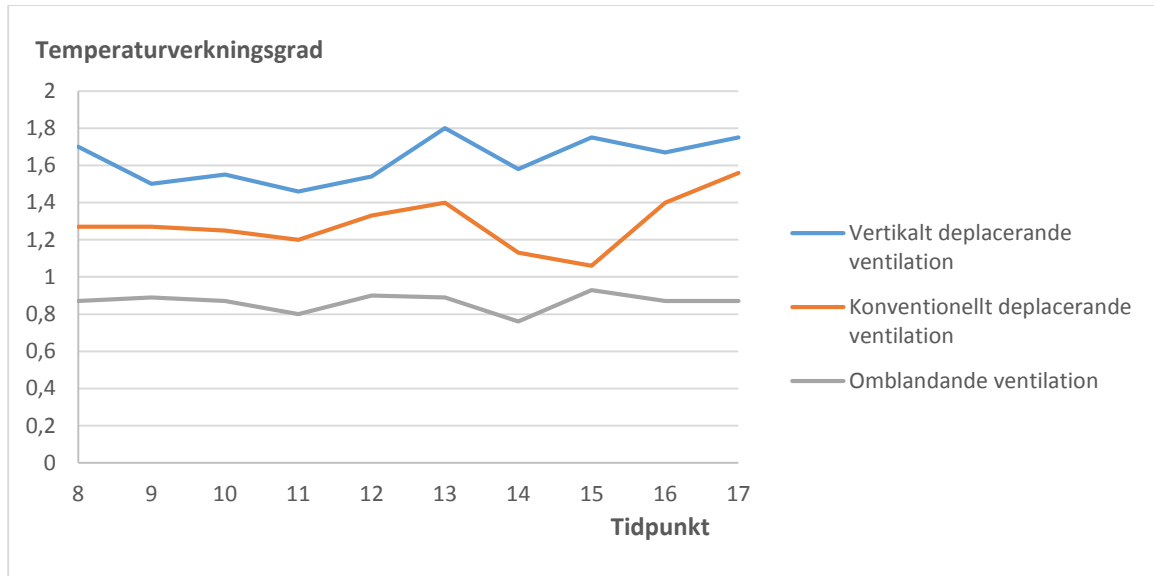
Av figur 30 kan det utläsas en svagt linjär temperaturgradient i rummet för de båda deplacerande ventilationslösningarna, vilket är i enlighet med vad som anges i litteraturen. Omblandande ventilation är nästintill rak och indikerar på en jämn temperaturfördelning.



Figur 30 Temperaturvariationen för respektive tidpunkt i andningszonen.

Temperaturvariationen var relativt jämn över dagen med användning av deplacerande ventilation. Däremot kunde betydligt större variation skönjas

med användning av omblandande ventilation. Detta kan bero på de variabla värmelasternas inverkan på temperaturen i försöksrummet.



*Figur 31 Temperaturverkningsgraden för respektive tidpunkt i andningszonen.*

Av figur 31 kan det avläsas en betydligt bättre temperaturverkningsgrad med användning av vertikalt deplacerande ventilation än med omblandande ventilation. Konventionellt deplacerande ventilation gav överraskande låga värden i jämförelse med vertikalt deplacerande ventilation.





## 6 Diskussion

Studien hade som ändamål att undersöka termiska förhållanden i ett typiskt kontor för kylning med användning av två olika ventilationsprinciper, omblandande och deplacerande ventilation. Förhållandena undersöktes genom mätningar i ett försöksrum med en erfarenhetsmässigt vedertagen tilluftstemperatur och tilluftsflöde för att bedöma den termiska komforten och de eventuella energi- och penningbesparingar som kan åstadkommas.

### 6.1 Deplacerande ventilation

#### 6.1.1 Vertikalt deplacerande ventilation

Principen utgår från att kyld luft tillförs rummet via en halvsfärisk kupa. Utformningen medger ett större spridningsområde än för konventionellt deplacerande tilluftsdon. Tilluften tillförs med en mycket låg fart. Den tillförda luften faller därefter genom termiska krafter på grund av dess högre densitet. Under tiden den tillförda luften faller, accelereras den. Allteftersom luften faller, ”dras” denna mot värmekällorna som är placerade i rummet och värms upp succesivt av den omgivande luften. Den tillförda luftmängden kan ha sådan spridningsbild att risken för drag förebyggs i vistelsezonen. När den tillförda luften till slut når värmekällan har den en betydligt lägre temperatur än värmekällan, som vid kontakt ersätter den befintliga luftström som har bildats av värmekällan. Konvektionsströmmen stiger sedan mot taket och når till slut ett område i höjdd där temperaturavvikelsen mellan konvektionsströmmens luft och omgivande luft är lika, och här avstannar konvektionsströmmen. En skiktning uppstår därmed mellan en nedre, renare zon och en övre, omblandad zon. Skiktningen är främst av vikt gällande koncentrationen av föroreningar i rummet och normalt inte gällande temperatur. Höjden på var denna skiktning sker kan främst justeras genom att ändra tilluftsmängden. Vid taket evakueras så småningom luften via frånluftsdonet.

Värmekällorna i rummet är oftast mest bidragande till föroreningar i ett typiskt kontor. En nedre, renare zon kan endast uppnås så länge mängden tillförd luft är tillräckligt stor för att ersätta konvektionsströmmarna. Om mängden tillförd luft är större eller motsvarar luftmängden i konvektionsströmmarna, kommer dessa att stiga och föra med sig de eventuella föroreningar som värmekällan producerar. När luftmängden i konvektionsströmmarna blir större än tilluftsmängden börjar rumsluft blandas med konvektionsströmmen. Luftkvaliteten kommer således att förvärras på grund av att den förorenade konvektionsströmmen blandas med rumsluften.

Observationerna som gjordes med rök kunde tydligt urskilja hur luften faller med låg impuls från tilluftsdonet och succesivt dras mot värmelasterna längs golvnivå och upp till ca 0,7-0,8 m. Utifrån mätningarna kan det förmodas att den tillförda luften vandrar under 1,1 m då en förhållandevis lägre lufthastighet påträffas på mätstången närmast tilluftsdonet än i övriga delar vid samma mäthöjd.

I litteraturen beskrivs hur deplacerande ventilation som mest optimalt dimensioneras. Det framgår hur en markant temperaturgradient kan urskiljas i rummet samt att värmelasternas bidragande konvektionsströmmar beräknas för att nå en önskad skiktningshöjd. Gränsskiktet ska för kontorssysselsättning mest föredömligt beräknas till att infinna sig strax över andningszonen. Under mätningarna förväntades det att temperaturen skulle ge en nästintill linjär ökning, alltså en konstant temperaturgradient, från golvet upp till taket och frånluftsdonet. Ingen större temperaturgradient förekom dock i rummet mot vad som förväntades utifrån litteraturen. Ingen markerad skiktning mellan ett nedre, renare skikt och ett övre, omblandande skikt kunde heller urskiljas i rummet. Först vid taknivån kunde ett tunt omblandande skikt urskiljas. Den svaga temperaturgradienten berodde troligtvis främst på en för svag sammanlagd uppvärmning i rummet.

Det kunde även utläsas en mindre temperaturskillnad mellan golvnivån och andningszonen jämfört med konventionellt deplacerande ventilation. Detta berodde troligtvis på att en del av det varmare, förorenade skiktet vid högre nivå i rummet ”dras med” den tillförda luftstrålen från tilluftsdonet ner mot golv och mot värmelasterna. Detta kan i sin tur leda till att vistelsezonens temperatur blir svagt ökad, dock med följd att ersättningsluften till viss del kan vara förorenad. Vid andningszonen kunde en sänkning på 0,4°C påträffas vid användning av vertikalt deplacerande ventilation jämfört med vid användning av konventionellt deplacerande ventilation. Denna förflyttning leder rimligtvis till en svag temperaturökning i vistelsezonen, som i annat fall skulle vara ännu effektivare ur kylsynpunkt. En fördel är däremot att den utblandade luften bidrar med en minskad temperaturgradient och att temperaturen vid golvet höjs. Detta kan vara ett skäl att föredra detta utförande framför konventionellt deplacerande ventilation, såvida den placeras med god hänsyn tagen till rummets utförande.

Det uppnås med andra ord en bättre temperaturfördelning i rummet men med troligtvis högre grad av föroreningar än vid konventionellt deplacerande ventilation. Trots att luftkvaliteten förväntas bli sämre med deplacerande ventilation, monterad vid taknivå, är det däremot osannolikt att tillförseln från det övre skiktet motsvarar den luftmängd, som gällande omblandande ventilation tillför. Det förutsätts därför att luftkvaliteten är betydligt bättre än

för omblandande ventilation. Detta har även presenterats i rapporter från tidigare mätningar utförda av AirSon. En annan positiv effekt av utblandningen av luft, är att det övre skiktet med sämst luftkvalitet med tiden förflyttas uppåt i rummet, till följd av den större luftmängden som ersätter konvektionsströmmarna. Trots att luftkvaliteten inte blir lika hög i det nedre skiktet, kan därför ersättningsluften sträcka sig längre upp i rummet än med användning av konventionellt deplacerande ventilation. Detta kan även urskiljas i resultaten som indikerar på att konventionellt deplacerande ventilation ger en svagt lägre påverkan på luften intill.

Båda utförandena av deplacerande ventilation ska i övrigt förhålla sig relativt lika gällande temperaturverkningsgrad, för vilken temperaturen vid andningszonen spelar en central roll. Ett alternativ att göra utförandet effektivare bör vara att tilluftsdonet sänks till en höjdnivå, där luft från det övre, förorenade skiktet inte riskerar att ”dras med”. Detta kan förvisso vara problematiskt att utföra i samband med dimensionering av ett utrymme med detta utförande, eftersom resultatet är starkt beroende på var gränsskiktet mellan renare luft och omblandande luft hamnar.

Vanligtvis dimensioneras denna höjd till ca 1,1 meter, det vill säga en höjd som är strax över andningszonen för sittande människor. Om ett utrymme dimensioneras så att gränsskiktet ligger vid denna höjd, skulle det därför krävas att tilluftsdonet placeras under 1,1 meters höjd. Detta bör ge negativa konsekvenser på den acceleration som tilluftsdonet är beroende av för att nå värmekällorna med tillräcklig kastlängd.

Skiktningen kan avläsas på en svagt högre nivå än vid användning av konventionellt deplacerande ventilation. Detta kan bero på att den sammanlagda luftmängd som utgör ersättningsluft för konvektionsströmmarna är större än i fallet för golvmonterat don. Tilluftsdonet, placerat vid tak, bidrar med ett större luftflöde än för golvmonterat don, trots att det är utvecklat för att ge minsta möjliga påverkan på omgivande luft. Det vertikalt deplacerade tilluftsdonet för med sig omgivande luft i accelerationen mot golvet. Detta gör att ersättningsluften till konvektionsströmmarna blir större.

Konvektionsströmmarna kan sedan hinna stiga längre innan rumsluft börjar tillföras. Därmed skapas ett omblandande skikt. Detta leder alltså till att ett eventuellt omblandande skikt placeras högre än i fallet för konventionellt deplacerande ventilation.

Grundtanken är att flödet genom rummet ska ersätta den samlade mängden konvektionsströmmar. Denna princip bör vara beroende av värmelasternas placering i rummet. I de försök som genomfördes observerades det att ersättningsluften inledningsvis når värmelasterna närmast tilluftsdonet med ett kort avstånd mellan dessa och fönstersimulatorens. Efter kontakt med de övriga

värmelasterna upplevs det inte som att ersättningsluften når fönstersimulatorn med erforderlig luftmängd. Den luftmängd som passerar tenderar att vara försvagad både i luftmängd och hastighet och upplevs inte i tillräcklig grad ersätta den värmeavgivning som fönstersimulatorn ger i tillräcklig grad. Denna uppvärmning ser ut att stiga termiskt, utan influens av någon större mängd ersättningsluft, då största delen av den intilliggande luften verkar stillastående. En eventuell lösning till detta problem vore att installera ytterligare ett tilluftsdon, placerat på motsatt sida om det andra tilluftsdonet. Detta kan dock ha andra negativa konsekvenser som till exempel högre driftskostnad och ökad risk för drag i vistelsezonen.

### 6.1.2 Konventionellt deplacerande ventilation

När det gäller konventionellt deplacerande ventilation, tillförs luften med en högre impuls än för vertikalt deplacerande ventilation. Detta beror främst på att denna riktas mer koncentrerat åt ett håll, samtidigt som den inte kan utnyttja acceleration genom att luften faller såsom för vertikalt deplacerande ventilation. Då den tillförda luften inte får möjlighet att värmas upp nämnvärt förrän den når värmekällorna, ger den möjlighet till effektiv kylning av värmelasterna. Enligt (Chen & Glicksman, 2003) är temperaturgradienten som störst i den nedre delen av rummet med konventionellt deplacerande ventilation. Det rekommenderas därför att rummets ventilation dimensioneras utifrån denna temperaturgradient. Resultatet ger en gradient som är svagt överensstämmande med vad modellen anger.

Det torde finnas ett renare skikt av tillförd luft som når värmelasterna än vad som är fallet vid vertikalt deplacerande ventilation, eftersom luften som når tilluftszonen inte riskerar att blandas med förorenad luft från högre luftlager. Genom observationer med rök kunde även här urskiljas en skiktning av förorenad luft först vid taknivån, dock vid en svagt lägre nivå än för vertikalt deplacerande ventilation.

Vid 0,1 meter på mätstång närmast dörren utläses en svagt högre lufthastighet gällande vertikalt deplacerande ventilation än för konventionellt deplacerande ventilation. Detta beror troligtvis på acceleration som uppkommer då den kallare luften sjunker från tilluftsdonet. Den tillförda luften från det konventionellt deplacerande donet når ingen ytterligare acceleration utöver dess impuls från donet. Mätningarna visar att hastigheten trots allt behålls under hela färdsträckan fram till värmekällorna. En annan avgörande skillnad är troligtvis att den tillförda luften inte ger lika hög spridningsbild, varför lufthastigheten vid mätpunkten vid golvnivå närmast dörren är relativt svag. Denna punkt är således inte påverkad av tilluftsdonets närzon.

Lufthastigheterna är överlag högre med användning av vertikalt deplacerande ventilation än med konventionellt deplacerande ventilation. Detta ifrågasätter till viss del påståenden om att risken för drag är lägre med användning av detta utförande. Däremot ger båda utförandena värden långt under kriteriet, rekommenderat av arbetsmiljöverket på 0,2 m/s. Dock kan påverkan av verkligt sammanhang med många luftrörelser i rummet, uppkomna av personer i rörelse och öppnande och stängande av dörrar, bidra till att gränsvärdet för drag överskrids.

Vid försöken med båda varianterna av deplacerande ventilation och omblandande ventilation vid andningszonen visade sig temperaturskillnaden vara ordentligt avvikande. Det skiljde 1,2 °C mellan omblandande och vertikalt deplacerande ventilation, respektive 0,9 °C skillnad mellan omblandande och konventionellt deplacerande ventilation.

Mellan de båda deplacerande ventilationslösningarna kunde 0,3 °C temperaturskillnad utläsas som medeltemperatur vid andningszonen över arbetsdagen. Detta berodde mest sannolikt på att luften färdas fortare från tilluftsdonet till vistelsezonen med användning av vertikalt deplacerade ventilation än med användning av konventionellt deplacerande ventilation. Trots att luften tillförs rummet med en låg hastighet, utnyttjas dess fallhastighet att nå en högre hastighet vid lägre delar av rummet jämfört med konventionellt deplacerande ventilation. Detta kan bekräftas genom avläsning mellan de båda ventilationslösningarna. Därför når tilluften värmelasterna fortare, trots en längre transportsträcka mellan tilluftsdonet och värmelasterna med vertikalt deplacerande ventilation. Således blir den tillförda luften mindre påverkat av inomhusluften. Konventionellt deplacerande ventilation tillförs med en låg hastighet som närmast bibehålls konstant fram kontakten med värmelasterna. Därför kan den tillförda luften bli till viss del mer påverkad av rumsluften än med vertikalt deplacerande ventilation.

## **6.2 Omblandande ventilation**

Med användning av omblandande ventilation tillförs luften genom ett tilluftsdon placerat centralt i rummet vid taknivå. Tilluftsdonet är försett med dysor som är riktade i ett cirkulärt mönster för att uppnå den tänkta radiella spridningsbilden. Luften tillförs rummet med en jämförelsevis mycket hög impuls och riktas genom dysorna mot takytan. Genom dess höga impuls, förhindras luften att direkt falla mot golv. Den klistras istället mot takytan genom den så kallade ”Coanda-effekten”. I samband med detta får den tillförda luften möjlighet att accelerera utöver ytorna, så länge inget hinder föreligger som hindrar den tillförda luftströmmen att behålla sin klistring mot intilliggande yta. Denna luftström följer sedan väggpartierna och sedermera golvytan fram tills att ett hinder nås. Alltefter som den tillförda luften

accelereras, värms denna upp av omgivande luft genom ett friktionsskikt som bildats mellan tillförd luft och omgivande luft. Härmed får den tillförda luften möjlighet att riva med sig den varmare omgivande luften. Principen bygger på att den tillförda luftströmmen når värmekällorna med en så hög hastighet, att dess bidragande föroreningshalt förs med och slutligen når taknivån och leds ut genom frånluften.

I försöken med omblandande ventilation fungerade tilluftsdonet som önskat med väldigt lika temperatur vid samtliga mätpunkter. Den jämna temperaturen leder till en god termisk komfort för personer som befinner sig i rummet, förutsatt att temperaturen är tillfredsställande. I de inledande mätningarna blev temperaturskillnaden mellan från- och tilluften högre än mellan andningszonen och tilluften. I teorin benämns ett optimalt dimensionerat utrymme med omblandande ventilation som att fullständig omblandning ska råda, det vill säga att dessa temperaturskillnader ska förhålla sig lika med en verkningsgrad på 1:1. Efter de tekniska förändringar som gjordes, uppmättes istället en svagt lägre temperaturskillnad mellan från- och tilluft. Detta betyder med andra ord att temperaturen istället var högre i andningszonen än i frånluften i de nya mätningarna. Den lägre temperaturen vid frånluftsdonet än i övriga platser i rummet berodde rimligen på kortslutning av en del av tilluften. Detta kunde även urskiljas vid tillsättning av rök. Detta innebär att en liten mängd av den kallare tilluften går direkt ut genom frånluftsdonet som ger en kallare temperatur vid detta don än i övriga delar av rummet. Detta leder till en onaturligt kall frånluft. Kyleffekten till rummet minskar även eftersom en liten del av luften går direkt ut genom frånluftsdonet utan att ha kylt rummet i tilltänkt grad.

Efter att försök gjorts gällande omblandande ventilation med samma förutsättningar för temperatur och flöde, påvisades en betydligt högre temperatur vid vistelsezonen än för de båda deplacerande ventilationsdonen. Detta beror troligtvis främst på uppblandningen av den omgivande luften med den tillförda luftströmmen innan den når andningszonen. Sådan grad av uppvärmning sker inte över huvudtaget i samband med deplacerande ventilation. Den högre utgående impulsen från tilluftsdonet och bidragande acceleration längs ytorna tillåter att rumsluft lättare rivs med och blandas upp med den tillförda luftströmmen som därefter får ökad temperatur innan vistelsezonen nås. Om luftströmmen inte når tillräcklig hastighet innan mötet med de först förekommande värmekällorna finns risken att luftstrålen inte klarar av att sträcka sig till värmekällorna längre bort i rummet utan stiger och bildar en cirkulation vid ett tidigare skede än önskat. Då kan den förorenade luften åter hamna i cirkulation, denna gång med högre föroreningshalt. Intill denna cirkulation finns en tendens att luften blir stillastående, det vill säga det uppstår en stagnationszon. Luftutbytet i rummet kan således inte ske lika

effektivt som vid deplacerande ventilation, eftersom den tillförda luften eventuellt blandas upp och ger upphov till stagnationszoner och oönskad cirkulation.

Med tillsättning av rök kunde det urskiljas ett större område med stillastående luft, förmodligen på grund av att inga värmelaster placerats i detta område. I praktiken är det svårt att undvika stagnationszoner. För att ett omblandande system ska vara helt optimalt dimensionerat, det vill säga att fullständig omblandning av luften ska ske, hade det varit till fördel att samla samtliga värmelaster på kort avstånd från varandra i rummet, samt att ingen rörelse sker. Detta är i praktiken inte möjligt, då rörelser sker under större delen av dagarna i ett rum.

Gällande lufthastigheterna kan det med omblandande ventilation utläsas högst värde överlag vid golvnivån. Detta värde är ändå relativt högt, sett med inverkan av verkligt sammanhang, där gränsvärdet för drag riskerar att överskridas.

Vid undersökning av omblandande ventilation hade armatur som inte är nerhängd eller infälld i taket varit problematisk, eftersom tilluftsströmmen längs taket utnyttjar dess tilltänkta fastklistring. Lysrörsarmatur utan dessa lösningar hade stört denna luftström och gjort att luftströmmen lossnar från taket och faller mot rummet tidigare än med armatur, monterad strax under taket. Armaturen som användes i försöken borde därför monterats längre bak i rummet, närmre ingångsdörren eftersom detta hindrar att luftströmmen faller ner i rummet på personsimulatorens och skapar eventuellt drag. Denna lösning hade även gett längst avstånd mellan armaturen och det omblandande tilluftsdonet.

### **6.3 Jämförelser med tidigare studier**

Vad som främst utgjorde skillnaden mot de studier som föranlett denna undersökning var förutom ett bättre anpassat och isolerat försöksrum även användningen av variabla värmelaster och deras bidragande konsekvens. I den första studien som gjordes användes en verklig personsimulator. Denna gav en realistisk bild av mänsklig konvektionsström, men bidrog med för stora luftrörelser i rummet och en för varierande konvektionsström, beroende på varierande värmeavgivning under dagen. Det blev därför komplicerat att bedöma effektiviteten av de olika utförandena i en annars steril miljö.

Personsimulatorns arbetsmönster utgick från att ge maximal effekt vid sin närvaro i kontoret och ingen effekt vid frånvaro. Detta kan leda till viss kortare eftervärme, som inte förekommer i verkligheten. Utöver personsimulatorens användes även en fönstersimulator, som reglerades enligt en

beräknad effektkurva över dagen. Denna hade använts i den studie, som senast gjordes, men då hade inte hänsyn tagits till det uppvärmda parti, som återstrålar värme från golvet. Denna hade även vi svårt att simulera. Därför gjordes en omberäkning av effektkurvan för att motsvara ett fönster med invändig solavskärmning. Den återstrålade värmen skulle minimeras i så hög grad att den kunde försummas. Detta ledde till ca 100 W i effektminskning i toppeffekt.

Med inverkan av variabla värmelaster kan det utifrån resultaten utläsas, att det omblandande systemet gav större variationer i temperatur under dagen än användning av deplacerande ventilation. Främsta förändringen kunde urskiljas då personlasten gick av och på. Att ha alltför varierande temperatur i rummet kan påverka den termiska komforten, eftersom det kan ta tid för utrymmet att åter nå ett jämviktsläge. Båda utföranden med deplacerande ventilation stod sig förhållandevis väl mot de temperaturvariationer som uppstod och hade således en bättre självreglerande effekt.

#### **6.4 Värmeförluster**

I verkligt sammanhang kan eventuella värmeförluster från ett utrymme ha stor inverkan på hur resultatet för mätningarna blir. För omblandande ventilation hade större värmeförluster lett till ett bättre resultat. För deplacerande ventilation kommer större värmeförluster att påverka temperaturen vid golv, tak och frånluften samt temperaturgradienten.

En faktor som kan påverka energibalansen är infiltration eller läckage av luft från rummet. Därför är tätheten av utrymmet av stor vikt. Rummet var däremot byggt att vara så tätt som möjligt, och inga nämnvärda läckageavtryck kunde urskiljas med tillsatt rök.

#### **6.5 Resultterande termisk komfort**

Litteraturen anger en rekommendation på maximalt 2 °C/m i temperaturskillnad för att obehag inte ska infinna sig för de personer som vistas i utrymmet. Resultaten av samtliga mätningar låg inom detta intervall. Trots att konventionellt deplacerande ventilation gav en lägre temperatur längre bak i rummet intill tilluftsdonet medgav detta ändå en relativt liten temperaturskillnad mellan de olika delarna i rummet. Detta verkar alltså inte äventyra den termiska komforten.

Många omständigheter kan resultera i avvikande termisk komfort. Vi valde att undersöka lufthastigheter som förekom i förhållande till drag.

Försöken resulterade i att de deplacerande ventilationsprinciperna gav lägst lufthastighet i samtliga delar av rummet och håller sig under gränsvärdet för drag på samtliga delar. Det konstateras även att tilluftsflödet från det



golvmonterade deplacerande donet bidrog med en mycket kort närzon. De högsta lufthastigheterna brukar ligga vid 2-5 cm höjd, men denna är däremot ganska jämn över samtliga mätpunkter. Det är oftast av stort intresse att dimensionera ventilationssystemet utan att drag uppstår. En korrekt placering för deplacerande ventilation är i sådant fall förutsättningen för ett tillfredsställande resultat, då denna kan ge upphov till drag om den placeras för nära personer som vistas där.



## 7 Slutsats

Syftet med studien var att jämföra de två ventilationsprinciperna, deplacerande ventilation och omblandande ventilation. Jämförelsen skulle undersöka ventilationseffektiviteten och därför valdes temperaturverkningsgrad som ett mått på denna. Förhoppningen var att mätresultaten kunde visa en effektivare kylförmåga gällande deplacerande ventilation med lika förutsättningar inför samtliga mätningar utan att termisk komfort äventyras. Mätningar och beräkningar baseras på ett typiskt kontor avsett för en person.

Resultaten från mätningarna gav tillfredsställande termiska förhållanden i rummet. Försöken indikerade på en lägre temperatur i vistelsezonen, vid 1,1 m, vid användning av deplacerande ventilation än med omblandande ventilation. Den högsta temperaturskillnaden påträffades mellan vertikalt deplacerande ventilation och omblandande ventilation på 1,2 °C i andningszonen. Detta innebär alltså att tilluftstemperaturen inte behöver kylas lika mycket med användning av vertikalt deplacerande ventilation som med omblandande och konventionellt deplacerande ventilation för att hålla samma temperatur i vistelsezonen. Således, under de månader som temperaturen är högre utomhus än inomhus och inomhusluften behöver kylas ner, är det ur energisynpunkt och ekonomisk synvinkel effektivare att använda vertikalt deplacerande ventilation. I avsnitt 3.1 beskrivs mätresultaten från föregående studie som visar att endast 1 °C ökning i tilluftstemperatur bidrar med 309 timmar om året utan maskinell kylning. Såvida ventilationssystemet behövsstyrts kan detta alltså leda till stora besparingar.

Temperaturskillnaden mellan de deplacerande donen vid andningszonen uppmäts till 0,4 °C. Denna temperaturskillnad bör inte vara särskilt stor. De faktorer som påverkar är främst donens placering, utformning och strålningsriktning.

I motsats till föregående studier har varierande värmebelastning använts i rummet. Vid användning av deplacerande ventilation kommer den rådande temperaturgradienten att bidra med en självreglerande effekt, som ger en mer gynnsam hantering av varierande värmebelastning än för ett omblandande system. Detta leder även till fördelen att en och samma tilluftstemperatur kan användas i större utrymmen med användning av deplacerande ventilation som rimligen ger stora ekonomiska följder och kan vara av intresse att undersökas.

Mätningarna bekräftar till viss del resultaten från de föregående undersökningarna, där dessa visade att användning av deplacerande ventilationsdon kan ge en temperatursänkning i vistelsezonen på 2-3 °C. Resultaten är svagare än vad som beskrivs i litteraturen, förmodligen på grund

av en för svag uppvärmning, men en fingervisning om skillnader mellan ventilationsprinciper och utförande kan trots det göras. Denna temperaturskillnad leder till att tilluftstemperaturen kan ökas utan bekostnad av termisk komfort i vistelsezonen. Detta leder till ökad möjlighet till kylning med utomhusluft, vilket kan bidra till energibesparingar. Således är resultatet av stort intresse utifrån rådande energiklassningar och kylbehov.

Slutsatsen är med andra ord att deplacerande ventilation ger samma temperatur i vistelsezonen som för omblandande ventilation med högre temperatur på tilluften. Deplacerande ventilation gör det möjligt att öka temperaturen på tilluften och därmed minska energiförbrukningen för kylning av utomhusluften och samtidigt ge en tillfredsställande termisk komfort.

Genom att utomhusluften inte behöver kylas ner lika mycket med användning av deplacerande ventilation kan energiförbrukningen minskas. Den tid på året som maskinell kylning används för att nå önskad tilluftstemperatur, kan således förkortas. Den installerade kyleffekten på aggregatet kommer även ha möjlighet att minskas.

I fortsatta studier bör undersökningen genomföras med samtliga värmelaster avaktiverade eller aktiverade på full effekt över arbetsdagen. Resultatet hade varit av intresse för att bättre kunna utvärdera den varierande värmebelastningens inverkan på försöksrummet. Energiförbrukningen mellan de olika ventilationslösningarna bör även belysas mer för att ge en grundligare bedömning av bidragande besparingar och medföljande ekonomiska fördelar.

## 8 Referenslista

### Tryckta källor

Awbi, H.B. (2003). *Ventilation in buildings*. London: Spon Press.

Chen/Glicksman (2003). *System Performance Evaluation and design guidelines for displacement ventilation*. Atlanta: Amer Society of Heating.

Mundt, E. (1996). *The performance of displacement ventilation systems*. Stockholm: Kungliga Tekniska Högskolan.

Sandberg, M. Blomqvist, C. Stymne, H. Mattsson, M. (1995), *Ventilation i funktion*. Gävle: Meyer information och Förlag AB.

Skistad, H (1994). *Displacement ventilation*. Taunton: Research studies press.

Skistad, H. et al (2004). *Displacement ventilation in non-industrial premise*. Bryssel: Rehva.

Skåret, E (2000). *Ventilasjonsteknisk håndbok*. Oslo: Norges Byggeforskningsinstitutt.

Warfvinge, C (2010) *Projektering av vvs-installationer*. Lund: Studentlitteratur.

### Elektroniska källor

Arbetsmiljöverket (2013). *AFS 2009:2 Arbetsplatsens utformning*.

Blom/Larsen (1992). *Solinstrålning gjennom vinduer på klare, halvt overskyede og helt overskyede dager*. Nordberg Aksidenstrykkeri AS.

Boverket (2011). *Regelsamling för byggande, BBR 2014 Avsnitt 6 Hygien, hälsa och miljö*

Endal Rognes,R (2012) *Romventilasjon for komfortkøling*

Energi och byggnadsdesign, LTH (2002) *Parasol*. Mjukvara.

Friedrich, J (2011) *Att ventilera hus – kompendium. Fakta och bakgrund om ventilation av hus och lägenheter*. Göteborg: Hållbar utveckling Väst.

Johansson (2005). *Modelling Life Cycle Cost for Indoor Climate System*. Building physics, LTH.

Karlsson, R och Larsson, T (2012) *Luftvärme i Lågenergihus*

Krisstenson, D (2014) PowerPoint-dokument Airson

Lindhe, J (2006) *Utvärdering och optimering av industriventilationsanläggningar.*

Socialstyrelsen dokument publikation, (2005) *Temperatur inomhus*

Svensson (2004) *Low energy cost and less sick leave with displacement ventilation versus mixing ventilation.* Roomvent 9th International conference.

### **Muntliga källor**

Krisstenson, D (2014) Intervjuer och samtal.

## Bilagor

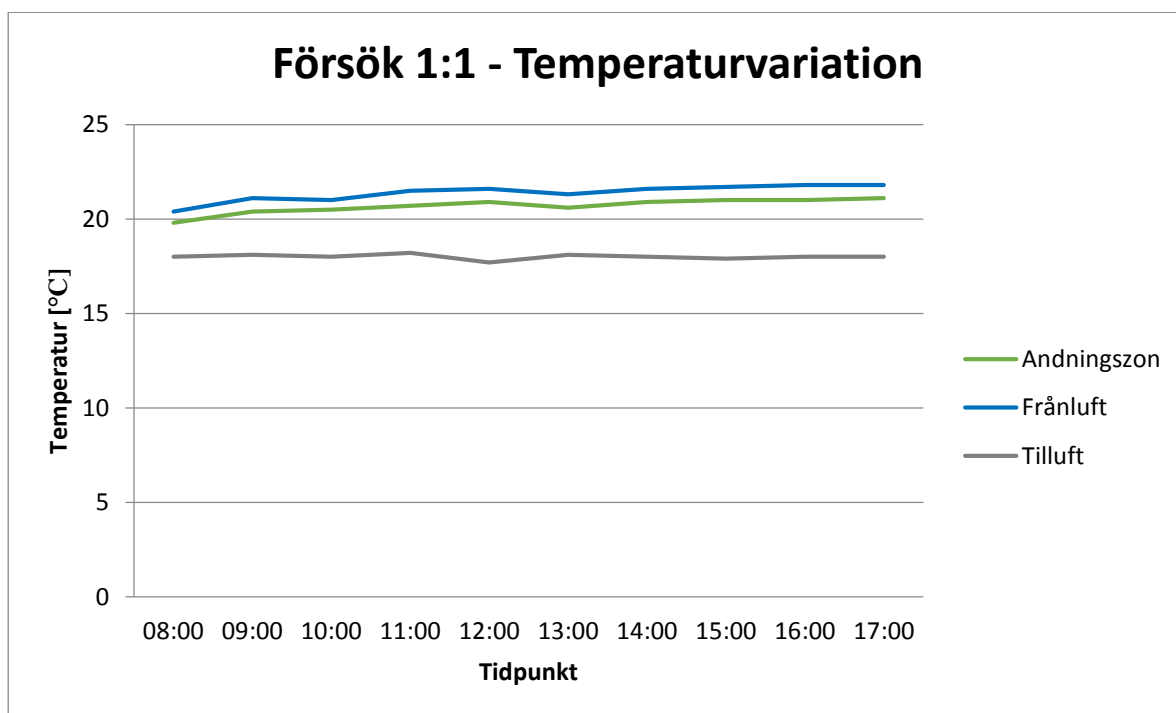
### Försök 1:1 – Vertikalt deplacerande ventilation

Tilluftstemperaturen stabiliserad inom intervallet  $18 \pm 0,2$  gr C. Relativ fuktighet utan- och innanför försöksrummet: 61 %. Lufthastighet utanför: 0,02 m/s.

### Temperaturvariation

Temperaturvariation i °C för tilluft, frånluft och andningszon

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	19,8	20,4	20,5	20,7	20,9	20,6	20,9	21	21	21,1
Frånluft	20,4	21,1	21	21,5	21,6	21,3	21,6	21,7	21,8	21,8
Tilluft	18	18,1	18	18,2	17,7	18,1	18	17,9	18	18



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen [°C] i förhållande till tidpunkten.*

Beräknade medelvärden:

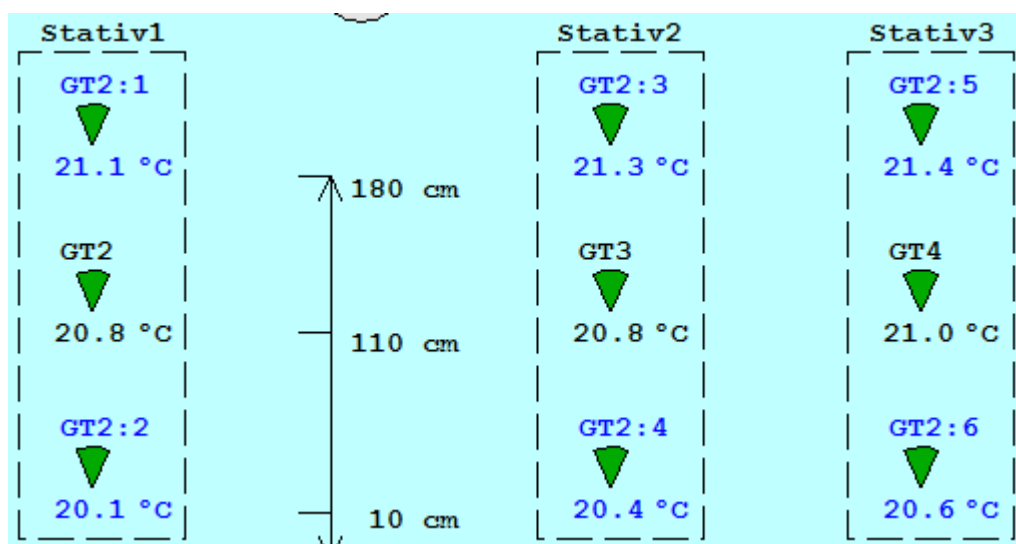
$$T_f = 21,4 \text{ °C}$$

$$T_a = 20,7 \text{ °C}$$

$$T_t = 18 \text{ °C}$$

Tilluft; 18 °C

Frånluft; 21,5 °C



Situationsbild av temperaturen i °C i förhållande till höjden över golvnivå.

## Temperaturverkningsgrad

Följande samband råder:

$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

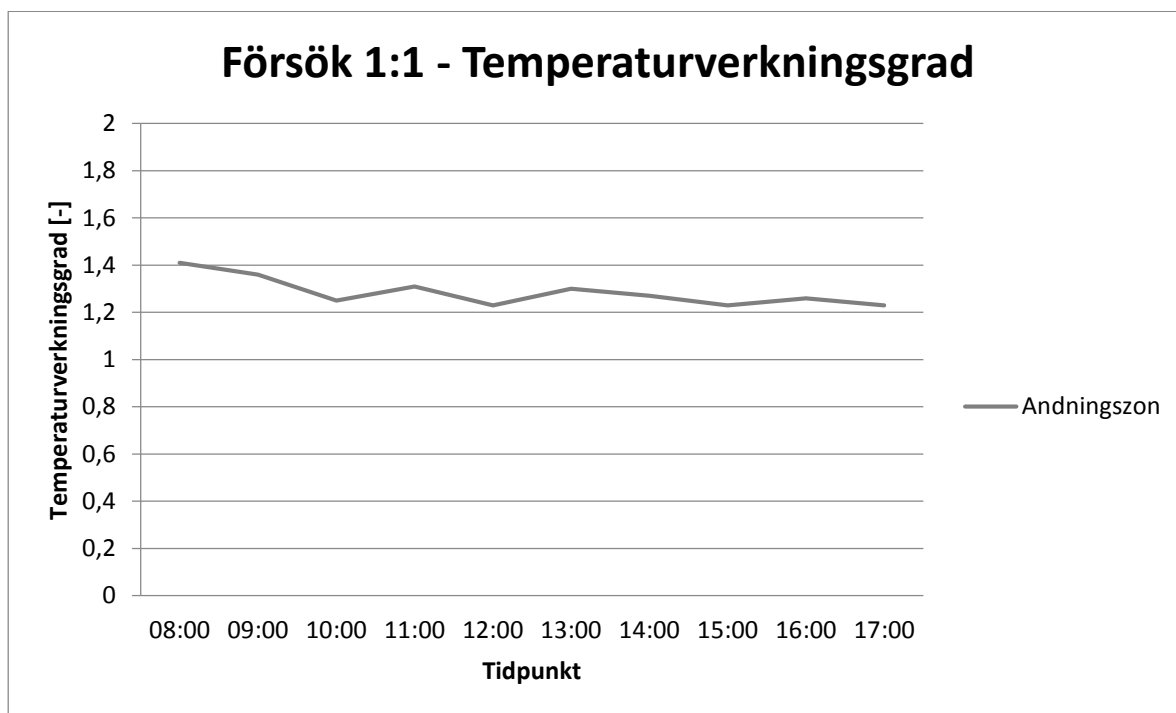
$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen

Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	1,41	1,36	1,25	1,31	1,23	1,3	1,27	1,23	1,26	1,23





*Temperaturverkningsgrad över arbetsdagen. Illustration av temperaturverkningsgrad i förhållande till tidpunkten.*

Beräknat medelvärde på temperaturverkningsgrad vid andningszonen: 1,26

#### Lufthastighet

Tilluftsdon: 0,03 m/s

1,1 m:

Vänster; 0,01 m/s

Mitten; 0,08 m/s

Höger; 0,08 m/s

0,1 m;

Vänster; 0,13 m/s

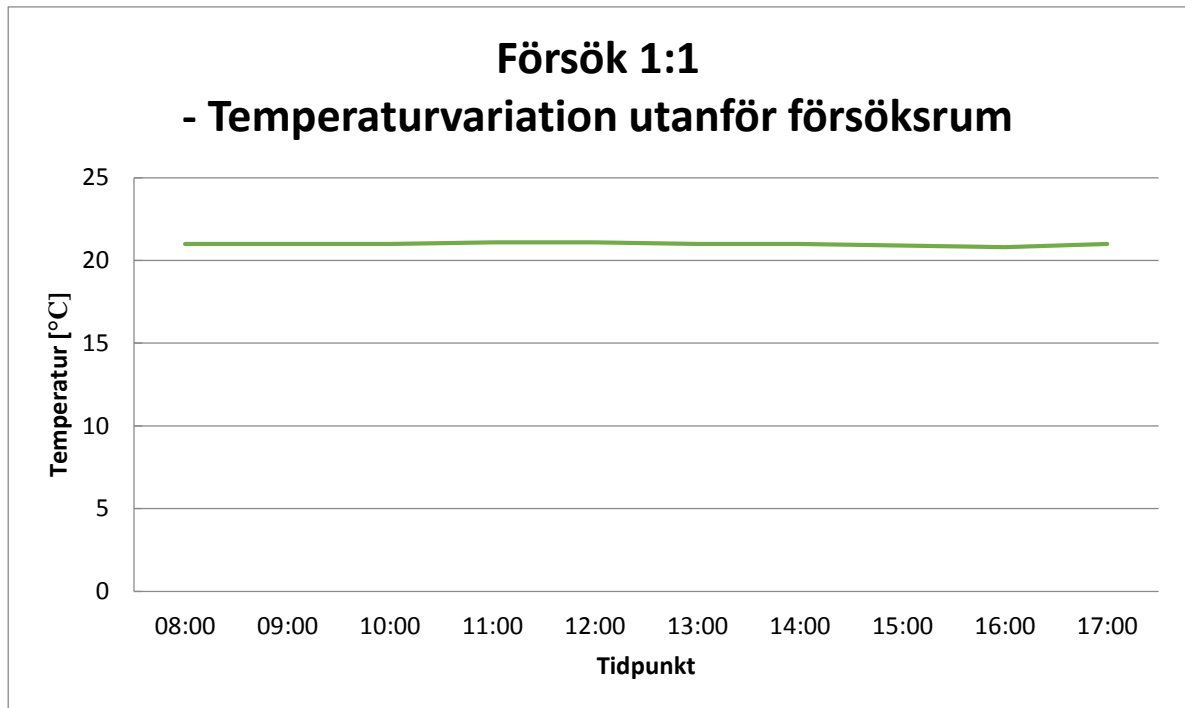
Mitten; 0,09 m/s

Höger; 0,04 m/s

## Temperaturskillnad utan- och innanför försöksrum

### Temperaturvariation utanför försöksrummet

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	21	21	21	21,1	21,1	21	21	20,9	20,8	21



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen [°C] i förhållande till tidpunkten.*

Utanför försöksrummet beräknas ett medelvärde till 21 °C. Innanför försöksrummet beräknas ett medelvärde till 20 °C. Temperaturavvikelse mellan ut- och insidan är således 1 °C.

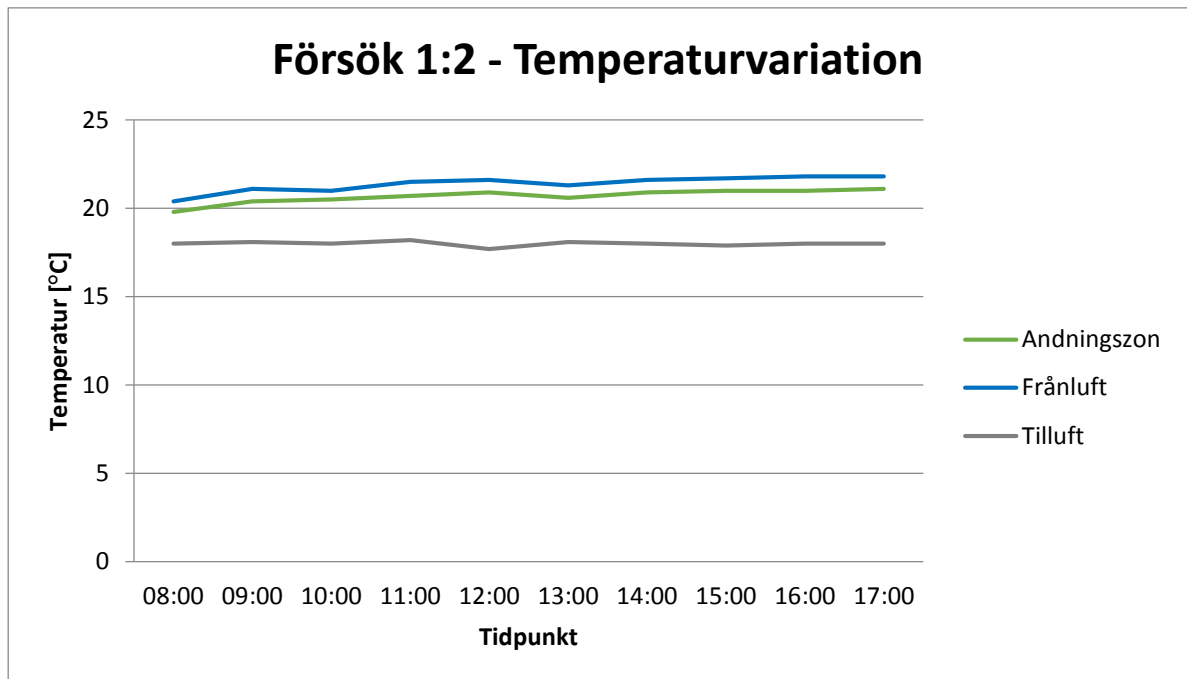
### Försök 1:2 - Konventionellt deplacerande ventilation

Innan undersökning kontrollerades att tilluftstemperaturen stabiliserad var inom intervallet  $18 \pm 0,2$  °C. Vidare uppmättes en relativ fuktighet utanför på 60 % och innanför försöksrummet på 61 %. Lufthastighet utanför uppmättes till 0,02 m/s. Samtliga värden uppfyllde således det önskade kriteriet innan undersökningen genomfördes.

## Temperaturvariation

Temperaturvariation i °C för tilluft, frånluft och andningszon

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	19,8	20,4	20,5	20,7	20,9	20,6	20,9	21	21	21,1
Frånluft	20,4	21,1	21	21,5	21,6	21,3	21,6	21,7	21,8	21,8
Tilluft	18	18,1	18	18,2	17,7	18,1	18	17,9	18	18



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.*

Beräknade medelvärden:

$$T_f = 21,1 \text{ °C}$$

$$T_a = 20,5 \text{ °C}$$

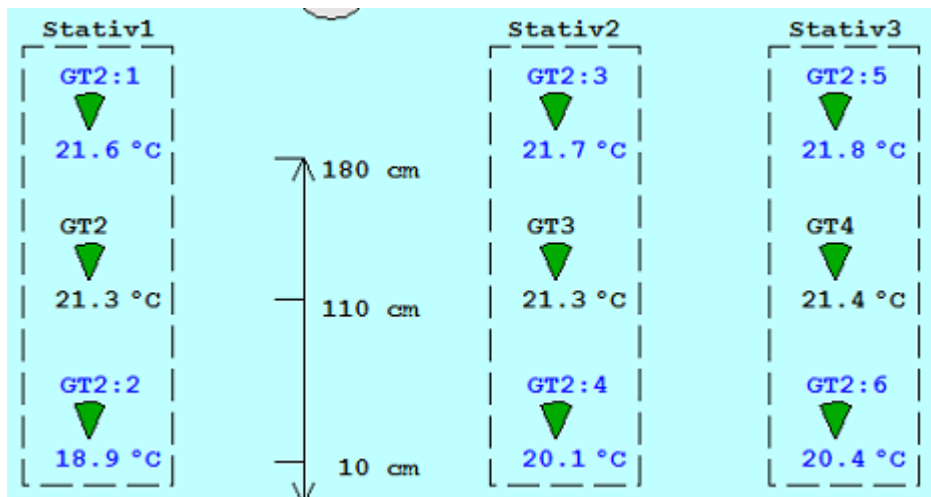
$$T_t = 18 \text{ °C}$$

Situationsbild:

Temperatur:

Tilluft: 18°C

Frånluft: 22 °C



Temperaturverkningsgrad

Följande samband råder:

$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

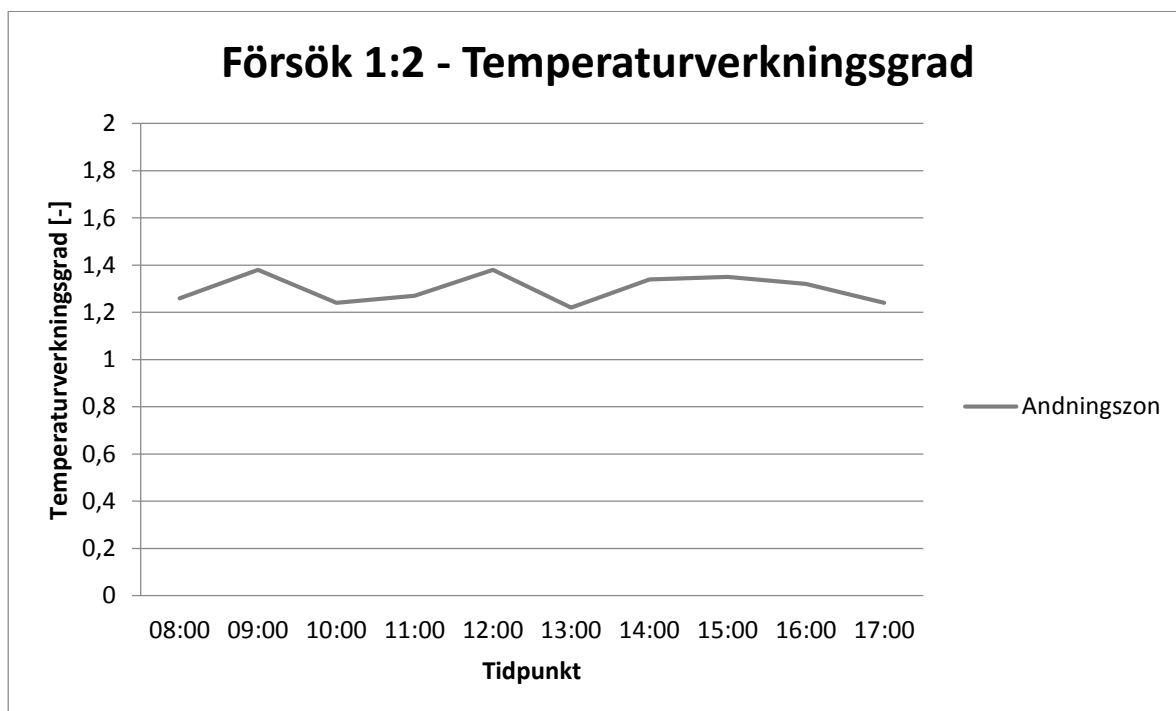
$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen

Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	1,26	1,38	1,24	1,27	1,38	1,22	1,34	1,35	1,32	1,24



*Temperaturverkningsgrad över arbetsdagen. Illustration av Temperaturverkningsgrad i förhållande till tidpunkten.*

Beräknat medelvärde på temperaturverkningsgrad vid andningszonen: 1,27

#### Lufthastighet

Tilluftsdon: 0,14 m/s

1,1 m:

Vänster; 0,02 m/s

Mitten; 0,05 m/s

Höger; 0,05 m/s

0,1 m;

Vänster; 0,18 m/s

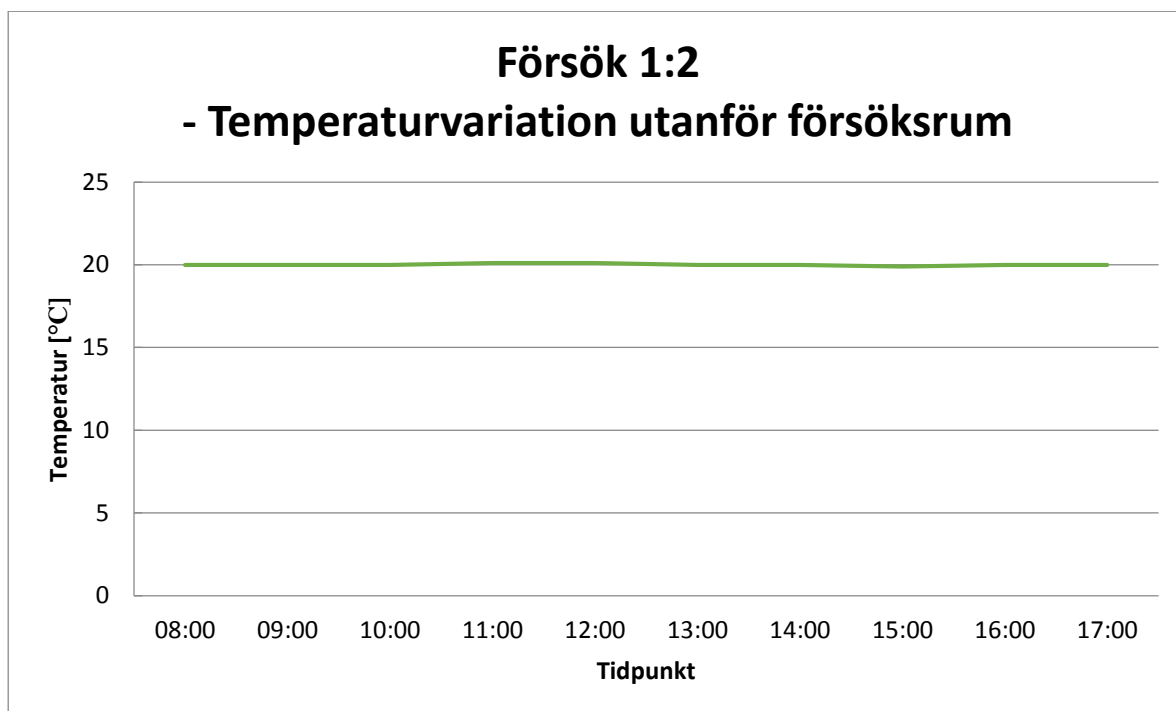
Mitten; 0,08 m/s

Höger; 0,09 m/s

Temperaturskillnad utan- och innanför försöksrum

Temperaturvariation utanför försöksrummet

Tidpunkt	08:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	20	20	20	20	19,9	19,9	20,1	20,1	20	20



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.*

Beräknat medelvärde från kurvan,  $T_{medel,ute}$ : 20 °C.

Beräknat medelvärde innanför försöksrum,  $T_{medel,inne}$ : 19 °C

Temperaturavvikelse mellan ut- och insida: 1 °C

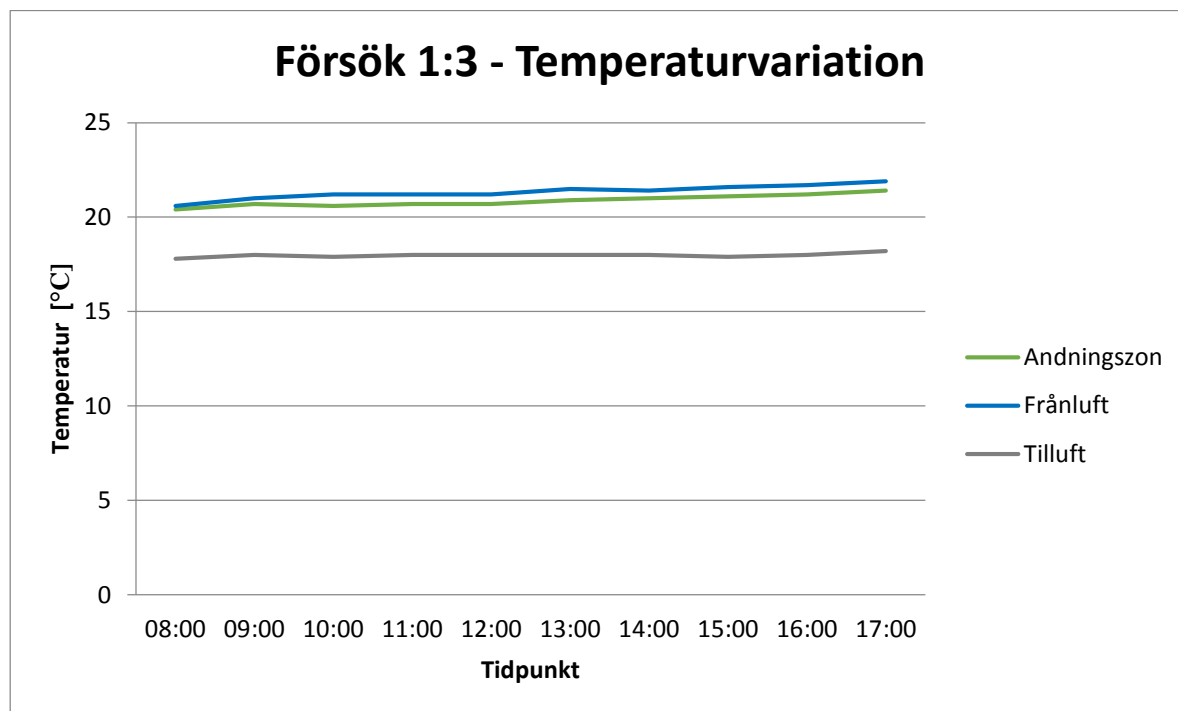
### Försök 1:3 - Omblandande ventilation

Innan undersökning kontrollerades att tilluftstemperaturen stabiliserad var inom intervallet 18±0,2 gr C. Vidare uppmättes en relativ fuktighet utanför på 61 % och innanför försöksrummet på 60 %. Lufthastighet utanför uppmättes till 0,02 m/s. Samtliga värden uppfyllde således det önskade kriteriet innan undersökningen genomfördes.

## Temperaturvariation

Temperaturvariation i °C för tilluft, frånluft och andningszon

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	20,4	20,7	20,6	20,7	20,7	20,9	21	21,1	21,2	21,4
Frånluft	20,6	21	21,2	21,2	21,2	21,5	21,4	21,6	21,7	21,9
Tilluft	17,8	18	17,9	18	18	18	18	17,9	18	18,2



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen [°C] i förhållande till tidpunkten.*

Beräknade medelvärden;

$$T_f = 21,3 \text{ °C (enligt bilaga 1)}$$

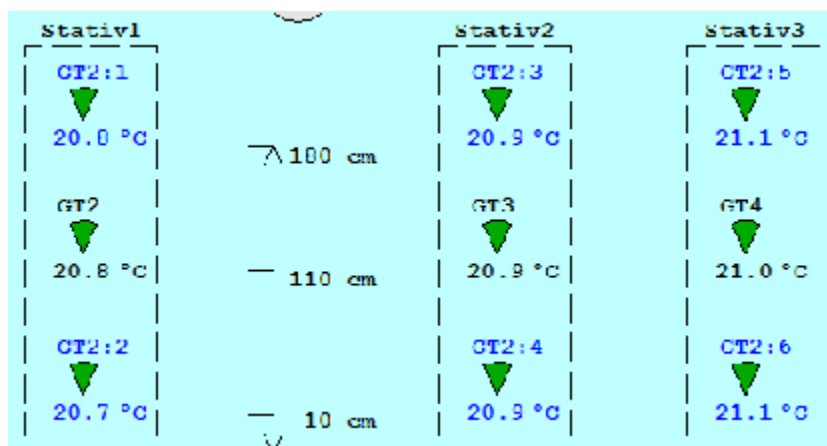
$$T_a = 20,9 \text{ °C (enligt bilaga 1)}$$

$$T_t = 18 \text{ °C (enligt bilaga 1)}$$

Situationsbild:

Tilluftstemp; 18 °C

Frånluftstemp; 21,2 °C



## Temperaturverkningsgrad

Följande samband råder:

$$\varepsilon_T = \frac{T_f - T_t}{T_a - T_t} \cdot 100$$

där

$T_f$  är medeltemperaturen i frånluften

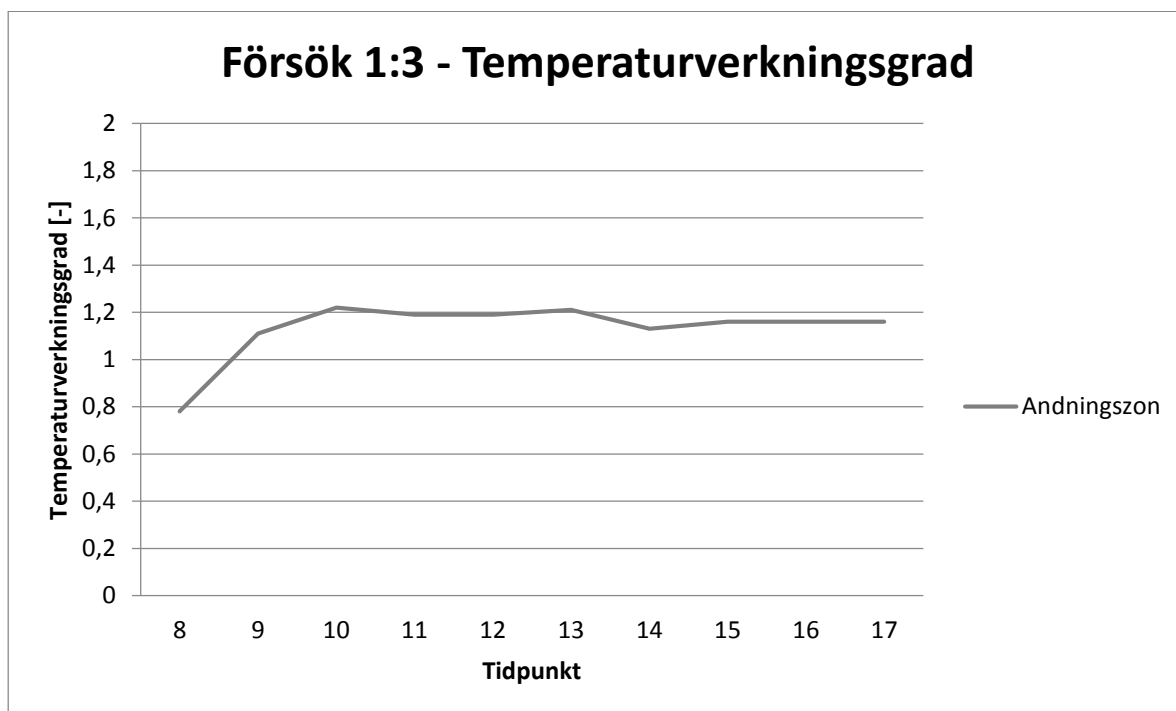
$T_t$  är medeltemperaturen i tilluften

$T_a$  är medeltemperaturen vid andningszonen

Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt

Tidpunkt	8:00	9:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon	20,4	20,7	20,6	20,7	20,7	20,9	21	21,1	21,2	21,4





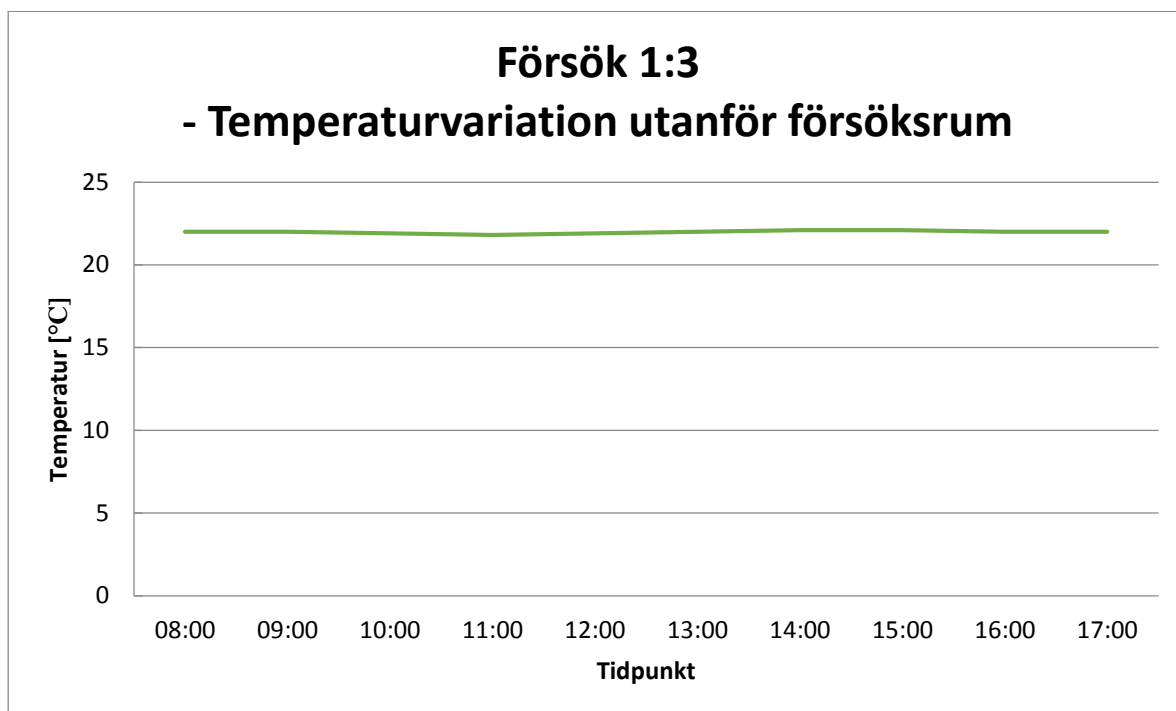
*Temperaturverkningsgrad över arbetsdagen. Illustration av temperaturverkningsgrad i förhållande till tidpunkten.*

Beräknat medelvärde på temperaturverkningsgrad: 1,16

Temperaturskillnad utan- och innanför försöksrum

Temperaturvariation utanför försöksrummet

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	22	22	21,9	21,8	21,9	22	22,1	22,1	22	22



*Temperaturvariation över arbetsdagen. Illustration av temperaturen i °C i förhållande till tidpunkten.*

Beräknat medelvärde från kurvan,  $T_{medel,ute}$ : 22 °C

Beräknat medelvärde innanför försöksrum,  $T_{medel,inne}$ : 20 °C

Temperaturavvikelse mellan ut- och insida: 2 °C

Andra försöksomgången  
Försök 2:1 – Temperaturvariation

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon, $T_a$	19	19,2	19,1	19,3	19,3	19	19,2	19,2	19,2	19,2
Frånluft, $T_f$	19,7	19,8	19,7	19,9	20	19,8	19,9	20,1	20	20,1
Tilluft, $T_t$	18	18	18	18	18	17,9	18	18,1	18	18

Försök 2:1 - Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt i andningszonen

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temp.verkn [-]	1,7	1,5	1,55	1,46	1,54	1,8	1,58	1,75	1,67	1,75

Försök 2:1 - Temperaturvariation utanför försöksrummet.

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	16,8	17,2	17,4	17,7	17,9	18,2	19,7	19,9	20,2	20,1

Försök 2:2 – Temperaturvariation

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon, $T_a$	19,5	19,5	19,6	19,5	19,5	19,5	19,6	19,6	19,5	19,6
Frånluft, $T_f$	19,9	19,9	20	19,8	20	20,1	19,8	19,7	20,1	20,2
Tilluft, $T_t$	18	18	17,9	18,1	18	18,1	17,9	18	18	18

Försök 2:2 - Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt i andningszonen

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temp.verkn [-]	1,27	1,27	1,25	1,2	1,33	1,4	1,13	1,06	1,4	1,56

Försök 2:2 - Temperaturvariation utanför försöksrummet

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	17,5	17,5	17,8	18	18	18,5	19,5	19,8	20,1	20

## Försök 2:3 – Temperaturvariation

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Andningszon, $T_a$	19,5	19,9	19,9	20,5	21	19,9	20,5	20,9	21	21,1
Frånluft, $T_f$	19,3	19,7	19,65	20	20,7	19,7	19,9	20,7	20,6	20,7
Tilluft, $T_t$	18	17,9	17,9	18	18	18	18,1	18,1	18	18

Försök 2:3 - Temperaturverkningsgrad för respektive tidpunkt i andningszonen

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temp.verkn [-]	0,87	0,89	0,87	0,8	0,9	0,89	0,76	0,93	0,87	0,87

Försök 2:3 - Temperaturvariation utanför försöksrummet

Tidpunkt	08:00	09:00	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00
Temperatur [°C]	18,3	18,3	18,4	18,5	18,6	18,6	18,7	18,7	18,7	18,6

Värmelasternas effekt för respektive tidpunkt

Tidpunkt	08:00	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30
Effekt Personsimulator	100	100	100	0	0	100	100	100
Effekt datorläda och skärm	101	101	101	101	101	101	101	101
Effekt belysning	100	100	100	100	100	100	100	100
Effekt fönstersimulator	83	96,5	110	120	130	142,5	155	155

12:00	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00	16:30	17:00
100	0	0	100	100	100	0	0	100	100	100
101	101	101	101	101	101	101	101	101	101	101
100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
155	155	155	155	155	141,5	128	119,5	111	96,5	82