

Utvärdering av avklingnings- och homogenspridningsmetoden Vid jämförelse mellan deplacerande, omblandande och utjämnande ventilation

Joakim Sandell

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet, 2017
Rapport TVIT--17/5060



Utvärdering av avklingnings- och
homogenspridningsmetoden
Vid jämförelse mellan deplacerande,
omblandande och utjämnande
ventilation

Joakim Sandell

© Joakim Sandell
ISRN LUTVDG/TVIT--17/5060--SE(121)

Avdelningen för installationsteknik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Abstract

People spend a lot of time indoors, closer to 90% of their lifetime. To obtain a good indoor climate with good air quality buildings need to be ventilated. Therefore, they are often equipped with mechanical ventilation systems. Nevertheless, SBS (Sick Building Syndrome) is a serious problem. The reason that some buildings become "sick" is believed to be due to, among other things, poor ventilation. To determine if a ventilation system is good or bad, several measures of the ventilation system can be determined. It can be made by many methods, eg. tracer gas methods as the decay method and the homogeneous emission method.

The aim of this study was to calculate various measures of the functions of the ventilation systems, with the aim to determine whether the results can be related to how the air movements actually looked like and if the methods' results were reliable when nitrous oxide was used as a tracer-gas. To determine the air movements, tests with smoke were also performed. A secondary objective of the study was to compare the different ventilation systems, with the aim to determine which yielded the best results. This work was conducted on AirSon Engineering AB's headquarters in Angelholm. Measurements were carried out in a test room which would be compared to a normal office. With each method tests were made on a mixing, a displacement and leveling ventilation system.

Measurement methods yielded low results for both the air exchange efficiency and the ventilation efficiency. But the movement of air in the test room was poor and the results were therefore considered to be correct. With the homogenous emission method, too few results were obtained to make a fair assessment of the reliability of the method, regarding air exchange efficiency. However, the reliability of local ventilation index calculations was considered to be good. With the decay method, all results could be related to how it actually looked in the room and the method was therefore considered to provide reliable results with nitrous oxide as a tracer.

Sammanfattning

Människor spenderar mycket tid inomhus, närmre 90 % av sin livstid. För att erhålla ett bra inneklimat med god luftkvalité krävs att byggnader ventileras. Därför utrustas de ofta med mekaniska ventilationssystem. Trots detta är SBS (Sick Building Syndrome) ett allvarligt problem. Orsaken till att vissa byggnader blir "sjuka" tros bero på bland annat dålig ventilation. För att avgöra om ett ventilationssystem är bra eller dåligt kan ett antal mått på ventilationssystemets funktion bestämmas. Det kan göras med ett antal spårgasmetoder, tex. Avklingningsmetoden och homogenspridningsmetoden.

Målet med studien var att beräkna olika mått på ventilationssystemets funktion, med syftet att kunna bedöma om resultaten kan relateras till hur luftströmningen faktiskt såg ut och om metodernas resultat var tillförlitliga då lustgas användes som spårgas. För att avgöra luftströmningen utfördes även röktester. Ett sekundärt mål med studien var att jämföra de olika ventilationssystemen med syftet att bedöma vilket som gav bäst resultat. Arbetet bedrevs på AirSon Engineering AB:s huvudkontor i Ängelholm. Mätningar utfördes endast på ett försöksrum vilket skulle liknas vid ett normalt kontorsrum. Med varje metod gjordes tester på ett omblandande, ett deplacerande och ett utjämnande ventilationssystem.

Mätmetoderna gav låga resultat med avseende på luftutbytes- och ventilationseffektivitet. Då luftströmningen i försöksrummet var dålig kunde resultaten därför ändå anses vara korrekta. Med homogenspridningsmetoden erhöles för få resultat för att göra en rättvis bedömning av metodens tillförlitlighet, vad gällde luftutbyteseffektiviteten. Dock ansågs resultaten från beräkningen av lokalt ventilationsindex vara tillförlitliga. Med avklingningsmetoden kunde alla resultat relateras till hur det faktiskt såg ut i försöksrummet och mätmetodens ansågs ge tillförlitliga resultat med lustgas som spårgas.

Förord

Studien är ett examensarbete (30hp) i utbildningen väg- och vattenbyggnad (300hp), vilket utförts för Lund Tekniska Högskola, vid avdelningen för installations- och klimatiseringslära. Examensarbetet genomfördes på AirSon Engineering AB i Ängelholm.

En stor del av arbetet har bedrivits upp AirSons huvudkontor i Ängelholm. Därför vill jag först rikta ett stort tack till Dan Kristensson, vd, för all tid han lagt ner för att svara på frågor och funderingar, samt för hans engagemang i mitt examensarbete.

Jag vill även passa på att tacka personalen på AirSon, vilka varit mycket tillmötesgående. Var inte Dan tillgänglig fanns där alltid någon som tog sig tid.

Förutom dessa personer riktas även ett stort tack Dennis Johansson, avdelningsföreståndare för installations- och klimatiseringslära, som varit handledare för arbetet. Hans kunskap och synpunkter har varit en viktig del i arbetet.

Till sist vill jag tacka Birgitta Nordquist, universitetslektor på installations- och klimatiseringslära, som varit examensarbetets examinator.

Lund, april 2017

Joakim Sandell

Innehållsförteckning

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund och syfte	1
1.2	Avgränsningar	2
1.3	Liknande studier	2
2	Teori	5
2.1	Luftföringsprinciper	5
2.1.1	Deplacerande luftföring	5
2.1.2	Envägsströmning	8
2.1.3	Omblandande luftföring	9
2.1.4	Kortslutningsströmning	10
2.2	Relevanta komfort- och hygienkrav - uteluftsflöde, tilluftstemperatur, rumstemperatur, luftutbyteseffektivitet, drag och vertikal temperaturgradient	11
2.3	Ventilationssystemets funktion	11
2.3.1	Temperaturverkningsgrad	11
2.3.2	Lokalt ventilationsindex	12
2.3.3	Ventilationseffektivitet	12
2.3.4	Lokal medelålder	12
2.3.5	Rumsluftens medelålder	13
2.3.6	Nominell tidskonstant	13
2.3.7	Luftutbytestid	14
2.3.8	Luftutbyteseffektivitet	14
2.3.9	Kyleffekt	14
2.4	Mätmetoder	15
2.4.1	Homogenspridningsmetoden	15
2.4.2	Avklingningsmetoden	16
2.4.3	För- och nackdelar med metoderna	19
3	Metod	21
3.1	Mätutrustning	21
3.1.1	Temperaturgivare	21
3.1.2	Spårgas	22
3.1.3	Spårgasanalysator	23
3.1.4	Programvara spårgasanalysator	23
3.1.5	Hastighetsmätare	23
3.1.6	Luftflödesmätare	23
3.2	Mätningar	24

3.2.1	Kalibrering av temperaturgivare	24
3.2.2	Inverkan av spårgasens densitetsskillnad och spridning	24
3.2.3	Homogenspridningsmetoden.....	25
3.2.4	Lufttemperaturmätning	26
3.2.5	Avklingningsmetoden.....	26
3.2.6	Röktest.....	26
3.2.7	Luftflödesmätning i värmekällornas konvektionsströmmar	27
3.3	Försöksuppställning.....	27
3.3.1	Ventilationsdon	28
3.3.2	Värmeeffekt.....	29
3.4	Mätfall.....	31
3.4.1	Homogenspridningsmetoden och lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt.....	31
3.4.2	Homogenspridningsmetoden och lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt.....	32
3.4.3	Avklingningsmetoden med låg värmeeffekt	33
3.4.4	Avklingningsmetoden med hög värmeeffekt.....	34
4	Resultat	35
4.1	Deplacerande ventilation	35
4.1.1	Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt	35
4.1.2	Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt	38
4.1.3	Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt	41
4.1.4	Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt.....	44
4.1.5	Avklingningsmätning med låg värmeeffekt	47
4.1.6	Avklingningsmätning med hög värmeeffekt	49
4.1.7	Röktest.....	51
4.2	Omblandande ventilation.....	52
4.2.1	Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt	52
4.2.2	Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt	55
4.2.3	Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt	58
4.2.4	Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt.....	61
4.2.5	Avklingningsmätning med låg värmeeffekt	64
4.2.6	Avklingningsmätning med hög värmeeffekt	66
4.2.7	Röktest.....	68
4.3	Utjämnande ventilation.....	69
4.3.1	Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt	69

4.3.2	Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt	72
4.3.3	Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt	75
4.3.4	Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt.....	78
4.3.5	Avklingningsmätning med låg värmeeffekt	81
4.3.6	Avklingningsmätning med hög värmeeffekt	83
4.3.7	Röktest.....	85
4.4	Luftflödesmätning i värmekällornas konvektionsströmmar	86
4.5	Summering resultat	87
5	Diskussion	89
5.1	Lufttemperatur	89
5.2	Temperaturverkningsgrad	90
5.3	Kyl- och värmeeffekt.....	90
5.4	Homogenspridningsmetoden	90
5.5	Avklingningsmetoden	92
5.6	Röktester	93
5.7	Jämförelse med liknande studier	93
5.8	Eventuella fel	94
5.8.1	Uteluftsflöde	94
5.8.2	Rummets täthet	95
5.8.3	Rotametern	96
5.8.4	Temperaturgivare tilluft.....	96
5.8.5	Loggning av temperatur	96
5.8.6	Datorn vid variabel värmeeffekt	96
5.8.7	Placering av omblandande och deplacerande tilluftsdon	96
5.9	Framtida mätningar	96
6	Slutsats.....	99
7	Referenser.....	101
	Bilaga 1 – Mätschema homogenspridningsmetoden	103
	Bilaga 2 – Mätschema avklingningsmetoden.....	104
	Bilaga 3 – Kalibrering temperaturgivare	105
	Bilaga 4 - Kontroll spridning av spårgas samt inverkan av densitetskillnad mot luft	106
	Bilaga 5 – Lufttemperatur i rum utanför försöksrum samt till- och frånluftsflöde	107
	Bilaga 6 – Avklingningsmätningar total area och moment	113

Figurförteckning

Figur 1: Plym från värmekälla	6
Figur 2: Principskiss luftströmning i kontor med deplacerande ventilation	7
Figur 3: Principskiss luftströmning i kontor med utjämnande ventilation	8
Figur 4: Principskiss luftströmning i kontor med envägsströmning	9
Figur 5: Principskiss luftströmning i kontor med omblandande ventilation	9
Figur 6: Avklingningskurva uppdelad i mätt area och resterande area	16
Figur 7: Avklingningskurva lin-log	17
Figur 8: Bestämning av luftens lokala medelålder	18
Figur 9: Sektionsritning placering temperaturgivare	22
Figur 10: Planritning spårgasutsläpp	23
Figur 11: Planritning placering av kanaler för mätning av spårgaskoncentrationer vid densitetskontroll	25
Figur 12: Sektionsritning placering av kanaler för mätning av spårgaskoncentrationer	26
Figur 13: Principskiss försöksrum	27
Figur 14: Planritning försöksrum	28
Figur 15: Värmekällornas effekt vid mätning med konstant värmeeffekt	31
Figur 16: Värmekällornas effekt vid mätning med variabel värmeeffekt	32
Figur 17: Värmekällornas effekt vid fallet med låg värmeeffekt	33
Figur 18: Värmekällornas effekt vid fallet med hög värmeeffekt	34
Figur 19: Lufttemperatur i försöksrum vid konstant värmeeffekt och deplacerande ventilation	35
Figur 20: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid konstant värmeeffekt och deplacerande ventilation	36
Figur 21: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt	37
Figur 22: Spårgaskoncentration vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt	38
Figur 23: Lokalt ventilationsindex vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt	39
Figur 24: Lokal medelålder vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt	40
Figur 25: Lufttemperatur i försöksrum med variabel värmeeffekt och deplacerande ventilation	41
Figur 26: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och deplacerande ventilation	42
Figur 27: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt	43
Figur 28: Spårgaskoncentration vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt	44
Figur 29: Lokalt ventilationsindex vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt	45
Figur 30: Lokal medelålder vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt	46
Figur 31: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och deplacerande ventilation	47
Figur 32: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och deplacerande ventilation	49
Figur 33: Luftströmning i försöksrummet vid deplacerande ventilation	51
Figur 34: Lufttemperatur i försöksrum vid konstant värmeeffekt och omblandande ventilation	52
Figur 35: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid konstant värmeeffekt och omblandande ventilation	53
Figur 36: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt	54
Figur 37: Spårgaskoncentration vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt	55
Figur 38: Lokalt ventilationsindex vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt	56
Figur 39: Lokal medelålder vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt	57
Figur 40: Lufttemperatur i försöksrum vid variabel värmeeffekt och omblandande ventilation	58
Figur 41: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och omblandande ventilation	59
Figur 42: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt	60
Figur 43: Spårgaskoncentration vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt	61
Figur 44: Lokalt ventilationsindex vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt	62
Figur 45: Lokal medelålder vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt	63
Figur 46: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och omblandande ventilation	64
Figur 47: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation	66
Figur 48: Luftströmning i försöksrummet vid omblandande ventilation	68
Figur 49: Lufttemperatur i försöksrum med konstant värmeeffekt och utjämnande ventilation	69
Figur 50: Temperaturverkningsgrad i försöksrum med konstant värmeeffekt och utjämnande ventilation	70
Figur 51: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt	71
Figur 52: Spårgaskoncentration vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt	72
Figur 53: Lokalt ventilationsindex vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt	73
Figur 54: Lokal medelålder vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt	74
Figur 55: Lufttemperatur i försöksrum med variabel värmeeffekt och utjämnande ventilation	75

Figur 56: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och utjämnande ventilation.....	76
Figur 57: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt	77
Figur 58: Spårgaskoncentration vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt	78
Figur 59: Lokalt ventilationsindex vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt	79
Figur 60: Lokal medelålder vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt.....	80
Figur 61: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och utjämnande ventilation.....	81
Figur 62: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och utjämnande ventilation	83
Figur 63: Luftströmning i försöksrummet med utjämnande ventilation	85
Figur 64: Luftflöde i värmekällornas konvektionsströmmar	86
Figur 65: Spårgasens koncentration i rummet vid avstängt ventilationssystem	106
Figur 66: Temperatur i rum utanför försöksrum vid deplacerande ventilation och konstanta värmelaster.....	107
Figur 67: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid deplacerande ventilation och konstanta värmelaster	107
Figur 68: Temperatur i rum utanför försöksrum vid deplacerande ventilation och variabla värmelaster	108
Figur 69: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid deplacerande ventilation och variabla värmelaster	108
Figur 70: Temperatur i rum utanför försöksrum vid omblandande ventilation och konstanta värmelaster	109
Figur 71: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid omblandande ventilation och konstanta värmelaster.....	109
Figur 72: Temperatur i rum utanför försöksrum vid omblandande ventilation och variabla värmelaster	110
Figur 73: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid omblandande ventilation och variabla värmelaster.....	110
Figur 74: Temperatur i rum utanför försöksrum vid utjämnande ventilation och konstanta värmelaster	111
Figur 75: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid utjämnande ventilation och konstanta värmelaster	111
Figur 76: Temperatur i rum utanför försöksrum vid utjämnande ventilation och variabla värmelaster	112
Figur 77: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid utjämnande ventilation och variabla värmelaster	112
Figur 78: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och deplacerande ventilation	113
Figur 79: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och deplacerande ventilation	114
Figur 80: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och omblandande ventilation	116
Figur 81: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation	117
Figur 82: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och utjämnande ventilation.....	119
Figur 83: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och utjämnande ventilation	120

Nomenklatur

Andningszon	Zon vilken personen hämtar inandningsluft från. I studien definierad för en sittande person, dvs. 1,1 m över golvet
Drag	Lokal nedkylning av kroppen som leder till sänkt hudtemperatur. Upplevs besvärande då medelhastigheten varaktigt överstiger 0,15 m/s samtidigt som den operativa temperaturen ligger mellan 20 och 24 grader. Drag upplevs starkare ju kallare rumsluften är
Frånluft	Luft som evakueras från ett utrymme
Frånluftsdon	Ventilationsdon vilket evakuerar luft från ett utrymme
Förorening	Oönskad kemisk substans i luften
Inneklimat	"Människans omgivningssituation med avseende på de faktorer som påverkas av tekniska installationer" (Warfvinge & Dahlblom, 2010)
Isotermisk	Vid konstant temperatur
Isotermisk inblåsning	Tillförsel av luft med konstant och samma temperatur som rumsluften
Isovel	Kurva som sammanbinder punkter med lika fart.
Kallras	Luft rörelser som bildas vid kalla ytor. Luft vid en kall yta kyls, blir tyngre och sjunker nedåt
Kastlängd	Avståndet mellan tilluftsdon och isovel 0,2 m/s
Konvektionsström	Luftflöde på grund av värmekällor
Plym	Konformad konvektionsström
SBS (Sick Building Syndrome)	Innebär att vissa människor t.ex. känner trötthet, blir illamående och/eller har koncentrationssvårigheter då de vistas i en "sjuk byggnad" (Warfvinge & Dahlblom, 2010)
Stagnationszon	Område i vistelsezonen som inte nås av ventilationsluft
Tilluft	Ventilationsluft som tillförs ett utrymme
Undertemperatur	Då tilluftens temperatur är lägre än rumstemperaturen
Uteluftsflöde	Tillförsel av ren uteluft till ett utrymme

Ventilationsflöde	Flöde som tillförs och evakueras från ett utrymme
Ventilerad volym	Den volym som ventileras av ventilationssystemet
Vertikal temperaturgradient	Temperaturskillnad i höjded
Vistelsezon	Enligt Boverkets definition. Ett horisontellt plan 0,1 m över golvet och ett på 2,0 m höjd. Vertikala plan 0,6 m från vägg. Framför dörr och fönster 1,0 m
Överluftsdon	Ventilationsdon vilket låter luft strömma från ett utrymme till ett annat

1 Introduktion

Människor spenderar mycket tid inomhus, närmre 90 % av sin livstid (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Det kan vara på jobbet, vid sömn eller kanske sin lediga tid hemma. Inneklimatet påverkar en persons hälsa, komfort samt prestationsförmåga (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Därför är inneklimatet mycket viktigt att ta hänsyn till. Hur en person upplever inneklimatet beror bland annat på faktorer som lufttemperatur, operativ temperatur, lufthastighet, golvtemperatur, vertikal temperaturgradient och luftkvalité (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Koldioxid, damm fuktöverskott med flera är några faktorer som påverkar luftkvalitén (Warfvinge & Dahlblom, 2010). För att erhålla ett bra inneklimat med god luftkvalité krävs att byggnader ventileras, dvs. att gammal förorenad luft i byggnaden evakueras och ersätts av ny frisk uteluft. För att erhålla god ventilation utrustas byggnader ofta med ett system för att underlätta detta. I äldre byggnader var självdragssystem vanligt men numera används i regel någon form av mekanisk ventilation. Trots detta är SBS (Sick Building Syndrome) ett allvarligt problem (Svensson, 1995). Vid nya eller renoverade byggnader uppskattar WHO (World Health Organization) att 10–30 % av dessa kan klassas som "sjuka byggnader" (Svensson, 1995). Orsaken till att vissa byggnader blir "sjuka" tros bero på bland annat dålig ventilation (Warfvinge & Dahlblom, 2010). För att avgöra om ett ventilationssystem är bra eller dåligt kan ett antal mått på ventilationssystemets funktion bestämmas. Det kan göras med ett antal spårgasmetoder, tex. avklingningsmetoden.

1.1 Bakgrund och syfte

Att studien genomfördes grundade sig i en förfrågan från energi- och installationsföretaget AirSon Engineering AB. För att bestämma ett ventilationssystemets funktion utförde de avklingningsmätningar med partiklar. Vilka partiklar som ska användas samt hur spridningen ska bli likformig är två problem de stött på. Ett annat problem var att deras nuvarande metod inte fungerade för att avgöra hur ventilationssystemets funktion förändrades vid varierande värmebelastning. Därför funderade de på att använda spårgas istället för partiklar och/eller att byta mätmetod. Eftersom de inte utfört mätningar med vare sig spårgas eller med någon annan metod önskade de en utvärdering av detta. I denna studie gjordes därför en utvärdering av deras nuvarande metod men med spårgas istället för partiklar. Även en alternativ metod, kallad homogenspridningsmetoden, undersöktes. Det är en metod vilken skulle kunna ge svar på hur funktionen varierar över tiden vid varierande värmebelastning.

Målet med studien var att mäta och beräkna olika mått på ventilationssystemets funktion med både avklingnings- och homogenspridningsmetoden, med syftet att kunna bedöma om resultaten kunde relateras till hur ventilationen i försöksrummet faktiskt såg ut och om metodernas resultat var tillförlitliga. Ett sekundärt mål med studien var att jämföra de olika ventilationssystemen med syftet att bedöma vilket som gav bäst resultat. Arbetet bedrevs på AirSon Engineering AB:s huvudkontor i Ängelholm.

1.2 Avgränsningar

Endast de två mätmetoderna, homogenspridningsmetoden och avklingningsmetoden undersöktes. Endast en spårgas användes och mätningar utfördes endast på ett försöksrum vilket skulle liknas vid ett normalt kontorsrum. Med varje metod gjordes tester på ett ventilationssystem med omblandande luftföring och två system med deplacerande luftföring. Metoderna utvärderades enbart med hänsyn till ett bestämt luftflöde. Därmed kontrollerades inte om metodernas tillförlitlighet påverkades av luftflödet. Ingen hänsyn togs till eventuellt drag i vistelsezonen.

1.3 Liknande studier

Liknande studier utgörs bland annat av (Erlandsson & Glyré, 2014) och (Henriksson & Nilsson, 2016), vilka också genomfördes på AirSon Engineering. Försöksrummet vilket mätningarna utfördes i var 5,1 m långt, 2,4 m brett och 2,7 m högt med ett justerbart golv och skulle likna ett normalt kontor. Mätningar genomfördes på tre olika ventilationsdon, ett omblandande, ett deplacerande och ett utjämnande, vilket benämndes Airshower, eller vertikalt deplacerande. Temperaturgivare var placerade på 0,1 m, 1,1 m samt 1,8 m höjd. I bägge studierna användes ventilationsflödet 38,9 l/s, tilluftstemperaturen 18 °C och luftföringsprinciperna åstadkoms med samma ventilationsdon.

I Erlandsson & Glyré (2014) mättes lufttemperatur och lufthastighet vid variabel värmeeffekt mellan kl. 08-17. Det utfördes även röktester. Syftet var att avgöra vilken ventilationsprincip och i synnerhet vilket ventilationsdon som gav störst termisk komfort. Värmebelastning vid mätningar bestod av belysning (72 W), personsimulator (100 W), solsimulator (155 W maxeffekt) och datorsimulator vilken skulle liknas vid en stationär dator med skärm (104 W). Lysrörsarmaturen plockades bort då röktester visade att den störde luftströmmen.

Denna studie visade att med utjämnande ventilation var medeltemperaturen ca. 19,2 °C i andningszonen och ca. 19,7 °C i frånluften. Medeltemperaturverkningsgraden i andningszonen under mätningen var 1,62. Gränsen mellan en nedre renare zon och övre förorenad zon kunde ses nära taket. De hade funderingar på att luftstrålen dog med sig varm förorenad luft ner till golvnivå vilket minskade vertikala temperaturgradienten. Deplacerande ventilation gav en mindre vertikaltemperaturgradient än utjämnande. I andningszonen erhöles medeltemperaturen 19,5 °C och medeltemperaturverkningsgraden 1,29. Medeltemperaturen i frånluften var 20,0 °C. Även vid deplacerande ventilation var gränsen mellan den övre och undre zonen nära taket. För omblandande ventilation var medeltemperaturen i andningszon och frånluft nästintill lika, 20,4 °C respektive 20,1 °C, vilket tydde på lite kortslutning mellan till- och frånluft. Medeltemperaturverkningsgraden var 0,87.

Slutsatsen var att den termiska komforten var bra. Man fick som förväntat en lägre temperatur i vistelsezonen för deplacerande och utjämnande ventilation. Dock borde den vertikala temperaturgradienten varit större. Eftersom de metoderna kyler effektivare kan tilluftstemperaturen ökas för att uppnå samma temperatur som omblandande, vilket ger en energibesparing om uteluftstemperaturen är högre än tilluftstemperaturen.

Henriksson & Nilsson (2016) var den senaste studien som gjordes på AirSon Engineering AB. I den mättes lufttemperatur och spårgasmätningar med lustgas och

homogenspridningsmetoden. Värmeeffekter i försöksrummet bestod av en dator (82 W), personsimulator (90 W), belysning (93 W) samt en solsimulator (151 W maxeffekt). Jämfört med i Erlandsson & Glyré (2014) var denna byggd av spegelvärmare och på metallplattor för att inte ackumulera värme. Placeringen hade också ändrats, istället för att hänga på väggen var solsimulatorn ställd på golvet, vilket bör ha påverkat mätningarna. Två fall undersöktes, ett med konstant värmeeffekt och med variabel. Vid konstant värmeeffekt var belysning, dator och personsimulator igång konstant. Vid det variabla fallet var alla värmekällor igång med varierande effekt under mätningen. Syftet var att kontrollera om ett bra termiskt klimat erhöles med utjämnande ventilation i kontorsmiljö, samt att jämföra det med ett omblandande och ett deplacerande ventilationssystem. Relevanta resultat som kan togs fram var lufttemperatur, temperaturverkningsgrad, luftens lokala medelålder, lokalt ventilationsindex och ventilationseffektivitet. Vid beräkning av ventilationseffektiviteten gjordes antagandet att rumsluftens medelålder var samma som lokala medelåldern i frånluften. Detta antagande stämmer för ett perfekt omblandande system men ej för deplacerande ventilation. Beräknade ventilationseffektiviteter anses därför vara felaktiga och ingen vikt läggs vid dessa. Lufttemperaturgivarna hade samma placering som i Erlandsson & Glyré (2014). För att sprida spårgasen jämnt användes 24 utsläpp vilka var fördelade i tre horisontella skikt. Mätkanalerna från spårgasanalysatorn var placerade i frånluft, två stycken vid personsimulatorn, en på 1,1 m och en 1,8 samt tre stycken på motsatt sida i rummet, en på 0,1 m, en på 1,35 m och en på 2,6 m.

Med omblandande ventilation och konstant värmeeffekt var lokala medelåldern jämn, ca. 24 min överallt i försöksrummet och ventilationsindexet ca. 1,1. Temperaturen uppgick till ca. 23 °C i frånluften samt 22 °C på 0,1 m, 1,1 m och 1,8 m. Temperaturverkningsgraden var ca 1,2–1,5 på alla höjder. Vid variabel värmeeffekt steg tilluftstemperaturen till 20 °C under mätningen, vilket medförde en högre lufttemperatur och temperaturverkningsgrad. Om det påverkade lokal medelålder och lokalt ventilationsindex konstaterades inte. Med utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt var lokala medelåldern ca. 25–26 min i hela försöksrummet och ventilationsindexet var 0,9–1,0. Lufttemperaturen uppgick till 23 °C på 1,8 m, 22 °C på 1,1 m samt 21 °C i frånluften och på 0,1 m. Med variabel värmeeffekt erhöles liknande resultat för lokal medelålder och lokalt ventilationsindex men något högre. Temperaturen var 23,5 °C i frånluften, 22,5 °C på 1,8 m och 22 °C på 0,1 m. Någon temperatur på 1,1 m erhöles ej då något var fel med givaren. Temperaturverkningsgraden vid konstant värmeeffekt var ca. 0,8–1,1. Med variabel värmeeffekt redovisades temperaturverkningsgraden enbart på 0,1 m och där erhöles 1,4–1,8. Deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt gav lokala medelåldern 23 min och lokala ventilationsindexet 1,0. Temperaturen var 23 °C i frånluften, 21,5 °C på 1,8 m, 21 °C på 1,1 m och 19,5 °C på 0,1 m. Det gav temperaturverkningsgraden 1,3–1,6 på 1,8 m samt 1,1 m, 0,1 m redovisades ej. Med variabel värmeeffekt erhöles lokala medelåldern 25–29 min och lokala ventilationsindexet 0,8–1,0. Med variabel värmeeffekt redovisades inga lufttemperaturer eller temperaturverkningsgrader.

På varje ventilationssystem utfördes även spårgasmätning där ett par kanaler placerats under det justerbara golvet. Resultaten tydde på att utrymmet under golvet ventilerades med rumsventilation, vilket medförde att en större volym än tänkt ventilerades och att tilluften vid deplacerande och utjämnande ventilation kunde strömma ned under golvet istället för ut med det.

Det fanns en del osäkerheter i studien, bl.a. det justerbara golvet vilket borde tätas för framtida mätningar. Det användes även två olika typer av lustgas. Till mätningarna med konstant värmeeffekt användes medicinsk lustgas och till de med variabel användes en lustgas med lägre renhet. Andra osäkerheter som nämns var att försöksrummet inte var tillräckligt tätt och mätutrustningens noggrannhet. För framtida mätningar rekommenderades att hänsyn togs till osäkerheterna samt att mätvärdena jämfördes med CFD (Computational Fluid Dynamics) simuleringar.

På grund av osäkerheterna kunde inte någon slutsats dras om vilket ventilationssystem som var bäst. De skriver vidare att tätning av golv och väggar troligen skulle förändra resultaten markant, framförallt för deplacerande och utjämnande ventilation.

En annan liknande studie var Svensson (2004). Den ansågs erhålla goda resultat men mätnoggrannheten och dokumentation var undermålig (Erlandsson & Glyré, 2014).

2 Teori

2.1 Luftföringsprinciper

För att ventilera ett rum finns tre huvudgrupper av luftföringsprinciper; deplacerande, envägsströmning och omblandande (Svensson, 1995). Alla figurer är skapade av studiens författare. Figurerna med luftströmning ritades i datorprogrammet Corel Draw och figur 1, samt figur 6–8 utgår från figurer i Sandberg, et al. (1993).

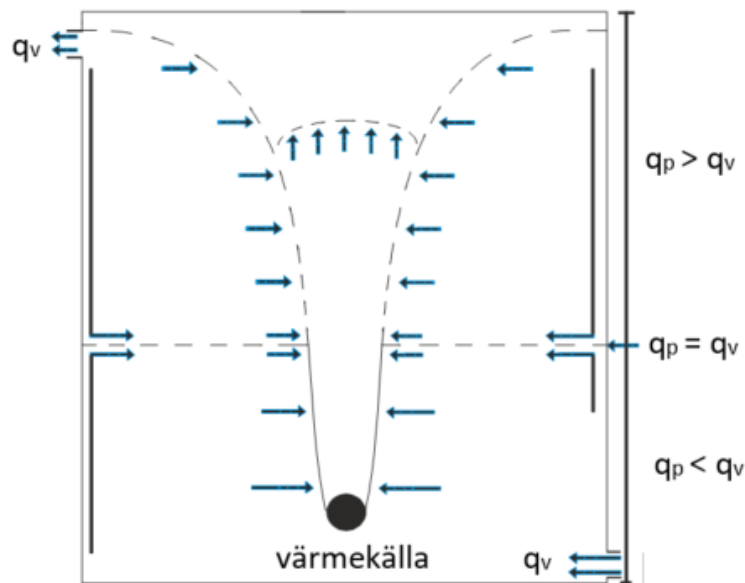
2.1.1 Deplacerande luftföring

Deplacerande luftföring kan beskrivas som luftströmning i rummet styrd av värmekällor och principen är en billigare variant av envägsströmning (Sandberg, et al., 1993). Principen kallas ibland för undanträngande ventilation på grund av att tilluften tränger undan rumsluften (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Vid samma flöde medger principen i regel en bättre temperaturverkningsgrad och luftkvalité i vistelsezonen än vid omblandande luftföring. Principen fungerar dock bara för kylning. Om tilluftstemperaturen är högre än rumstemperaturen finns det risk för kortslutning i ventilationen (Skistad, et al., 2004).

Undertempererad luft tillförs med låg fart direkt till vistelsezonen (Skistad, et al., 2004). Låg tilluftsfart och densitetsskillnad mellan varm rumsluft och undertempererad tilluft medför att den nedåtgående tilluftsströmmen accelererar. På grund av accelerationen är tilluftens fart i golvnivå nära donet högre än donets utloppshastighet (Svensson, 1995). Zonen där tilluftsfarten är högre än utloppsfarten benämns närzon (Svensson, 1995) (Sandberg, et al., 1993). Då farten avtagit och är lägre än utloppsfarten benämns det istället som fjärrzon (Svensson, 1995). I fjärrzonen råder täthetsströmning vilket innebär att den drivs av densitetsskillnaden och den ger liten medejektering av luft. På grund av detta fås en utbredning av kall luft vid golvnivån över hela rummets bredd (Sandberg, et al., 1993). Varm luft evakueras sedan via don i taknivå (Skistad, et al., 2004).

Rätt utformat och dimensionerat bildas en undre zon i rummet med tilluftförhållanden likt envägsströmning och en övre zon med varmare omblandad luft (Sandberg, et al., 1993). För att uppnå detta tillförs undertempererad luft med låg hastighet samtidigt som värmekällornas konvektionsströmmar utnyttjas (Svensson, 1995). Om den vertikala temperaturgradienten däremot blir för stor, kan omblandande luftföring istället uppstå (Skistad, 1988).

En värmekälla i rummet ger upphov till en plym med en uppåtriktad konvektionsström (Skistad, et al., 2004), se Figur 1. Luftflödet i plymen beräknas som värmekällans effektavgivning upphöjt till en tredjedel (Sandberg, et al., 1993).



Figur 1: Plym från värmekälla

När luften stiger ersätts den av ny luft från sidorna. Där det vertikala luftflödet i plymen är lika stort som ventilationsflödet bildas en gräns mellan de två zonerna (Sandberg, et al., 1993). En plyms egenskap är att luftflödet ökar med avståndet från värmekällan och att hastigheten avtar med avståndet från värmekällan (Svensson, 1995).

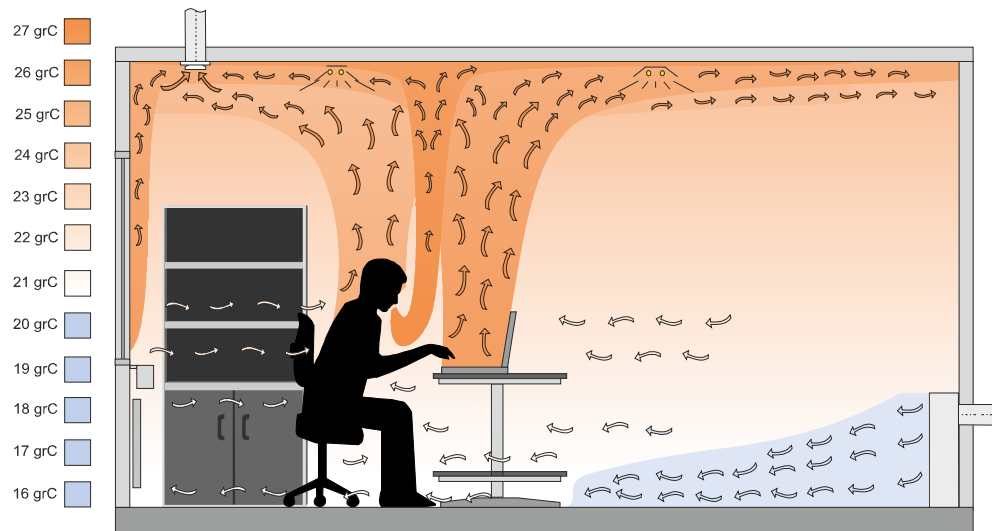
Hur stor den vertikala temperaturgradient som bildas vid deplacerande luftförling blir, beror på värmekällornas placering och ventilationsflödet. Då ett rum har många värmekällor kan 50 % regeln användas. Regeln innebär att lufttemperaturen vid golvet är 50 % av temperaturökningen mellan tilluften och frånluften. Om rumshöjden däremot är högre än 2,5 m blir lufttemperaturen i golvnivå snarare runt 33 % av temperaturökningen (Skistad, et al., 2004).

En effekt konvektionsströmmarna bidrar till är att en vertikal temperaturgradient erhålls. En annan är att föroreningar följer med dem. Det medför att den undre zonen innehåller mindre föroreningar än den övre (Skistad, et al., 2004). För en sittande person bidrar detta till att höja luftkvaliteten i inandningsluften. Genom att konvektionsströmmen från människan hämtar luft från den undre renare zonen blir koncentrationen av föroreningar lägre i andningszonen jämfört med omgivningen. Föroreningskoncentrationen i andningszonen blir lägre även om gränsen mellan den övre och undre zonen ligger längre ner än andningszonen (Sandberg, et al., 1993).

Deplacerande luftförling kan delas in i två varianter, deplacerande ventilation och utjämnande ventilation (Svensson, 1995).

2.1.1.1 Deplacerande ventilation

Vid deplacerande ventilation tillförs undertempererad luft vid golvnivå enligt Figur 2. Det medför att mycket lite rumsluft medejekteras in i tilluften från tilluftsdonet (Svensson, 1995). Man kan även tillföra övertempererad luft vid taket och evakuera kall luft vid golvet. Denna variant är dock inte att rekommendera då föroreningar dras uppåt med hjälp av plymerna. Dessa föroreningar har då ingen möjlighet att evakueras utan samlas i rummet (Svensson, 1995).



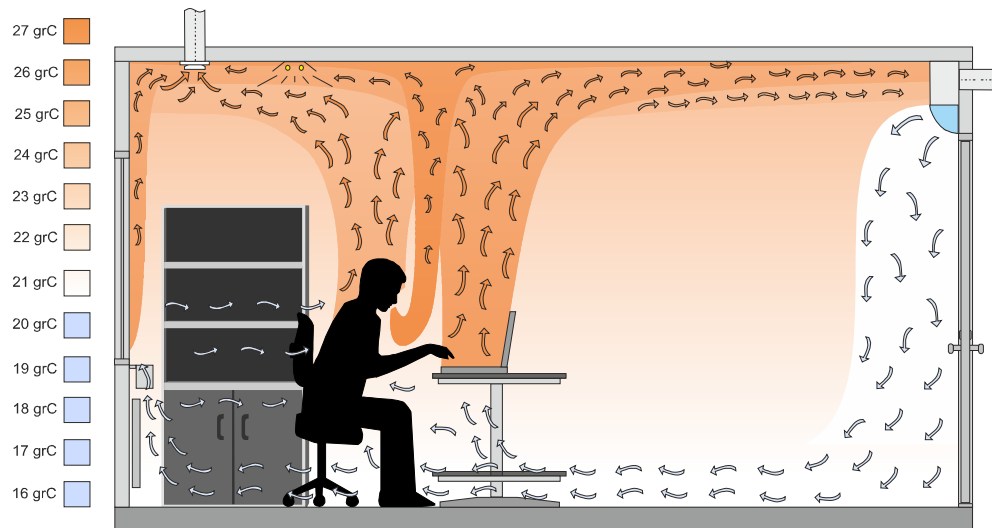
Figur 2: Principskiss luftströmning i kontor med deplacerande ventilation

Fördelar med metoden är att tilluft tillförs med låg hastighet och lite turbulens, vilket kan minska risken för drag. Luftutbytes- och ventilationseffektiviteten kan bli högre än för omblandande luftförling. Metoden kan vara gynnsam ur brandsäkerhetssynpunkt, då brandrökens spridning minskar eftersom tilluften tillförs i golvnivå (Svensson, 1995).

Nackdelar är att vertikala temperaturgradienten kan bli stor, vilket kan medföra obehag och risk för drag. För att undvika problem med drag kan endast små värmelaster föras bort. Metoden kan endast användas för komfortventilation och ej värmning. Ljudnivån från donet kan bli hög (Svensson, 1995).

2.1.1.2 Utjämnande ventilation

Vid utjämnande ventilation tillförs undertempererad tilluft på en hög nivå i rummet enligt Figur 3. Det inverkar på ett sätt som gör att vertikala temperaturgradienten i vistelsezonen begränsas. Karakteristiskt för principen är att i hela eller i delar av rummet sker en viss omblandning (Svensson, 1995).



Figur 3: Principskiss luftströmning i kontor med utjämnande ventilation

Fördelar med metoden är att tilluften tillförs med låg hastighet och lite turbulens, vilket kan minska risken för drag. Luftutbytes- och ventilationseffektiviteten kan bli högre än för omblandande luftförling. Vertikala temperaturgradienten begränsas och blir mindre än vid deplacerande ventilation då tilluftens temperatur ökar innan den når golvnivå. Även förmågan att föra bort värmelaster är bättre än vid deplacerande ventilation (Svensson, 1995).

Nackdelar med metoden är att en större vertikal temperaturgradient erhålls än vid omblandande luftförling, samt att metoden kan endast användas för kylning och ej värmning. Metoden ger teoretisk en något sämre luftkvalité än för deplacerande ventilation, men något bättre än för omblandande (Svensson, 1995).

2.1.2 Envägsströmning

Envägsströmning är en princip där tilluften tillförs jämnt fördelad över en hel tak- eller väggyta och trycker rumsluften framför sig, se Figur 4. På motstående yta evakueras sedan frånluften (Svensson, 1995). Ventilationsflödena är stora och principen används för att åstadkomma tilluftsförhållanden i hela rummet. För att principen ska fungera måste lufthastigheterna vara större än hastigheterna på konvektionsströmmarna uppkomna av värmekällorna. Normala lufthastigheter är runt 0,4–0,5 m/s (Sandberg, et al., 1993).

Det är en mycket dyr lösning och används framförallt då kraven på luftkvalitén är mycket höga, t.ex. i renrum för elektronik tillverkning eller operationssalar (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Ideal envägsströmning är dock praktiskt omöjligt att åstadkomma (Sandberg, et al., 1993).

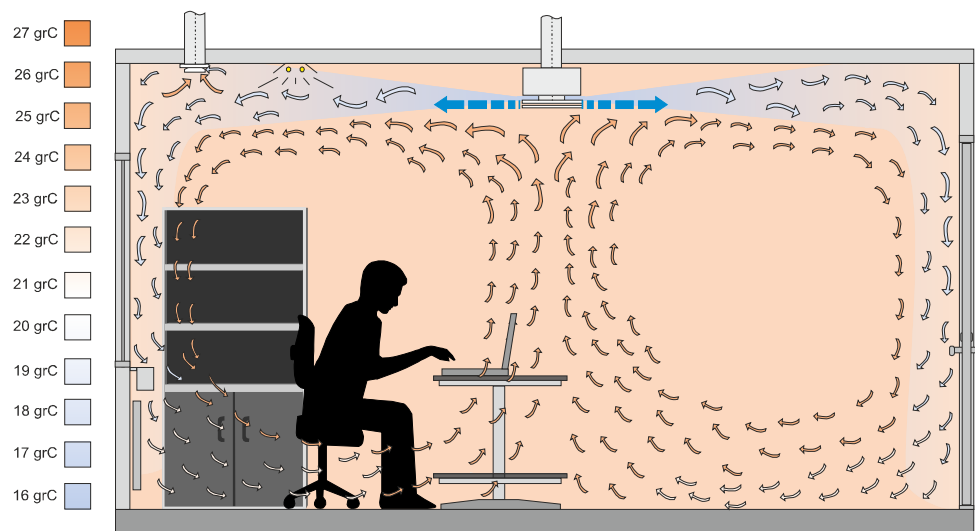


Figur 4: Principskiss luftströmning i kontor med envägsströmning

2.1.3 Omblandande luftförling

Syftet med omblandande luftförling är att temperatur och föroreningar ska fördela sig jämnt i hela rummet se Figur 5. Principen används normalt vid vanliga applikationer med luftflöden runt 15 l/sm² (Skistad, et al., 2004). Eftersom principen strävar efter en likformig temperatur och luftkvalité överallt, erhålls frånluftsförhållanden i rummet. Dock är fullständig omblandning praktiskt omöjligt att uppnå. Förhöjda nivåer av föroreningar fås i närheten av föroreningskällan (Sandberg, et al., 1993).

Tilluftsdon placeras vanligtvis i kanal, tak eller vägg. Placering av frånlufts- eller överluftsdon är mindre viktig då luftförhållandena är lika överallt. Viktigt är dock att kortslutning undviks. Vanligtvis placeras frånluftsdon i tagnivå och tilluftstemperaturen är normalt 18 °C vid komfortventilation. Principen kan användas för både uppvärmning och kylning (Warfvinge & Dahlblom, 2010).



Figur 5: Principskiss luftströmning i kontor med omblandande ventilation

Fördelar är att principen medför låga temperaturgradienter samt att stora värmelaster kan föras bort. Tilluft kan användas för både kylning och värmning. Temperaturskillnad mellan

rumsluft och tilluft kan vara stor eftersom mycket rumsluft medejekteras i tilluften. Normalt är tilluftsdonets ljudnivå låg (Svensson, 1995).

Nackdelar är att om tilluft används för kylning kan medelluftshastigheten i vistelsezonen bli hög, vilket kan leda till problem med drag. Då tilluft istället används för värmning kan stagnationszoner uppstå, eftersom medelluftshastigheten i vistelsezonen kan bli låg. Den höga turbulensintensiteten kan också medföra problem med drag (Svensson, 1995).

För att åstadkomma omblandande luftföring finns i princip två metoder, termiskt styrd ventilation och högfartsinblåsning (Sandberg, et al., 1993).

2.1.3.1 Termiskt styrd ventilation

Termiskt styrd ventilation är en metod där undertempererad tilluft tillförs i taknivå (Sandberg, et al., 1993). Precis som vid deplacerande ventilation är tilluften kallare än rumsluften och faller därför nedåt. Anledningen till att principen skiljer sig från deplacerande ventilation är att bara en zon bildas i rummet med omblandad luft, eftersom tilluften styr luftströmningen och inte värmekällorna (Sandberg, et al., 1993).

2.1.3.2 Högfartsinblåsning

Andra metoden är då varm eller kall tilluft tillförs med jetstrålar (Sandberg, et al., 1993). För att skapa omblandning tillförs luften med hög hastighet (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Utloppshastigheterna ligger normalt mellan 2 och 10 m/s (Svensson, 1995).

Metoden strävar efter likformig omblandning av temperatur och föroreningar över hela rummet och rekommenderas ej då ett rum har en kraftig föroreningskälla (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

Tillförseln av tilluft sker utanför vistelsezonen för att minska risken för besvärande drag. Drag i vistelsezonen kan ändå uppstå. För att undvika drag utnyttjas kunskap om tilluftsdonens kastlängd, vilken väljs beroende på tilluftsdonets placering. Vid kylning med för kort eller lång kastlängd kan drag uppstå och vid värmning med för kort kastlängd uppstår dålig omblandning (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

För att undvika drag är det även viktigt att ta hänsyn till Coandaeffekten och eventuella föremål som kan vara ett hinder för luftstrålen. När tillförseln av tilluft sker i taknivå är ett vanligt problem att takhängd belysningsarmatur hindrar luftstrålen. Det medför att luftstrålen kan styras ner i vistelsezonen och skapa drag (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

2.1.4 Kortslutningsströmning

Kortslutningsströmning innebär att tilluft rör sig direkt från tilluftsdon till frånluftsdon utan att passera vistelsezonen. Det leder till att luftkvalitén är sämre i vistelsezonen än i frånluften (Svensson, 1995). Anledningar kan vara felaktig donplacering eller val av don. Kortslutning vid omblandande luftföring kan uppstå då tilluft tillförs med för låg hastighet eller är övertempererad och då både till- och frånluftsdon är placerade i taknivå. Då tilluft inte är tillräckligt undertempererad kan också kortslutning uppstå vid deplacerande luftföring (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

2.2 Relevanta komfort- och hygienkrav - uteluftsflöde, tilluftstemperatur, rumstemperatur, luftutbyteseffektivitet, drag och vertikal temperaturgradient

Enligt Svensson (1995) är ett ventilationssystemets huvuduppgift att så snabbt som möjligt ventilera bort föroreningar från rummet. Samtidigt ska även komfortkraven uppfyllas. Komfortkraven består av lufthygien, termiskt klimat, akustiskt klimat och visuellt klimat.

Reglering av dessa krav görs genom lagar, råd och regler. I studien görs mätningar på ett rum vilket ska liknas vid ett normalt kontor. Kraven på inneklimatet i ett kontor bestäms av Boverkets Byggregler och Arbetsmiljöverket. Enligt Boverket (2014:3) ställs krav på ett minsta uteluftsflöde vid personnärvaro på 0,35 l/s per m² golvarea. För kontoret i studien motsvarar det uteluftsflödet 4,3 l/s. Arbetsmiljöverkets rekommenderar vid stillasittande arbete ett minsta uteluftsflöde på 7 l/s och person samt ett tillägg på 0,35 l/s per m² golvarea (Arbetsmiljöverket, 2009:2), vilket motsvarar ca. 11 l/s. Vidare bör luftutbyteseffektiviteten vara minst 40 % då Nordtestmetod NT VVS 047 används (Boverket, 2014:3). Det rekommenderas att lufttemperaturen hålls mellan 20–24 °C vintertid och 20–26 °C sommartid vid stillasittande arbete (Arbetsmiljöverket, 2009:2). För att undvika obehag bör temperaturskillnaden i höjdled begränsas (Arbetsmiljöverket, 2009:2). Rengholt (1991) påstår att normalt gränsvärde är 2–3 °C per meter. Enligt Boverket (2014:3) bör lufthastigheten i vistelsezonen vintertid begränsas till 0,15 m/s och 0,25 m/s under övrig tid på året. Arbetsmiljöverket (2009:2) rekommenderar istället 0,15–0,20 m/s oavsett årstid. Kraven från myndigheterna gäller för vistelsezonen. Med andra ord ställs inga krav på inneklimatet i de delar av rummet som inte ingår i vistelsezonen (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

2.3 Ventilationssystemets funktion

För att avgöra hur väl fungerande ventilation ett rum eller utrymme har, används olika index och mått. Nedan följer en beskrivning av de som anses relevanta.

2.3.1 Temperaturverkningsgrad

Temperaturverkningsgrad är en dimensionslös storhet vilken anger förhållandet mellan tillförd och utnyttjad värme. Definieras enligt ekvation (1) (Kristensson, 2015). För ett omblandande system med fullständig omblandning erhålls en likformig temperatur i hela det ventilerade utrymmet. Därmed blir verkningsgraden 1,0 för hela utrymmet. För deplacerande och utjämnande ventilation erhålls en vertikal temperaturgradient, vilket leder till att temperaturverkningsgraden blir högre på lägre höjd i rummet. Det i sin tur innebär att en högre tilluftstemperatur kan användas för deplacerande, samt utjämnande ventilation och ändå erhålla en lika stor temperaturverkningsgrad i vistelsezonen som för omblandande ventilation. Med andra ord kan en energibesparing göras med av dessa ventilationssystem jämfört med omblandande, om uteluften ska kylas. Om uteluften däremot ska värmas för att erhålla önskad tilluftstemperatur blir energibesparingen högre för omblandande ventilation.

$$\eta = \frac{T_{från} - T_{till}}{T_p - T_{till}} \quad (1)$$

η	Temperaturverkningsgrad	
$T_{från}$	Frånluftstemperatur	$[T_{från}] = ^\circ\text{C}$
T_{till}	Tilluftstemperatur	$[T_{till}] = ^\circ\text{C}$
T_p	Temperatur i punkten p	$[T_p] = ^\circ\text{C}$

2.3.2 Lokalt ventilationsindex

Lokalt ventilationsindex anger hur effektivt en förorening transporteras bort i en viss punkt i rummet (Sandberg, et al., 1993). Om lokala ventilationsindexet är mindre än 1 indikerar det att kortslutning finns i ventilationen, oavsett vilket ventilationsystem som används. Värdet större än 1 är möjliga att åstadkomma (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Warfvinge & Dahlblom (2010) definierar lokalt ventilationsindex enligt ekvation (2).

$$\varepsilon_{lv} = \frac{c_f - c_t}{c_p - c_t} \quad (2)$$

ε_{lv}	Lokalt ventilationsindex	
c_f	Koncentration av föroreningen i frånluften	$[c_f] = \text{g/m}^3$
c_t	Koncentration av föroreningen i tilluften	$[c_t] = \text{g/m}^3$
c_p	Koncentration i punkten p	$[c_p] = \text{g/m}^3$

2.3.3 Ventilationseffektivitet

Ventilationseffektivitet är ett mått på hur effektivt en viss förorening transporteras bort från hela det ventilerade utrymmet (Sandberg, et al., 1993). Sandberg, et al. (1993) definierar den enligt ekvation (3). Ventilationseffektiviteten påverkas främst av luftströmmar i rummet samt föroreningskällans placering (Sandberg, et al., 1993). Ventilationen är troligtvis kortsluten om ventilationseffektiviteten <1 , dvs. mindre än 100 %, vilket kan medföra klagomål från brukarna på grund av dålig luft (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Normalt ligger ventilationseffektiviteten runt 100 % för omblandande luftföring. Om borttransporten av en förorening är effektivare än vid omblandande ventilation fås värden över 100 % (Sandberg, et al., 1993).

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} \quad (3)$$

$\langle \varepsilon \rangle^c$	Ventilationseffektivitet	
m	konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet	$[m] = \text{m}^3/\text{s}$
q_v	Uteluftsflöde	$[q_v] = \text{m}^3/\text{s}$
$\langle \bar{C} \rangle$	Medelkoncentrationen i rumsluften	$[\langle \bar{C} \rangle] = \text{ppm}$

2.3.4 Lokal medelålder

Luftens lokala medelålder är en indikator på luftens kvalitet. Den anger hur länge luften i mätpunkten varit i byggnaden (Sandberg, et al., 1993). Har luften en hög lokal medelålder

innebär det att den har haft tid att samla på sig föroreningar (Sandberg, et al., 1993). Vid omblandande luftföring eftersträvas en omblandning av all luft i rummet. Alltså blir luftens lokala medelålder lika överallt i rummet. Vid rätt dimensionerad deplacerande ventilation fås istället en lägre medelålder vid golvnivå och nära tilluftsdon. Nära taknivå och i frånluft är medelåldern högre.

2.3.5 Rumsluftens medelålder

Rumsluftens medelålder anger luftens medelålder för hela det ventilerade utrymmet. Till skillnad från lokala medelålder vilken anger luftens ålder i en viss punkt. (Sandberg, et al., 1993).

2.3.6 Nominell tidskonstant

Nominell tidskonstant är den teoretiskt kortaste luftutbytestiden och inträffar vid ideal envägsströmning. Beräknas som kvoten mellan ventilerad volym och uteluftsflöde, enligt ekvation (4) (Sandberg, et al., 1993).

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} \quad (4)$$

τ_n	Nominell tidskonstant	$[\tau_n] = s$
V	Ventilerad volym	$[V] = m^3$
q_v	Uteluftsflöde	$[q_v] = m^3/s$

Om volym eller uteluftsflöde är okänt, utnyttjas det faktum att lokal medelålder i frånluften, alltid är samma som nominella tidskonstanten (Sandberg, et al., 1993).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} \quad (5)$$

Typiska värden för nominell tidskonstant för olika verksamheter enligt Sandberg, et al. (1993) är 120 minuter för villor, 20 minuter för kontor och 3 minuter för operations-salar.

2.3.7 Luftutbytestid

Luftutbytestid anger tiden det tar att byta ut luften i ett utrymme. Beräknas som två gånger rumsluftens medelålder, enligt ekvation (6) (Sandberg, et al., 1993). Luftutbytestid vid olika luftföringsprinciper är hämtade från Sandberg, et al. (1993) och redovisas i Tabell 1.

Tabell 1: Rumsluftens luftutbytestid för olika luftföringsprinciper

Luftströmning	Luftutbytestid, $\bar{\tau}_r$
Envägsströmning	τ_n
Deplacerande	$\tau_n < \bar{\tau}_r < 2\tau_n$
Omblandande	$\bar{\tau}_r = 2\tau_n$
Kortslutnings	$\bar{\tau}_r > 2\tau_n$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle \quad (6)$$

$\bar{\tau}_r$ Luftutbytestid $[\bar{\tau}_r] = s$
 $\langle \bar{\tau} \rangle$ Rumsluftens medelålder $[\langle \bar{\tau} \rangle] = s$

2.3.8 Luftutbyteseffektivitet

Luftutbyteseffektivitet är ett mått vilket anger hur effektivt luften byts ut i ett ventilerat utrymme Svensson (1995) och definieras enligt ekvation (7) (Sandberg, et al., 1993). Luftutbyteseffektiviteten för olika luftföringsprinciper enligt Svensson (1995) redovisas i Tabell 2. Ideal envägsströmning ger den teoretiskt högsta luftutbyteseffektiviteten på 100 % (Svensson, 1995). Rent praktiskt är denna dock omöjlig att åstadkomma (Sandberg, et al., 1993).

Tabell 2: Luftutbyteseffektivitet för olika luftföringsprinciper

Luftströmning	Luftutbyteseffektivitet
Envägsströmning	100 %
Omblandande	50 %
Deplacerande	60 %
Utjämnande	50–60 %
Kortslutningsströmning	<50 %

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} \cdot 100 \quad (7)$$

ε_a Luftutbyteseffektivitet
 τ_n Nominell tidskonstant $[\tau_n] = s$
 $\bar{\tau}_r$ Luftutbytestid $[\bar{\tau}_r] = s$

2.3.9 Kyleffekt

Kyleffekt används som benämning för hur mycket värme som förs bort med ventilationsluften. Skistad, et al. (2004) definierar den bortförda värmen från utrymmet enligt ekvation (8).

$$P_{tot} = \rho \cdot c_p \cdot q_v \cdot (T_{från} - T_{till}) \quad (8)$$

P_{tot}	Värme bortförd från utrymmet	$[P_{tot}] = W$
ρ	Luftens densitet	$[\rho] = \text{kg/m}^3$
c_p	Luftens specifika värmekapacitet	$[c_p] = \text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$
q_v	Luftflöde	$[q_v] = \text{m}^3/\text{s}$
$T_{från}$	Frånluftstemperatur	$[T_{från}] = \text{K}$
T_{till}	Tilluftstemperatur	$[T_{till}] = \text{K}$

Luftens densitet är $1,2 \text{ kg/m}^3$ och luftens specifika värmekapacitet är $1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

2.4 Mätmetoder

För att få information om indexen och måtten på ventilationssystemens funktion behöver olika mätningar göras. Två metoder som används för detta är homogenspridningsmetoden och avklingningsmetoden. Tillvägagångssättet samt ekvationer är beskrivna enligt Sandberg, et al. (1993).

2.4.1 Homogenspridningsmetoden

En metod vilken går ut på att en byggnad eller ett utrymme delas in i zoner. Till varje zon tillförs ett konstant flöde av spårgas proportionerligt till zonens volym. Spårgaskoncentrationen mäts sedan kontinuerligt i valfritt antal punkter. Med kännedom om spårgaskoncentrationen kan sedan olika mått beräknas.

2.4.1.1 Medelkoncentration i rumsluften

För att beräkna ventilationseffektivitet behövs information om medelkoncentration i rumsluften. Om mätning av spårgaskoncentration görs i många representativa punkter för rummet kan medelvärdet av dessa ge hela rumsluftens medelkoncentration (Sandberg, et al., 1993). Då få mätpunkter används är svårigheten att få dessa att representera hela utrymmet. Om detta inte är möjligt kan medelkoncentrationen ej bestämmas. Då måste istället en avklingningsmätning i frånluften göras.

2.4.1.2 Lokal medelålder

Med hjälp av spårgaskoncentration kan lokal medelålder beräknas enligt ekvation (9) (Sandberg, et al., 1993).

$$\bar{\tau}_p = \frac{C_p}{\Delta m} \quad (9)$$

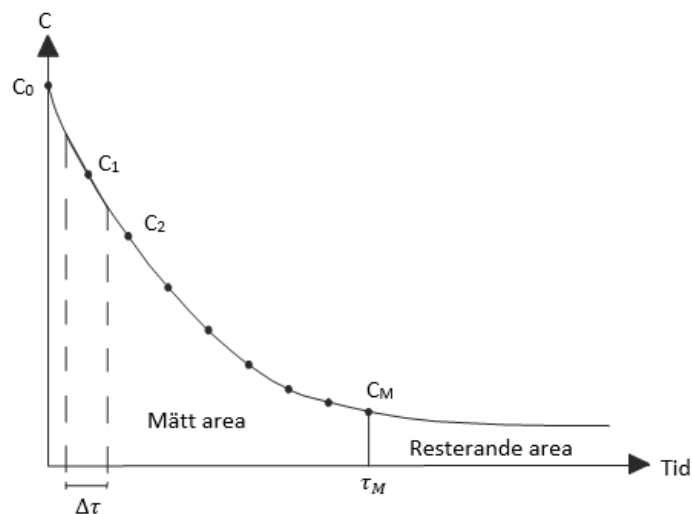
$\bar{\tau}_p$	Lokal medelålder	$[\bar{\tau}_p] = \text{s}$
C_p	Föroreningskoncentration i punkten p	$[C_p] = \text{g}/\text{m}^3$
Δm	Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet och volymenhet	$[\Delta m] = \text{g}/\text{sm}^3$

2.4.1.3 Rumsluftens medelålder

För att beräkna luftutbytestid behövs information om rumsluftens medelålder. Precis som vid bestämning av medelkoncentration i rumsluften bör mätning av lokal medelålder göras i många representativa punkter för rummet. Medelvärde av dessa ger rumsluftens medelålder. Om inte tillräckligt många mätpunkter används kan den ej bestämmas. Då kan istället en avklingningsmätning göras (Sandberg, et al., 1993).

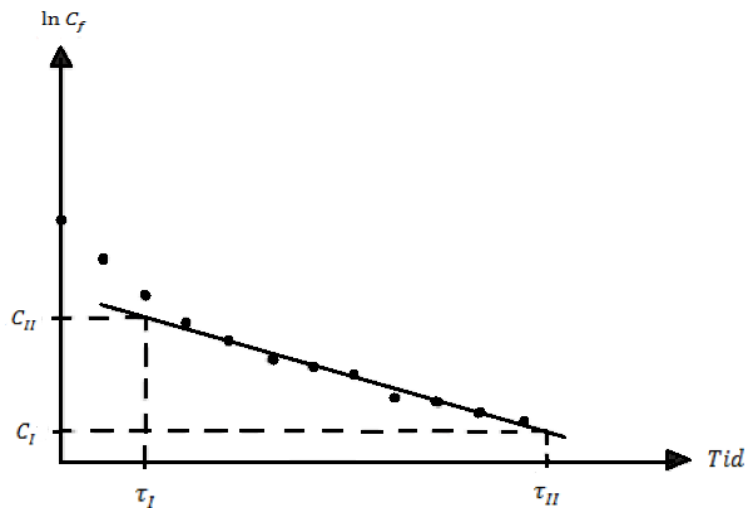
2.4.2 Avklingningsmetoden

Mätning kan antingen genomföras för en befintlig förorening i rummet, eller med en detekterbar spårgas (Sandberg, et al., 1993). En liten mängd förorening släpps ut i ett rum och blandas om med fläktar för att en homogen koncentration i rummet (Sandberg, et al., 1993). Mängden förorening som släpps ut väljs så att en lämplig begynnelsekoncentration erhålls. Därefter stängs fläktarna och ventilationssystemet startas. Samtidigt påbörjas mätning med jämna tidsintervall av hur koncentrationen avtar i mätpunkten (Sandberg, et al., 1993). När mätningen är avslutad har en avklingningskurva erhållits, se Figur 6. Med den uppkomna arean under avklingningskurvan samt momentet kring origo kan medelkoncentration i rumsluften, lokal medelålder och rumsluftens medelålder bestämmas. Beräkningen försvåras av det faktum att låga koncentrationer är svåra att mäta noggrant samt att spårgaskoncentrationen normalt inte sjunker till noll innan mätningen avslutas. Det är även så att slutet på avklingningskurvan avtar exponentiellt, vilket innebär att koncentrationen noll teoretiskt skulle ta oändligt lång tid att uppnå (Sandberg, et al., 1993). Svårigheterna löses genom att avklingningskurvan delas in i två delar enligt Figur 6. Den mätta arean samt momentet beräknas med trapetssummering (Sandberg, et al., 1993).



Figur 6: Avklingningskurva uppdelad i mätt area och resterande area

För att bestämma resterande area och moment plottas värden i ett lin-log diagram. En rät linje anpassas till de sista mätvärdena där avklingningskurvan avtar exponentiellt enligt Figur 7. Resterande arean samt moment beräknas enligt ekvation (11) och (12), där λ_{exp} är lutningen av den anpassade räta linjen med omvänt tecken enligt ekvation (10) och C_M samt τ_M är koncentration respektive tid i sista mätpunkten (Sandberg, et al., 1993).



Figur 7: Avklingningskurva lin-log

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} \quad (10)$$

λ_{exp}	Linjens lutning	$[\lambda_{exp}] = s^{-1}$
C_I	Koncentration vid punkten I	$[C_I] = \text{ppm}$
C_{II}	Koncentration vid punkten II	$[C_{II}] = \text{ppm}$
τ_I	Tid vid punkten I	$[\tau_I] = s$
τ_{II}	Tid vid punkten II	$[\tau_{II}] = s$

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \quad (11)$$

A_{Rest}	Resterande area	$[A_{Rest}] = s \cdot \text{ppm}$
C_M	Koncentration vid sista mätpunkten	$[C_M] = \text{ppm}$
λ_{exp}	Lutning av anpassad rät linje	$[\lambda_{exp}] = s^{-1}$

$$M_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) \quad (12)$$

M_{Rest}	Resterande moment	$[M_{Rest}] = s^2 \cdot \text{ppm}$
τ_M	Tid vid sista mätpunkten	$[\tau_M] = s$

Beroende på var mätning görs kan olika mått bestämmas med hjälp av avklingningsmetoden. Viktigt att tänka på är att det är lokal medelålder som mäts vid avklingningsmätning. Om ett medelvärde av flera avklingningsmätningar söks, är det medelvärdet av uppmätta lokala medelåldrar som ska bildas (Sandberg, et al., 1993).

2.4.2.1 Medelkoncentrationen i rumsluften

Om mätning av spårgaskoncentration görs i många representativa punkter för rummet kan medelvärdet av dessa ge hela rumsluftens medelkoncentration (Sandberg, et al., 1993).

Ett enklare sätt att få medelkoncentrationen är att göra en avklingningsmätning i frånluften. Denna typ av mätning ställer krav på utrymmet som undersöks. Utrymmet måste ha väldefinierade frånluftsöppningar och utrymmets ventilationsluft måste passera dessa (Sandberg, et al., 1993).

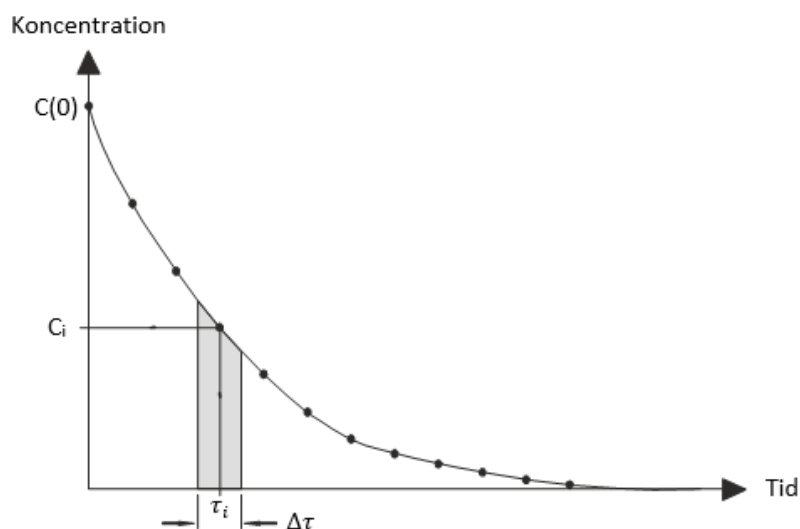
Avklingningskurvan som erhålls vid mätning i frånluften används för att bestämma medelkoncentrationen enligt ekvation (13) (Sandberg, et al., 1993).

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau \quad (13)$$

$\langle \bar{C} \rangle$	Medelkoncentration i rumsluften	$[\langle \bar{C} \rangle] = \text{ppm}$
q_v	Uteluftsflöde	$[q_v] = \text{m}^3/\text{s}$
V	Ventilerad volym	$[V] = \text{m}^3$
$\sum C_i \Delta \tau$	Ytan under avklingningskurvan	$[\sum C_i \Delta \tau] = \text{s} \cdot \text{ppm}$

2.4.2.2 Lokal medelålder

Då lokal medelålder efterfrågas görs avklingningsmätning i punkt av intresse. Åldern i punkten bestäms med hjälp av en avklingningskurva, enligt Figur 8 samt ekvation (14) (Sandberg, et al., 1993).



Figur 8: Bestämning av luftens lokala medelålder

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} \quad (14)$$

$\bar{\tau}_p$	Lokal medelålder	$[\bar{\tau}_p] = \text{s}$
$\sum C_i \Delta \tau$	Ytan under avklingningskurvan	$[\sum C_i \Delta \tau] = \text{s} \cdot \text{ppm}$
$C(0)$	Begynnelsekoncentration	$[C(0)] = \text{ppm}$

2.4.2.3 Rumsluftens medelålder

För beräkning av luftutbytestiden måste rumsluftens medelålder vara känd. Tillvägagångssättet för att bestämma denna är samma som för bestämning av hela rumsluftens medelkoncentration. Antingen mäts lokala medelåldern i många punkter i rummet och medelvärdet av dessa ger rumsluftens medelålder. Är inte detta möjligt får en avklingningsmätning i frånluften utföras. Medelåldern av rumsluften bestäms då med hjälp av en avklingningskurva, enligt Figur 8 samt ekvation (15) (Sandberg, et al., 1993).

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} \quad (15)$$

$\langle \bar{\tau} \rangle$	Rumsluftens medelålder	$[\langle \bar{\tau} \rangle] = s$
$\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)$	Moment kring origo	$[\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)] = s^2 \cdot \text{ppm}$
$\sum (C_i \Delta \tau)$	Ytan under avklingningskurvan	$[\sum (C_i \Delta \tau)] = s \cdot \text{ppm}$

Med information om rumsluftens medelålder och den nominella tidskonstanten kan sedan luftutbytestiden och luftutbytese effektiviteten beräknas.

2.4.3 För- och nackdelar med metoderna

En fördel med homogensspridningsmetoden är att variationen av de olika måtten på ventilationssystemets funktion kan tas fram under en tidsperiod t.ex. ett dygn. Det medför en bättre förståelse för hur väl ett ventilationssystem fungerar sett över en hel dag. Att bygga ett system för utsläpp av spårgas tar tid. Byggs däremot ett permanent försöksrum görs uppbyggnaden av metoden bara en gång. Det innebär att olika luftföringsprinciper och don kan testas på ett smidigt sätt, vilket kan tilltala t.ex. tillverkare.

En nackdel med homogensspridningsmetoden är att metoden kräver mer förarbete. Många gasutsläpp måste installeras i rummet som undersöks. Enligt Sandberg, et al. (1993) användes 48 stycken utsläpp i rum med måtten 13,2x7x4 då homogensspridningsmetoden tillämpades. Att flytta testutrustningen är tidskrävande och metoden är alltså omständigt att tillämpa för test av olika utrymmen. För att kunna beräkna de olika indexen och måtten krävs även att spårgaskoncentrationen mäts i många punkter i rummet, för att erhålla representativa värden för rummet, vilket innebär att flera spårgasanalysatorer kan behövas och därmed bli väldigt dyrt.

Fördelen med avklingningsmetoden är att det är en enklare metod att utföra och kräver mindre förarbete. Spårgasen behöver bara släppas ut i en punkt och med hjälp av blandningsfläktar fås en homogen spridning. Alltså är det enkelt att flytta utrustningen när ett annat utrymme ska undersökas. Det är även så att mätning av spårgaskoncentrationen inte behöver göras i många punkter. Enbart punkter av intresse och frånluften behöver mätas, vilket innebär att det ofta räcker med en spårgasanalysator, beroende på antalet kanaler.

Nackdelen med metoden är att bara ett värde erhålls för indexen och måtten per mätning. Alltså fås ingen information om hur de varierar över en tidsperiod där värmelasterna i rummet förändras.

3 Metod

Målet med studien är att beräkna olika mått på ventilationssystemets funktion. Syftet med detta är att kunna bedöma om resultaten kan relateras till hur ventilationen i försöksrummet faktiskt ser ut och om metodernas resultat är tillförlitliga. Ett sekundärt mål med studien är att jämföra de olika ventilationssystemen och bedöma vilket som ger bäst resultat.

För att nå studiens mål och beräkna olika mått på ventilationssystemens funktion utfördes mätningar med två olika metoder. Metoderna som undersöktes var homogenspridningsmetoden och avklingningsmetoden. Resultaten som erhöles från dessa kunde sedan användas för att bestämma lokalt ventilationsindex, ventilationseffektivitet, lokal medelålder, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet på tre olika ventilationssystem. Som hjälp för att avgöra om resultaten från beräkningarna var rimliga behövdes information om luftrörelserna i rummet vid de olika ventilationsprinciperna. Därför utfördes tester med rök på varje ventilationssystem.

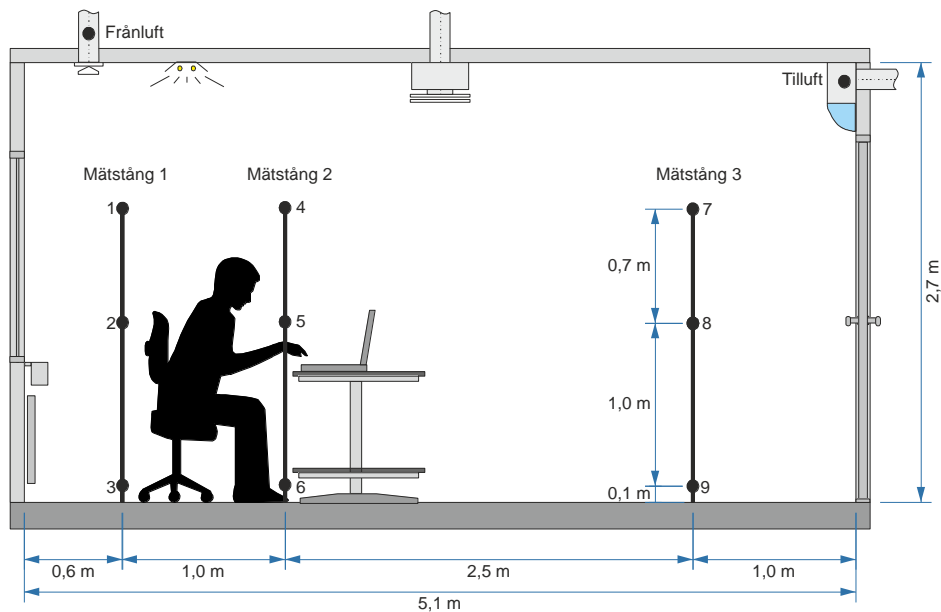
På de olika systemen genomfördes även temperaturmätningar. Dels för att se om temperaturerna i försöksrummet hölls inom angivna krav för ett kontorsrum, dels för att kunna beräkna temperaturverkningsgrad och kyleffekt. Tillsammans med resultaten från de två metoderna gjordes sedan en jämförelse mellan systemen och bedömning av vilket som gav bäst resultat. Nedan beskrivs försöksrummet, utrustning som användes och hur mätningarna utfördes.

3.1 Mätutrustning

För att utföra de olika mätningarna används en del utrustning vilken beskrivs nedan.

3.1.1 Temperaturgivare

För mätning av lufttemperatur i försöksrummet användes 11 givare av typen PT1000 med mätnoggrannhet $\pm 0,1$ °C (Erlandsson & Glyré, 2014). De var placerade i tilluft, frånluft och på tre mätstativ i rummet enligt Figur 14. Varje stativ hade tre temperaturgivare, vilka var placerade på 0,1, 1,1 och 1,8 m höjd, enligt Figur 9. Alla givare var kopplade till en dataundercentral från Bastec med BAS2-system. Det fanns även en givare som var kopplad till en separat dataundercentral av samma märke och modell, vilken mätte temperatur i rummet utanför försöksrummet.

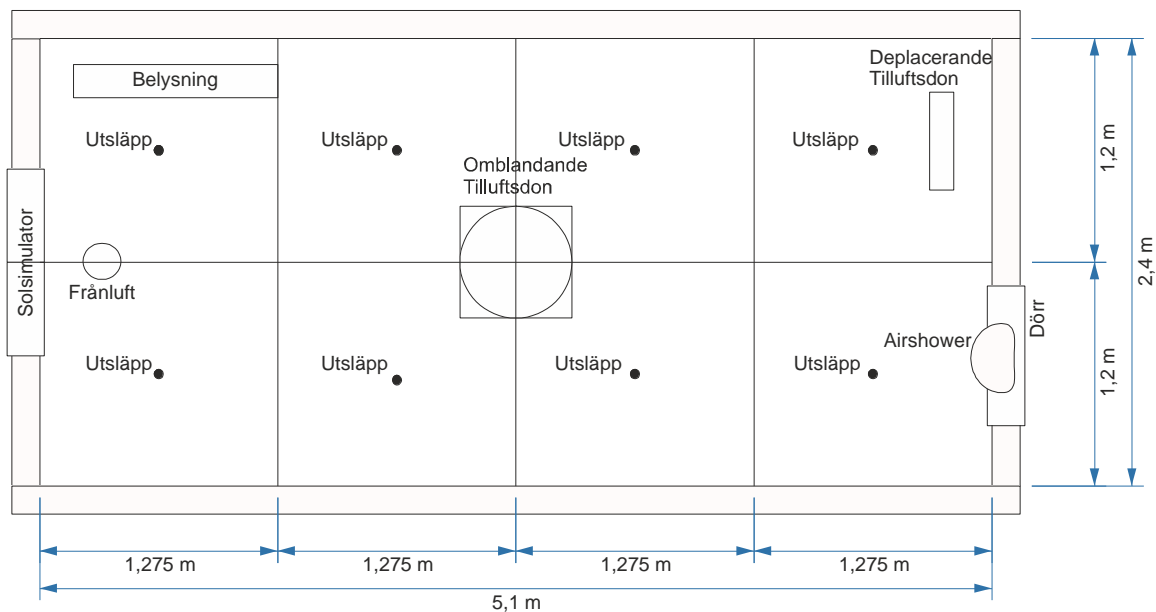


Figur 9: Sektionsritning placering temperaturgivare

3.1.2 Spårgas

En spårgas ska vara lätt att analysera i låga koncentrationer, inte vara vattenlöslig, inte vara normalt förekommande i luften och den ska inte adsorberas på eventuella material i kontoret. Vanliga spårgaser är dikväveoxid (N_2O), även kallad lustgas, svavelhexafluorid (SF_6) och koldioxid (CO_2) (Sandberg, et al., 1993). Dikväveoxid har densiteten $1,83 \text{ kg/m}^3$ vid $20 \text{ }^\circ\text{C}$, svavelhexafluorid $6,08 \text{ kg/m}^3$ och koldioxid $1,83 \text{ kg/m}^3$. Av de vanligaste spårgaserna som används har dikväveoxid och koldioxid en densitet som minst skiljer sig från luftens. Dock uppfyller inte koldioxid kravet om att inte vara normalt förekommande i luften. Vid mätningarna användes därför förångad lustgas från Air Liquide Gas AB.

Ett system för utsläpp av spårgas byggdes i studien av Henriksson & Nilsson (2016). Systemet består av 24 stycken utsläpp. Varje utsläpp ska svara mot en lika stor rumsvolym och därför hade rummet delats in i ett rutnät. Rutnätet bestod av tre horisontella skikt som innehöll åtta lika stora volymer. I centrum på varje volym var gasutsläppet placerat. Det innebar att åtta utsläpp var placerade på höjden 45 cm, åtta på höjden 135 cm och åtta på 225 cm. I Figur 10 redovisas gasutsläppens placering i en planritning. Utsläppet av spårgas gjordes med hjälp av en tub med spårgas som kopplats till en regulator från Air Liquide Gas AB. Regulatoren kopplades till en RFC1260 rotameter med en slang från Festo. Rotametern användes för att kunna kontrollera spårgasflödet och denna hade intervallet $0,2\text{--}1,9 \text{ l/h}$. Slangen från rotametern gick sedan till en 3-delad fördelare, vilken också var från Festo. Från fördelaren gick tre slangar ut till vars en 8-delad fördelare (Henriksson & Nilsson, 2016). Från dessa fördelare gick sedan 24 slangar in i försöksrummet. En tryckfallsberäkning av systemet av för spårgasutsläpp gjordes i Henriksson & Nilsson (2016). Beräkning visade att ett lika stort flöde skulle erhållas i alla 24 utsläppen, vilket var önskvärt.



Figur 10: Planritning spårgasutsläpp

3.1.3 Spårgasanalysator

Många analysatorer har problem med så kallad nollpunktsdrift och noggrannhet vid låga koncentrationer. Dessutom är de ofta tvärkänsliga för andra ämnen, ofta vatten och koldioxid (Sandberg, et al., 1993). Spårgasanalysatorn som användes hade möjlighet att kompensera för tvärkänsligheten om rätt inställningar gjordes.

I studien användes en 1303 multipoint provtagare & doserare samt en 1312 fotoakustisk multi-gas monitor från LumaSense Technologies vilken bygger på IR-spektrometri. En kalibrering av provtagaren och analysatorn utfördes ca. ett år innan mätningarna genomfördes. Utrustningens mätintervall är 0,5–250 ppm (Henriksson & Nilsson, 2016). Utrustningen har sex mätkanaler och lika många doseringskanaler. Doseringskanalerna användes inte utan istället hade ett separat system för utsläpp av spårgas byggts upp, vilket beskrevs i kapitel 3.1.2.

3.1.4 Programvara spårgasanalysator

För att analysera information från spårgasanalysatorn används programvaran 7620 från LumaSense Technologies. Dikväveoxid användes som spårgas vid mätningarna. Dock mättes både dikväveoxid, koldioxid samt vattenhalt för att kompensera för tvärkänsligheten.

3.1.5 Hastighetsmätare

För att mäta lufthastigheten i värmekällornas konvektionsströmmar användes lufthastighetsmätaren Testo 480 från Nordtec Instrument AB. Noggrannheten vid mätning av lufthastighet var $\pm 0,03$ m/s + 4 % av mätvärdet.

3.1.6 Luftflödesmätare

Under försöken luftflödet i till- och frånluftskanalerna. Det gjordes med hjälp av strypflänsar med differenstrycksmätare som satt monterade på till- och frånluftskanalen. På tilluftskanalen satt en strypfläns från Fläktwoods och på frånluftskanalen en från Lindab.

3.2 Mätningar

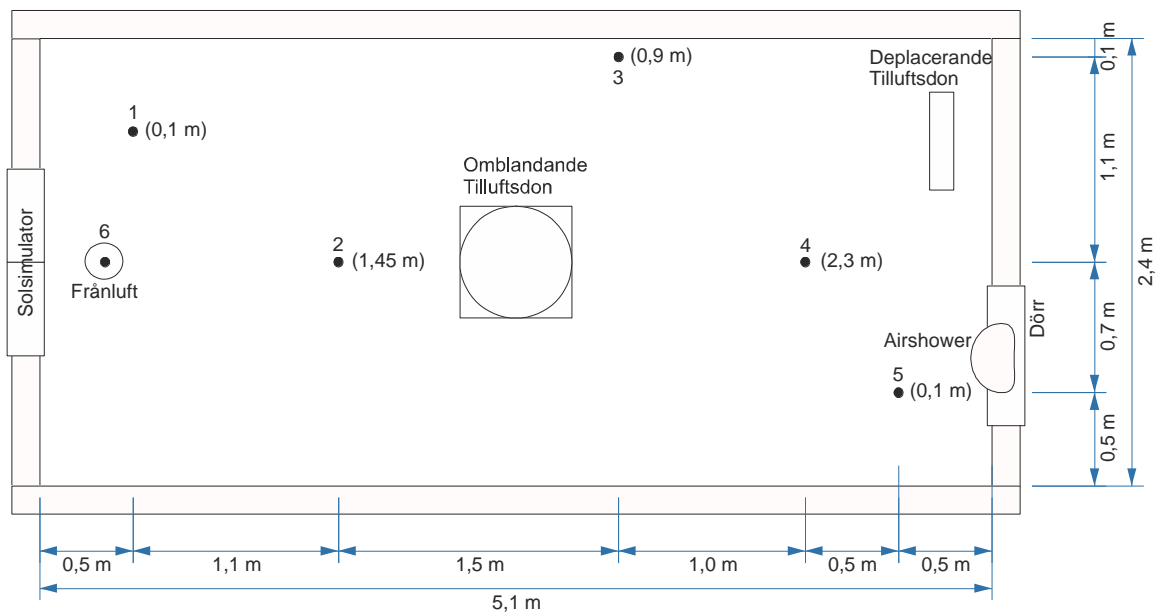
Mätningar utfördes på ett deplacerande, ett omblandande och ett utjämnande ventilationssystem. Det genomfördes även en kalibrering av temperaturgivarna. Vid mätningarna fanns ett antal uppsatta krav som skulle följas. Tilluftstemperaturen skulle hålla $18 \pm 0,5$ °C (Henriksson & Nilsson, 2016). Isotermiska förhållanden i det yttre rummet önskades vid mätningarna och temperaturen reglerades därför till 20 °C. En avvikelse på ± 2 °C kunde tolereras (Erlandsson & Glyré, 2014). För att klara både hygieniska krav och temperaturkrav enligt Warfvinge & Dahlblom (2010) bör ett kontorsrum ha luftomsättningen 3 oms/h vilket motsvarar ca. 28 l/s för kontoret i studien. Ventilationsflödet sattes till $140 \text{ m}^3/\text{h} = 38,9 \text{ l/s}$ efter önskemål från Airson Engineering AB. Loggning av temperaturer gjordes var femte sekund, i enlighet med Henriksson & Nilsson (2016) samt Erlandsson & Glyré (2014).

3.2.1 Kalibrering av temperaturgivare

Före mätningarna kalibrerades temperaturgivarna. Givarna kontrollerades mot 0 °C. Alla 11 givarna sänktes ner i isvatten och låg där tills temperaturen stabiliserats. Temperaturen registrerades och användes därefter för att kompensera uppmätta temperaturer.

3.2.2 Inverkan av spårgasens densitetsskillnad och spridning

Homogenspridningsmetoden och avklingningsmetoden kräver att spårgasen sprids jämnt i hela utrymmet (Sandberg, et al., 1993). Luftens densitet är $1,2 \text{ kg/m}^3$ (Warfvinge & Dahlblom, 2010) och den valda spårgasens densitet är $1,83 \text{ kg/m}^3$. Eftersom dikväveoxid är tyngre än luft utfördes en kontroll så att densitetsskillnad inte medförde att gasen och luften skiktade sig, dvs. att koncentrationen av spårgas blev lägre på högre höjd i försöksrummet. Samtidigt kontrollerades även så att spridningen av spårgas var likformig i hela rummet. De sex mätkanalerna placerades utspritt i rummet enligt Figur 11, mått inom parentes är höjden över golvet. Spårgas släpptes sedan ut under 14 minuter med flödet $250 \text{ cm}^3/\text{min}$. Spårgaskoncentrationen mättes i de sex punkterna. Om koncentrationen i de olika mätkanalerna blev samma indikerade det att gasen spreds likformigt och att densitetsskillnaden inte hade någon inverkan. Ventilationssystemet var avstängt under hela kontrollen.

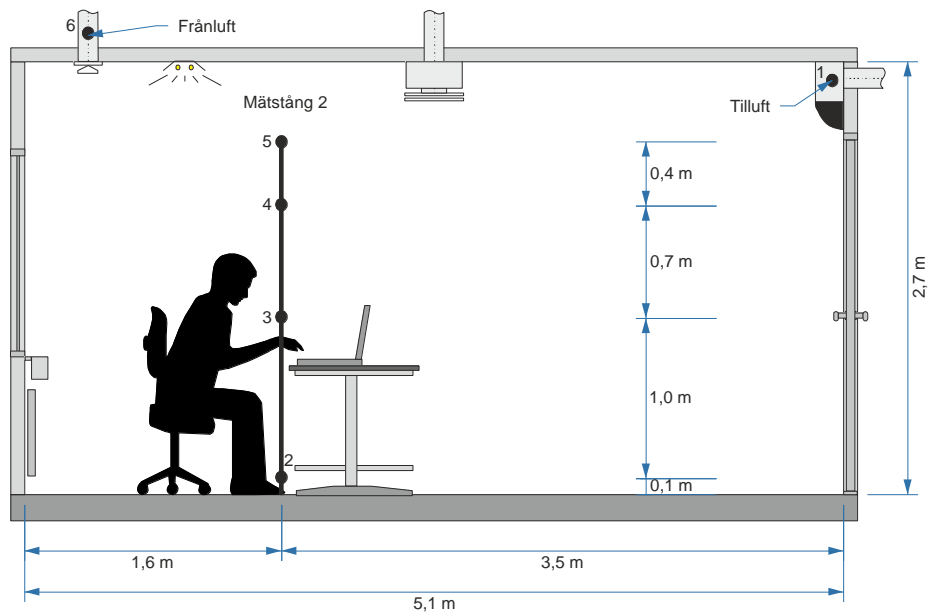


Figur 11: Planritning placering av kanaler för mätning av spårgaskoncentrationer vid densitetskontroll

3.2.3 Homogenspridningsmetoden

På varje system utfördes spårgasmätningar med homogenspridningsmetoden. Mätningarna följde ett bestämt schema, se bilaga 1. Koncentrationen mättes i alla sex mätkanaler och de var placerade enligt Figur 12. Kanalen som mätte spårgaskoncentrationen i tilluften placerades inuti tilluftsdonen och flyttades därmed beroende på vilket tilluftsdon som användes.

Spårgasanalyser som användes vid mätningarna tillät endast mätning i sex punkter samtidigt. För att bestämma rumsluftens medelålder och medelkoncentrationen av spårgas i rumsluften, krävs antingen många jämnt utspridda mätpunkter, att mätpunkterna som används är representativa för det ventilerade utrymmet, eller att avklingningsmätningar görs. Då en mätkanal placerades i tilluft och en i frånluft återstod endast fyra kanaler för att mäta spårgaskoncentration i försöksrummet. Det ansågs inte vara tillräckligt och därför genomfördes även avklingningsmätningar. Homogenspridningsmetoden användes alltså enbart för att bestämma lokal medelålder samt lokalt ventilationsindex för de olika ventilationssystemen. Övriga mått togs fram med hjälp av avklingningsmätningar.



Figur 12: Sektionsritning placering av kanaler för mätning av spårgaskoncentrationer

Vid mätning i sex mätkanaler var spårgasanalysatorns tidsintervall per mätomgång ca. 4 min. Mätning gjordes för att bestämma variationen av lokalt ventilationsindex och lokal medelålder. Mätning av två olika fall utfördes, ett fall med konstant värmeeffekt och ett med variabel, enligt tabell i bilaga 1. Varje fall mättes under ett dygns tid. Ventilationen startades fyra timmar innan mätningarna påbörjades. Systemet fick då tid att injusteras så tilluftstemperatur samt till- och frånluftsflöde blev stabila.

3.2.4 Lufttemperaturmätning

För att bestämma temperaturverkningsgrad och kyleffekt, mättes försöksrummets lufttemperatur i 11 punkter enligt Figur 9, samt till- och frånluftsflöde under mätningar med homogenspridningsmetoden.

3.2.5 Avklingningsmetoden

På varje system utfördes även spårgasmätningar med avklingningsmetoden. Mätningarna genomfördes enligt ett bestämt schema, se bilaga 2. Koncentrationen av spårgas mättes endast i frånluft vid avklingningsmätningar och spårgasanalysatorn hade då tidsupplösning 45 sekunder. Ventilationssystem och värmekällor stängdes av fem minuter innan spårgasen började släppas ut, för att luft rörelser i rummet skulle upphöra så spårgasen spreds jämnt. Spårgas släpptes ut under 14 minuter med flödet $250 \text{ cm}^3/\text{min}$. Under 16 minuter stod sedan försöksrummet orört för att koncentrationen skulle jämnas ut och bli likformig i rummet. Eftersom systemet för spårgasutsläpp användes för att sprida gasen, användes inga blandningsfläktar. Därefter startade ventilationssystemet och avklingningsmätningen påbörjades. Mätningen pågick sedan i ca. 80 minuter. Avklingningsmätningar utfördes för att bestämma ventilationseffektivitet, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet. Mätning gjordes för två olika fall, ett fall är med låg värmeeffekt och ett är med hög.

3.2.6 Röktest

Förutom mätningar med de två metoderna genomfördes tester med rök på alla tre ventilationssystem vid variabel värmeeffekt. Röktesterna utfördes för att avgöra hur luftströmmarna i rummet såg ut. De utfördes genom att rök tillfördes rummet då

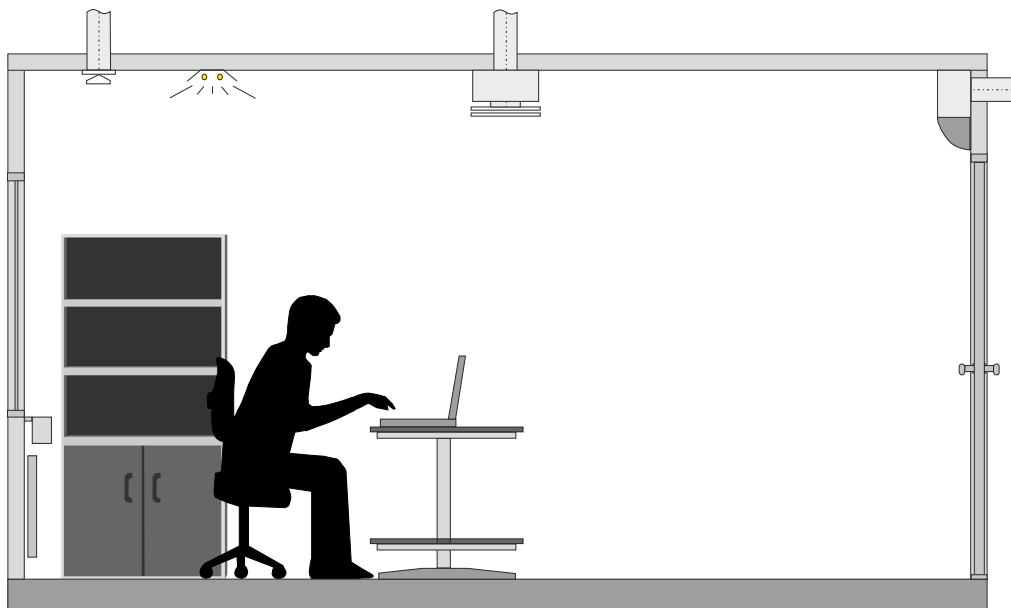
ventilationssystemet var igång. Testerna genomfördes den tid på dagen då värmeeffekten och lufttemperaturen var störst. Röken följde luftströmmarna och eventuella stagnationspunkter och kortslutningsströmmar kunde upptäckas. Röktestet kunde även hjälpa med förståelsen för övriga mätresultat.

3.2.7 Luftflödesmätning i värmekällornas konvektionsströmmar

De sista mätningarna som utfördes var bestämning av luftflöde i värmekällornas konvektionsströmmar. Detta gjordes för att kunna beräkna det totala konvektionsflödet på grund av värmekällor. Med detta erhöles ett svar om ventilationsflödet var tillräckligt stort. Vid deplacerande ventilation bör gränsen mellan de två zonerna hamna ovanför andningszonen. Därför mättes lufthastigheten i konvektionsströmmarna 20 cm ovanför andningszonen, dvs på höjden 1,3 m. Om konvektionsflödet på den höjden var större än ventilationsflödet, låg gränsen mellan de två zonerna längre ner. Luftflödet i en konvektionsström bestäms genom att mäta lufthastighet i konvektionsströmmen. Med hjälp av rök mäts sedan konvektionsströmmens area. Multiplikation av dessa ger luftflödet i konvektionsströmmen.

3.3 Försöksuppställning

Rummet som undersöktes skulle liknas vid ett kontorsrum anpassat för en person. Invändiga mått var 5,1 m långt, 2,4 m brett. Golvet var justerbart men sattes så att rumshöjden blev 2,7 m. Försöksrummets volym beräknades till 33,05 m³. Dörren till försöksrummet var placerad på en av kortsidorna. Skrivbord, dator och belysning var placerade vid motsatt kortsida, enligt Figur 13, vilket antogs vara en normal placering.



Figur 13: Principskiss försöksrum

Rummet var byggt som en cellplastlåda, dvs. golv, väggar och tak bestod av 150 mm XPS cellplast. Cellplasten hade värmeledningsförmågan 0,037 W/(m·K) (Erlandsson & Glyré, 2014). På varje långsida satt två stycken 0,3 m breda och 2,0 m höga 3-glas fönster. Försöksrummets totala värmegenomgångskoefficient hade beräknats till 0,31 W/(m²·K) (Erlandsson & Glyré, 2014). Det medför att värmetransmissionen borde varit mycket låg.

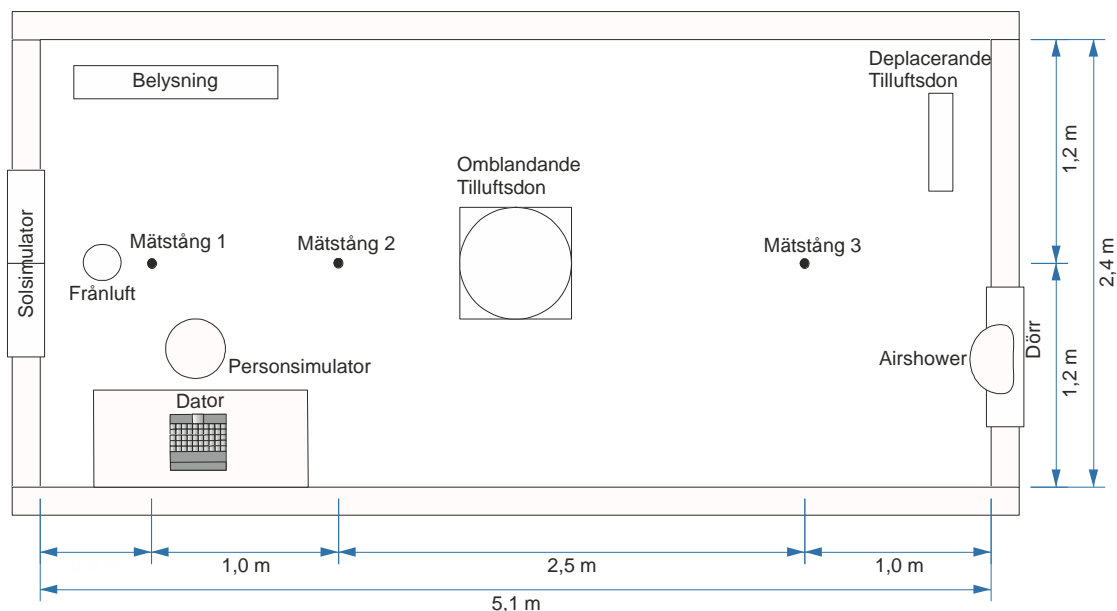
Försöksrummet var byggt inuti ett större uppvärmt rum. Det yttre rummet hade stora fönsterpartier med solavskärmning i form av invändiga vita lamellgardiner (Erlandsson & Glyré, 2014). Eftersom temperaturskillnad mellan rummen var låg minimerades värmetransmissionen ytterligare.

I studierna Henriksson & Nilsson (2016) samt Erlandsson & Glyré (2014) hade det justerbara golvet inte tätats. Det innebar att ventilationsluften ventilerade ett större utrymme och därmed var luftomsättningen lägre än önskat. Framförallt vid deplacerande och utjämnande ventilation påverkade det även luftströmningen. Tanken med metoderna är att undertempererad tilluft ska flyta ut längs golvet. Eftersom det inte var tätt, strömmade en del av tilluften ner under golvet, vilket kan ha medfört att temperaturen i golvnivå blev högre än den borde. Även spårgasmätningar kan ha påverkats. Rumsvolymen användes vid beräkningarna och blev därmed inkorrekta.

Tätning av golv utfördes med heldragen åldersbeständig byggfolie med ånggenomgångsmotståndet, $Z=1800 \cdot 10^3 \text{ s/m}$. För att täta mot väggar användes byggfolietejp. Tätningstejpens vidhäftning mot cellplast var mindre bra vilket medförde att tätning mot väggar inte var helt tät. Men då till- och frånluftsflyde skulle vara lika stora vid mätningarna bildades inget övertryck och tätningen av golvet ansågs vara tillräcklig.

3.3.1 Ventilationsdon

I studien genomfördes mätningar med olika luftföringsprinciper vilka åstadkoms genom användning av tre olika tilluftsdon. Två av donen var inköpta från Swegon och det tredje var ett don från AirSon Engineering AB, kallad Airshower. Donen var placerade enligt Figur 14 och kopplades med en anslutningskanal till en värmeväxlare för reglering av tilluftstemperatur. Mellan värmeväxlare och tilluftsdon satt en luftflödesmätare för tilluft.



Figur 14: Planritning försöksrum

3.3.1.1 Omblandande luftföring

För att skapa omblandande luftföring användes tilluftsdonet Swegon Colibri cc med anslutningslåda ALSd 125–200. Donet har dysor och ett flexibelt spridningsmönster. Vid

mätningar var donet placerat centrerat i taket enligt Figur 14 och det ger en cirkulär spridningsbild. Donet hade inte fällts in helt i taket utan hängde ner ca en dm.

3.3.1.2 Deplacerande ventilation

Deplacerande ventilation åstadkoms med tilluftsdonet Swegon DIR-600 och anslutningskanal DIRT-4-600. Det är ett rektangulärt tilluftsdon vilket utnyttjar låghastighetsteknik och är konstruerat för att fällas in i vägg. Donet var placerat bredvid dörren enligt Figur 14. Försöksummets uppbyggnad tillät ej att don fälldes in och placerades därför en halvmeter ut från väggen.

3.3.1.3 Utjämnande ventilation

För utjämnande ventilation användes ett don kallat Airshower från AirSon Engineering AB. Det är ett tilluftsdon vilket kan monteras i tak eller vägg. Vid mätningar var det monterat på väggen ovanför dörren enligt Figur 14. Donet använder sig av låghastighetsteknik för att åstadkomma utjämnande luftförling.

3.3.1.4 Frånluftsdon

Evakuering av rumsluft gjordes i taknivå enligt Figur 14. Frånluftskanalen gick in i rummet och öppningen till kanalen var placerad i jämn nivå med taket. Inget frånluftsdon var påkopplat på kanalens ände.

3.3.2 Värmeeffekt

Värmeeffekten utgjordes av fyra olika värmekällor. Ett kontorsrum antogs ha belysning, en dator, en person samt solstrålning. Värmeavgivning från belysning och dator ansågs vara relativt konstanta. Däremot varierar värmeavgivning från en person och solinstrålning från dag till dag. I studien användes därför en simulator för att likna en person samt en annan simulator som skulle efterlikna solinstrålning. Alla värmekällorna som användes i denna studie byggdes upp i den föregående studien Henriksson & Nilsson (2016), dvs. belysning, dator-, person- och solsimulator.

3.3.2.1 Belysning

Belysningen i rummet bestod av en taklampa med två stycken Philips 827 TL-D ljuskällor med märkeffekten 36 W var (Henriksson & Nilsson, 2016). Lampan var placerad långt in i rummet vid skrivbordet enligt Figur 14. Vid mätning med multimeter upptäcktes att lampan gav effekten 96 W.

3.3.2.2 Datorsimulator

I stället för en riktig dator användes en simulator vid mätningarna. I studien Henriksson & Nilsson (2016) antogs kontoret ha en stationär dator och skärm med effekten 90 W. För att simulera dessa användes två metallcylindrar med diametern 20 cm och höjden 40 cm. I den ena cylindern placerades en lampa med märkeffekt 30 W för att simulera en skärm och i den andra en lampa med märkeffekt 60 W för att simulera datorn. Enligt Henriksson & Nilsson (2016) gjordes antagandet att datorn var igång samma tider som personen var på kontoret och den antogs inte gå i strömsparläge då personen lämnar kontoret.

Numera används i regel bärbara datorer. Mätning av effekt på en bärbar dator, HP, gjordes och gav 30 W. Därför togs metallcylindern med 60 watts lampan bort. Cylindern med 30 watts lampan behölls och antogs motsvara en bärbar dator. Faktisk effekt visade efter mätning med multimeter också vara 30 W. Datorsimulatorens var placerad på ett skrivbord långt in i rummet enligt Figur 14.

3.3.2.3 Personsimulator

För att kunna göra mätningar utan att en riktig person närvarade i kontoret användes en personsimulator. Denna var uppbyggd av en kartongcylinder som var tätad i toppen och botten. Cylindern hade diametern 0,32 m och höjden 1,2 m vilket gav den en omslutande area på 1,85 m². Det motsvarar ungefär en vuxen persons kroppsytta (Warfvinge & Dahlblom, 2010).

Vid skrivbordsarbete avger en människa 125 W värme (Warfvinge & Dahlblom, 2010). Värmen består av konvektion, strålning, ledning och avdunstning (Gavhed & Holmér, 2006:2). Avdunstningen utgör 25 %, vilket innebär att konvektion, strålning och ledning står för ca. 94 W av värmeavgivningen (Rengholt, 1991).

Som värmekälla användes en Eurofarm infraröd lampa med märkeffekten 100 W, vars värmeavgivning skulle efterliknas en människas (Henriksson & Nilsson, 2016). Kontroll med multimeter gav effekten 93 W. Värmeavgivning från avdunstning försumrades. Lampan var placerad inuti en metallcylinder i botten av den stående kartongcylindern. Konstruktionen var gjord för att begränsa kartongens yttemperatur (Erlandsson & Glyré, 2014). Yttemperaturen skulle vara likt en människas och blev den för hög kunde konvektionsströmmen påverkas (Erlandsson & Glyré, 2014).

3.3.2.4 Solinstrålningssimulator

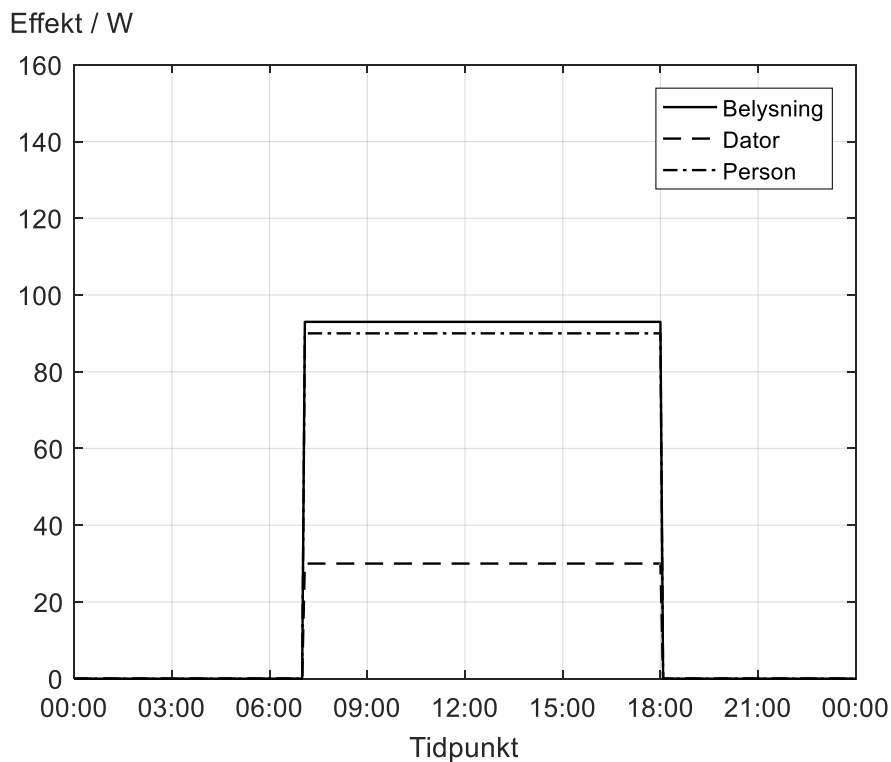
För att simulera solinstrålning från ett fönster i kontoret användes två stycken Ebeko spegelvärmare på aluminiumplåt. Dessa var placerade på kortsidan mittemot dörren enligt Figur 14. Tillsammans hade de en märkeffekt på 200 W och uppmätt effekt var 176,6 W (Henriksson & Nilsson, 2016).

3.4 Mätfall

Vid lufttemperaturmätningar samt homogenspridningsmetoden undersöktes två olika fall. Det ena fallet var med konstant värmeeffekt och det andra med variabel värmeeffekt. Även vid mätningarna med avklingningsmetoden undersöktes två olika fall. Ett fall med låg värmeeffekt och ett med hög belastning.

3.4.1 Homogenspridningsmetoden och lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt

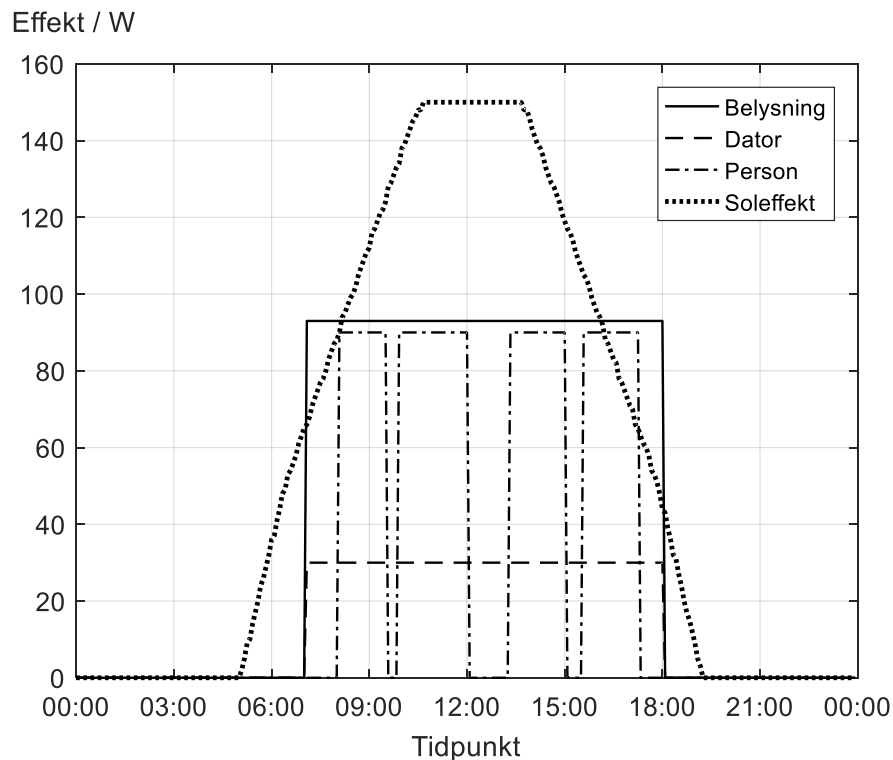
Vid mätningar med konstant värmeeffekt användes belysning, dator och person enligt Figur 15. Solsimulatorn var alltså inte aktiverad. Värmekällorna hade konstant effekt mellan kl. 07 och 18 med total effekt 213 W.



Figur 15: Värmekällornas effekt vid mätning med konstant värmeeffekt

3.4.2 Homogenspridningsmetoden och lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt

Den variabla värmeeffekten kom från belysning, datorsimulator, personsimulator och solsimulator. Dessa hade varierande effekt under mätningen enligt Figur 16. Maximal effekt under mätningen var 363 W.



Figur 16: Värmekällornas effekt vid mätning med variabel värmeeffekt

Normal kontorstid antogs vara 08–17. Städning av kontor görs ofta innan arbetsdagens start och därför antogs belysning vara igång från kl. 07 till 18.

Ett kontor är sällan bemannat under en hel arbetsdag. En slumpgenerator användes och ett närvaroschema skapades, baserat på närvaron i ett kommunalt kontor under olika timmar och veckodagar (Johansson 2005 refererad i Erlandsson & Glyré 2014), se Tabell 3. Personsimulatorn startades och stängdes av efter närvaroschemat.

Tabell 3: Närvaroschema i kontorsrum

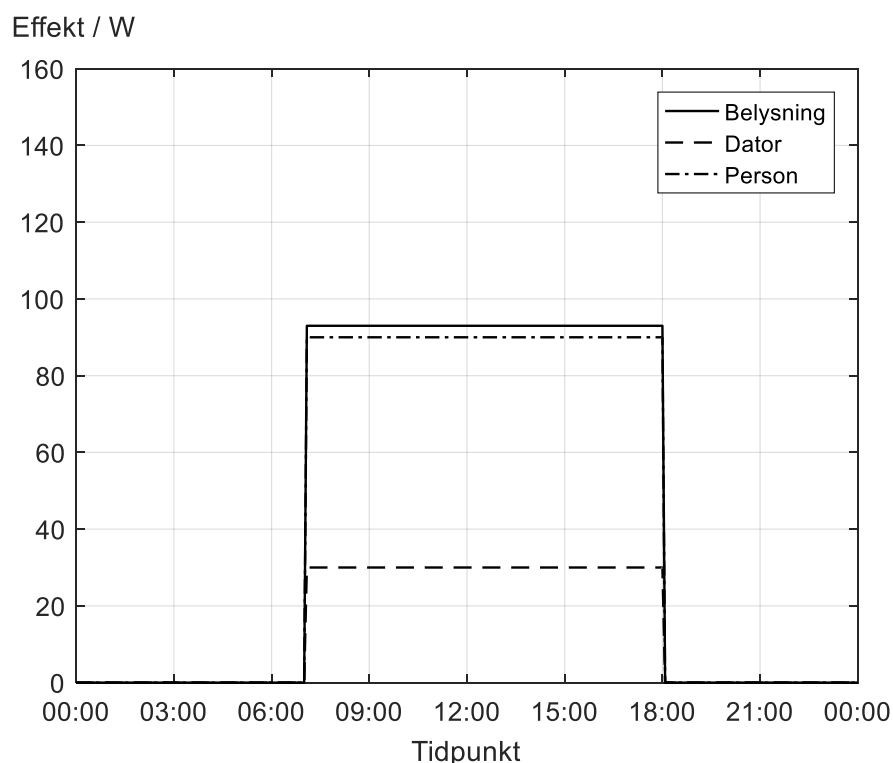
Tidpunkt	Personsimulator
08:00 – 09:30	Påslagen
09:30 – 10:00	Avstängd
10:00 – 12:00	Påslagen
12:00 – 13:30	Avstängd
13:30 – 15:00	Påslagen
15:00 – 15:30	Avstängd
15:30 – 17:00	Påslagen

Datorsimulatorens startades och stängdes av samtidigt som belysningen. Den gick inte i strömsparläge då personen lämnade kontoret under arbetsdagen. Därmed var datorn igång från kl. 07 till 18.

Eftersom solens effekt varierar över dagen programmerades i Erlandsson & Glyré (2014) en solstrålningskurva med soluppgång och solnedgång. Solstrålningskurvan baserades på en studie om maximal solinstrålning under en medeldag på året (Blom & Larsen 1992 refererad i Erlandsson & Glyré 2014). Programvaran som styrde värmelasterna kunde inte reglera spänningen, utan bara slå av och på. För att kunna reglera solsimulatorens och därmed erhålla den tänkta solkurvan, hade dygnet delats in i 90 sekunders intervall. Simulatorens var igång olika lång tid under dessa 90 sekunder beroende på vilken effekt som önskades. Till exempel var solkurvas maximum 151 W medan solsimulatorens maximalt gav 176,6 W. För att erhålla 151 W skulle simulatorens vara igång $151/176,6 = 85,5\%$ och avstängd 14,5 % av ett 90 sekunders intervall, dvs igång 77 sekunder och avstängd 13 sekunder (Henriksson & Nilsson, 2016).

3.4.3 Avklingningsmetoden med låg värmeeffekt

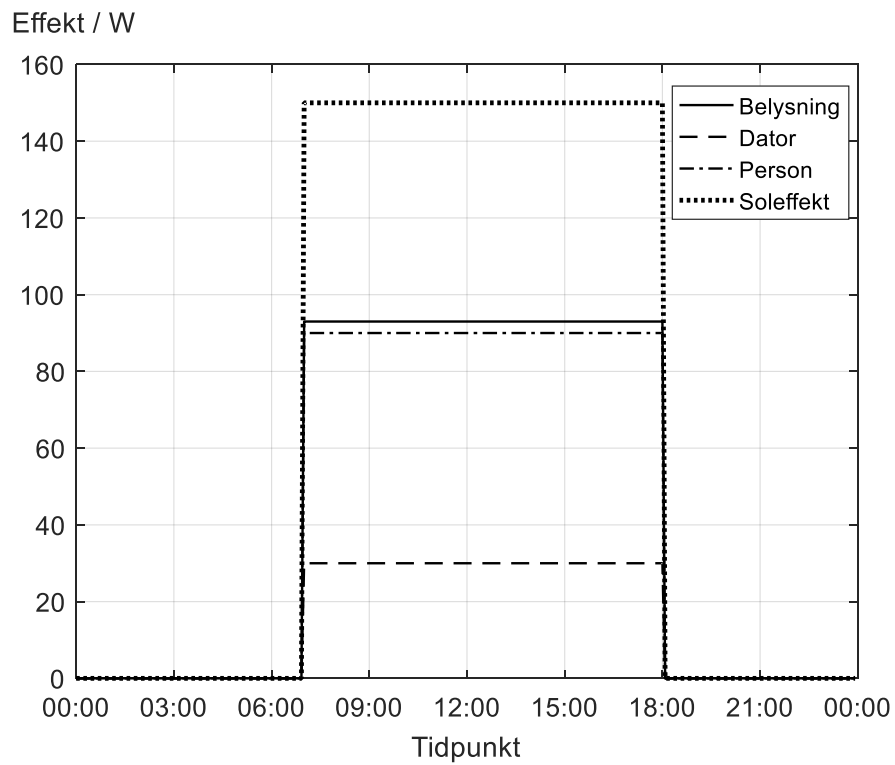
Värmekällornas effekt under avklingningsmetoden med låg värmeeffekt var samma som för fallet vid konstant värmeeffekt med homogenspridningsmetoden. Belysning, dator och person var igång konstant enligt Figur 17. Värmekällornas totala effekt under mätningen var 213 W.



Figur 17: Värmekällornas effekt vid fallet med låg värmeeffekt

3.4.4 Avklingningsmetoden med hög värmeeffekt

Vid avklingningsmetoden med hög värmeeffekt var belysning, dator, person och solsimulator igång enligt Figur 18. Belastningen var konstant under mätningen med total effekt 363 W.



Figur 18: Värmekällornas effekt vid fallet med hög värmeeffekt

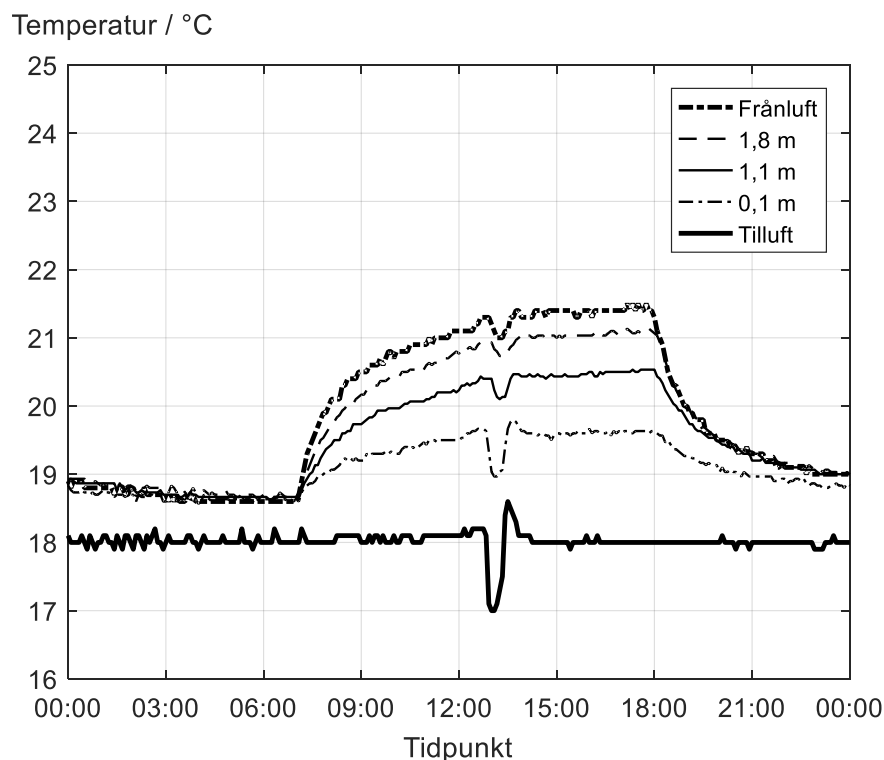
4 Resultat

Temperatur i försöksrummet vid mätningar redovisas för tre olika höjder samt i till- och frånluft. Eftersom temperatur mättes i tre punkter på varje höjd togs medelvärdet av dessa. Detsamma gällde för temperaturverkningsgrad. I övrigt redovisas resultat för kyl- och värmeeffekt, spårgaskoncentration, lokalt ventilationsindex, lokal medelålder, nominell tidskonstant, luftutbytestid, luftutbyteseffektivitet samt ventilationseffektivitet. Även en kontroll mot uppsatta randkrav gjordes. Innan mätningarna kalibrerades temperaturgivarna, se bilaga 3. Det utfördes även en kontroll på inverkan av spårgasens densitetsskillnad och spridning, se bilaga 4.

4.1 Deplacerande ventilation

4.1.1 Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt

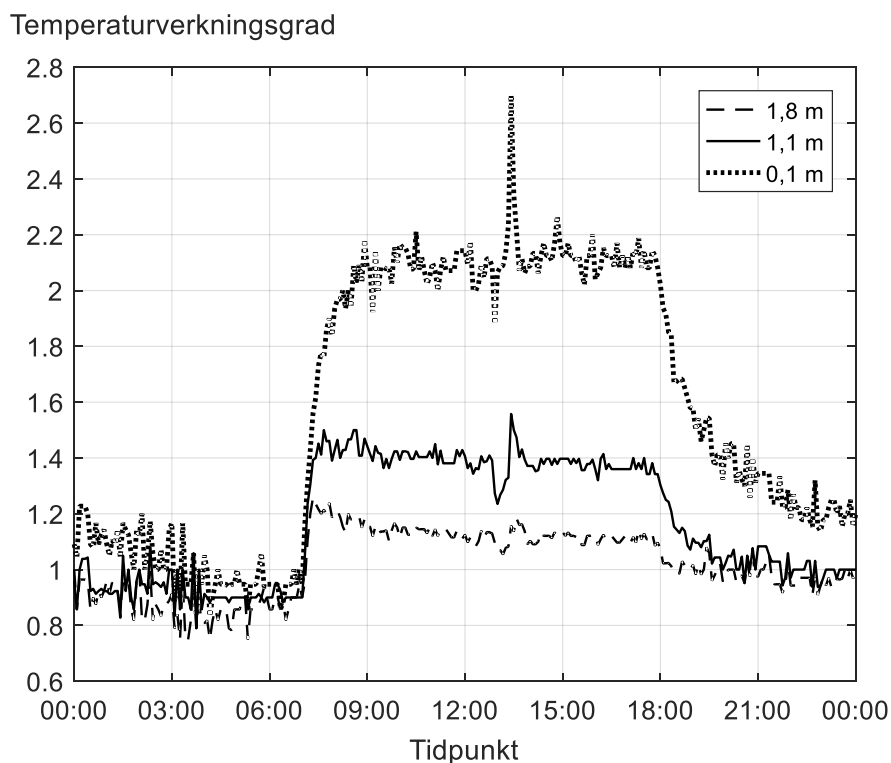
Lufttemperatur i försöksrum samt till- och frånluftstemperatur vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt redovisas i Figur 19. Temperaturen uppgick till ca. 18,8 °C fram tills värmekällorna startades kl. 07. Från kl. 07 ökade temperaturen på samtliga höjder fram till kl. 13:45 och planade därefter ut fram till kl. 18. Lufttemperaturen var då ca. 19,6 °C på 0,1 m, 20,5 °C i andningszon, 21,0 °C på 1,8 m och 21,4 °C i frånluft. Kl. 12:50 sjönk tilluftstemperaturen till 17,1 °C för att sedan öka till 18,6 °C kl. 13:30. Till följd av detta syns en tydlig sänkning av lufttemperaturen under denna tidsperiod. Vid kl. 14 hade temperaturerna återigen stabiliserats. Efter kl. 18 sjönk temperaturen som resultat av att värmekällorna stängdes av. När mätningen avslutades kl. 24 hade temperaturen sjunkit till 18,8 °C på 0,1 m och till 19 °C i andningszon, på 1,8 m samt i frånluft. På 0,1 m kl. 16 erhöles maximal lufttemperatur 19,7 °C, i andningszonen 20,5 °C kl. 17:20, på 1,8 m 21,1 °C kl. 17:10 och i frånluften 21,5 °C kl. 17:10. Kl. 14:25–18:00 hölls vertikal temperaturgradient mellan 0,1 och 1,8 m nästintill konstant på sitt maximala värde 1,5 °C.



Figur 19: Lufttemperatur i försöksrum vid konstant värmeeffekt och deplacerande ventilation

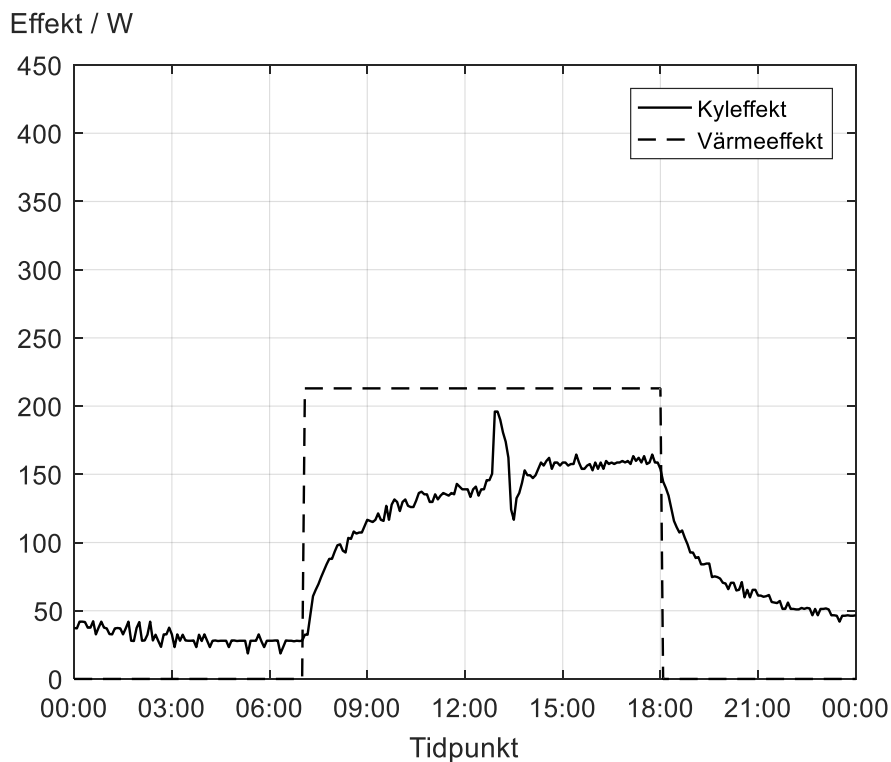
Vid mätningarna fanns uppsatta krav som skulle följas. Enligt Figur 19 hölls tilluftstemperaturen inom $18 \pm 0,5$ °C bortsett från kl. 12:50–14:00. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,2 och 20,1 °C enligt bilaga 5 och klarade kravet på 20 ± 2 °C. I bilaga 5 redovisas även till- och frånluftsflödet under mätningen. Tilluftsflödet under dygnet låg mycket stabilt på 38,3–39,7 l/s och frånluftsflödet låg lite högre, 38,6–39,7 l/s.

Temperaturverkningsgrad under samma tidsperiod beräknades enligt ekvation (1) och redovisas i Figur 20. Initialt uppgick temperaturverkningsgraden ungefär till 1,0–1,1 på höjden 0,1 m och 0,9–1,0 i andningszonen samt på 1,8 m höjd. Från kl. 07 fram till kl. 18 var temperaturverkningsgraden ca. 2,1 på 0,1 m, 1,4 i andningszonen och 1,1 på 1,8 m höjd. Vid 0,1 m erhöles en mycket hög verkningsgrad, vilket beror på tilluftens tillförsel i golvnivå. Vid dygnets slut var temperaturverkningsgraden 1,2 på 0,1 m och 1,0 i andningszonen samt på 1,8 m. På alla höjderna sänktes verkningsgraden markant kl. 12:50 för att sedan öka kl. 13. Anledning till detta var tilluftstemperaturens variation under denna tidsperiod. Om dessa toppar försummas erhöles i andningszonen den maximala verkningsgraden 1,50 kl. 07:40 samt 08:40. På 0,1 och 1,8 m erhöles det maximala värdet 2,27 kl. 14:50 respektive 1,26 kl. 07:20.



Figur 20: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid konstant värmeeffekt och deplacerande ventilation

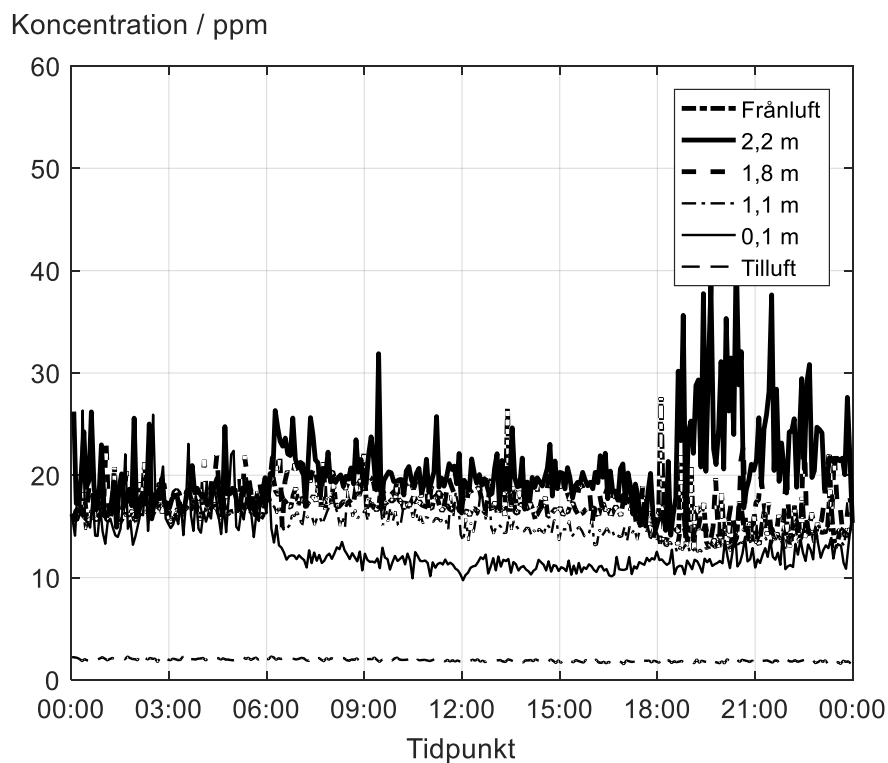
Tillförd värmeeffekt samt kyleffekt, dvs. värmeeffekt bortförd med ventilationsluften redovisas i Figur 21. Kyleffekten beräknades enligt ekvation (8). Försöksrummet hade ett kylbehov dygnet runt. Det kan förklaras med att rummet ackumulerar en del värme samt att det inte är helt tätt. Värme från rummet utanför försöksrummet kan därmed läcka in. I början av mätningen uppgick kyleffekten till ungefär 37,0 W. Innan kl. 07 hade den sjunkit till 28,0 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten, vilket den gjorde nästintill ända fram till kl. 18. Då värmekällorna stängdes av sjönk kyleffekten ända tills mätningen avslutades, då var kyleffekten 47,0 W. Alltså hann den inte sjunka till samma nivå som när mätningen startades. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 213,0 W. Kyleffektens maxvärde var 196,0 W och erhöles kl. 12:55. Under samma tidsperiod sjönk tilluftstemperaturen till 17,1 °C. Försummas denna effekttopp fås istället maxvärdet 164,5 W kl. 17:45. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet var 97,3 respektive 88,3 W. Det tillfördes alltså 9,0 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 90,7 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 21: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt

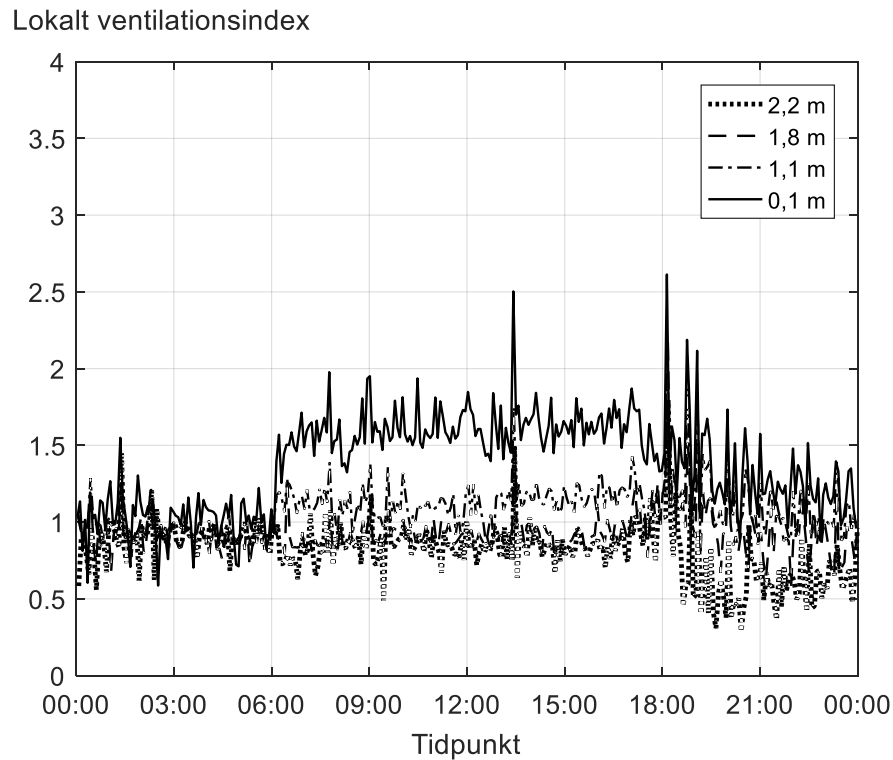
4.1.2 Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 22. Koncentration i tilluften var inte riktigt noll vilket antagligen berodde på spårgasanalyserns nollpunktsdrift. Fram till kl. 06 var koncentrationen i alla kanaler utom tilluften samlat runt 17 ppm. Efter kl. 06 erhöles en tydligare skillnad mellan kanalerna, trots att värmekällorna inte startades förrän kl. 07. Då värmekällorna var igång uppgick koncentrationerna till ca. 12 ppm vid 0,1 m, 16 ppm i andningszonen, 17 ppm i frånluften, 18 ppm vid 1,8 m och 20 ppm vid 2,2 m. När värmekällorna stängdes av kl. 18 jämnade koncentrationen återigen ut sig runt 13–14 ppm i alla mätpunkter utom vid 2,2 m, där stora variationer erhöles, ca. 20–40 ppm.



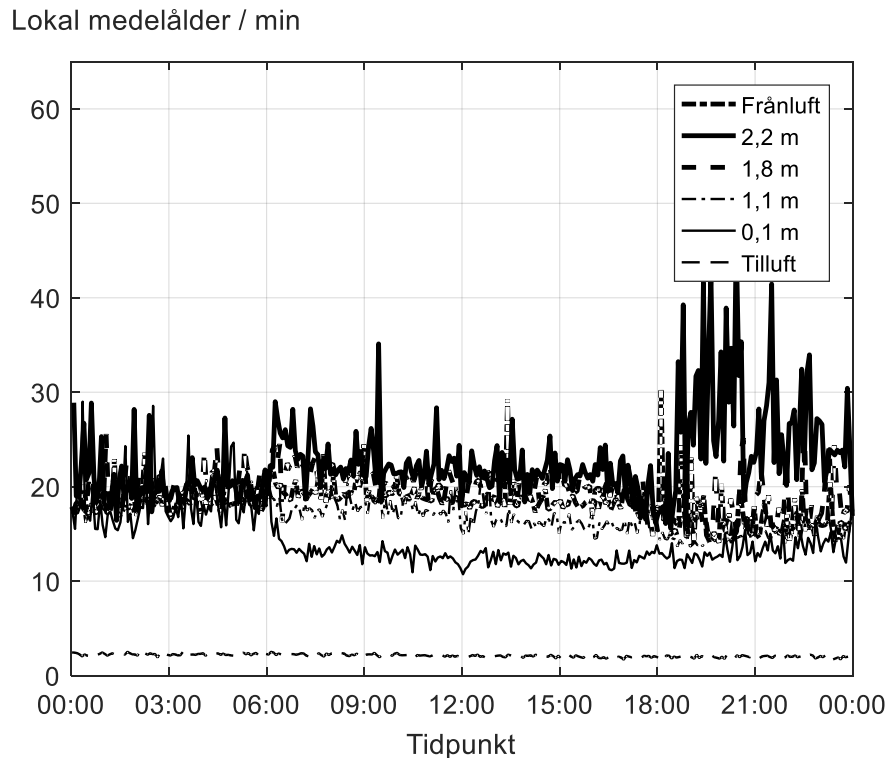
Figur 22: Spårgaskoncentration vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt

För beräkning av lokalt ventilationsindex användes ekvation (2) och resultat redovisas i Figur 23. Notera att ventilationsindex ej beräknats för till- och frånluft. I frånluften erhålls alltid värdet 1,0 och i tilluften blir det odefinierat eftersom nämnaren i uttrycket blir 0. Innan kl. 06 var variationen av det lokala ventilationsindexet liten och ungefär 1 vid alla mätpunkter. Kl. 06–18 låg indexet på en stabil nivå med liten variation, 1,5–1,8 vid 0,1 m, 1,0–1,3 i andningszonen och 0,7–1,0 vid 1,8 samt 2,2 m. En tydlig topp syntes vid alla höjder runt kl. 13, vilken troligtvis berodde på att tilluftstemperaturen inte hölls stabil under denna period. Efter kl. 18 varierade indexet betydligt mer vid de olika höjderna. På 0,1 m var variationen 1,0–2,0, i andningszonen 0,9–1,4, på 1,8 m 0,7–1,2 och på 2,2 m 0,4–0,1.



Figur 23: Lokalt ventilationsindex vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt

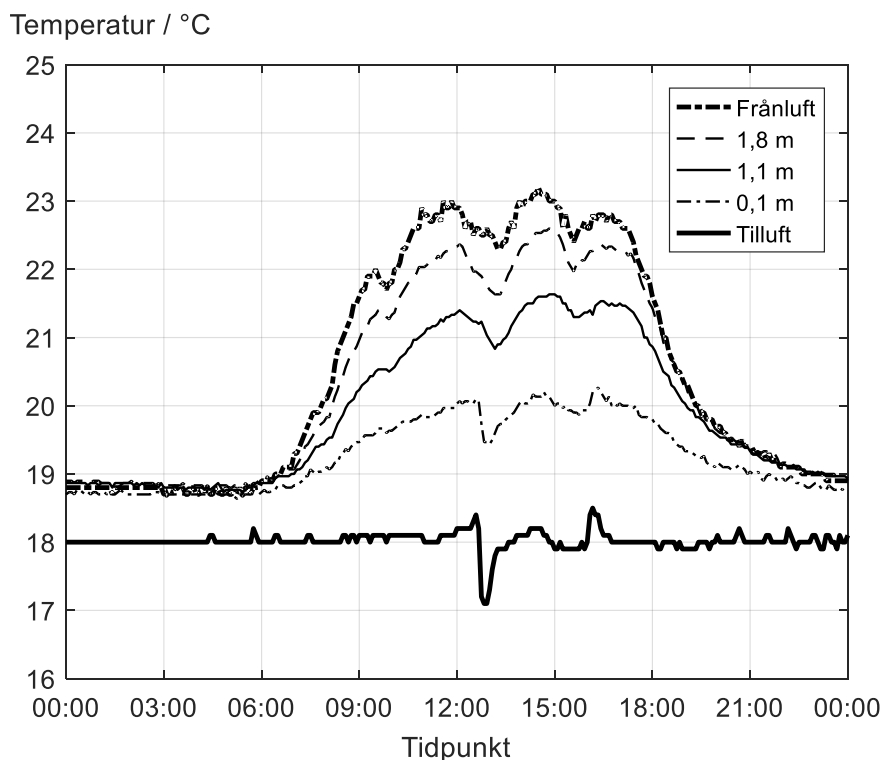
Vid mätning med homogenspridningsmetoden utnyttjades ekvation (9) för att beräkna lokal medelålder i de olika mätpunkterna. Resultat som erhöles redovisas i Figur 24. Utseendet påminde mycket om det som erhöles i Figur 22 vilket beror på att lokala medelåldern är beroende av spårgaskoncentrationen i aktuell punkt. Medelåldern i tilluften var inte riktigt 0 vilket troligtvis berodde på spårgasanalyserns nollpunktsdrift. Innan kl. 06 var medelåldern i alla punkter ungefär samma, runt 19 minuter. Därefter erhöles medelåldern 12 minuter på 0,1 m, 18 minuter i andningszonen, 19 minuter i frånluften, 21 minuter på 1,8 m och 22 minuter på 2,2 m. Efter kl. 18 sjönk medelåldern i alla punkter förutom på 2,2 m till en lägre nivå än innan värmekällorna startade.



Figur 24: Lokal medelålder vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt

4.1.3 Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt

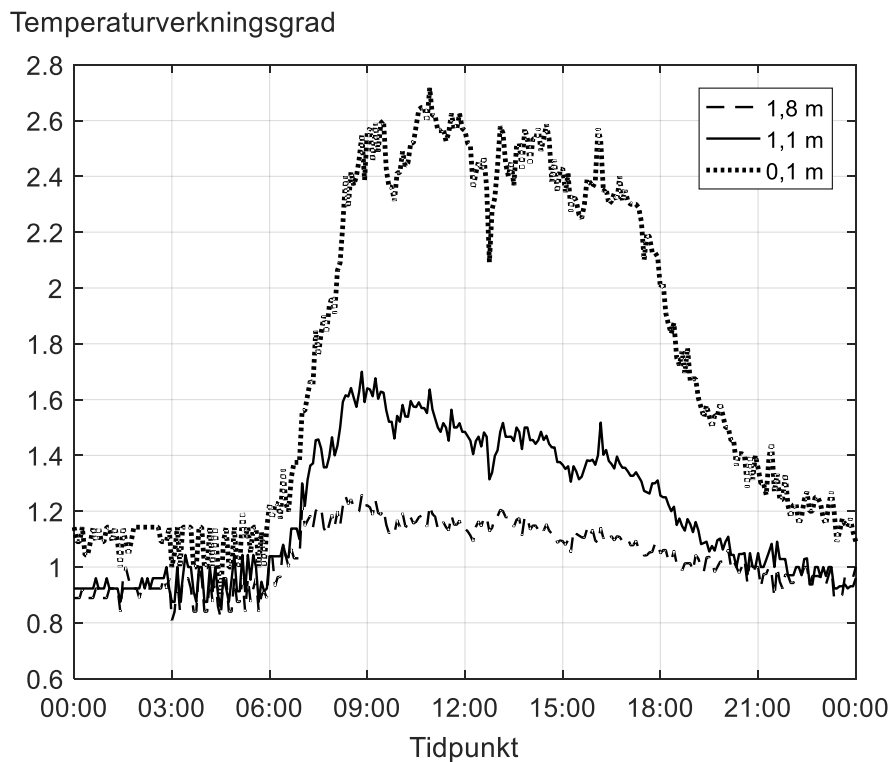
Lufttemperatur i försöksrummet samt till- och frånluftstemperatur vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt redovisas i Figur 25. I början på dygnet innan värmekällorna startades var lufttemperaturen väldigt jämna i hela rummet. Temperaturen uppgick då till 18,7–18,9 °C. Kl. 05 startades solsimulatorn. Eftersom soluppgång simulerades och effekten initialt var mycket låg syntes ingen ökning av temperaturen. När övriga värmekällor startades kl. 07–08 syntes det däremot tydligt. Fram till kl. 14:30 ökade temperaturen till 20,1 °C på 0,1 m, 21,6 °C i andningszonen, 22,5 °C på 1,8 m och 23,2 °C i frånluften. I slutet av dygnet hade temperaturen sjunkit till 18,8 °C på 0,1 m och till 18,9 °C i andningszonen, på 1,8 m samt i frånluften. Kl. 12:30 ökade tilluftstemperaturen till 18,4 °C. Därefter sjönk den till 17,1 °C och först kl. 15 hade den stabiliserats. På grund av detta och att personsimulatorn var avstängd under samma period kunde en tydlig sänkning av lufttemperaturen ses. Kl. 16 ökade tilluftstemperaturen återigen till 18,5 °C och det dröjde till kl. 16:45 innan den sjunkit tillbaka till 18,0 °C. Det ledde till att temperaturen, främst på 0,1 m ökade. Om dessa toppar försummas erhöles de maximala lufttemperaturerna 20,3 °C på 0,1 m kl. 16:20, 21,6 °C i andningszonen kl. 15, 22,6 °C på 1,8 m kl. 14:50 samt 23,2 °C i frånluften kl. 14:30. Temperaturen i frånluften var högst vilket den bör vara vid deplacerande ventilation. Den vertikala temperaturgradienten mellan 0,1 och 1,8 m varierade under dagen men var som störst 2,6 °C kl. 15.



Figur 25: Lufttemperatur i försöksrum med variabel värmeeffekt och deplacerande ventilation

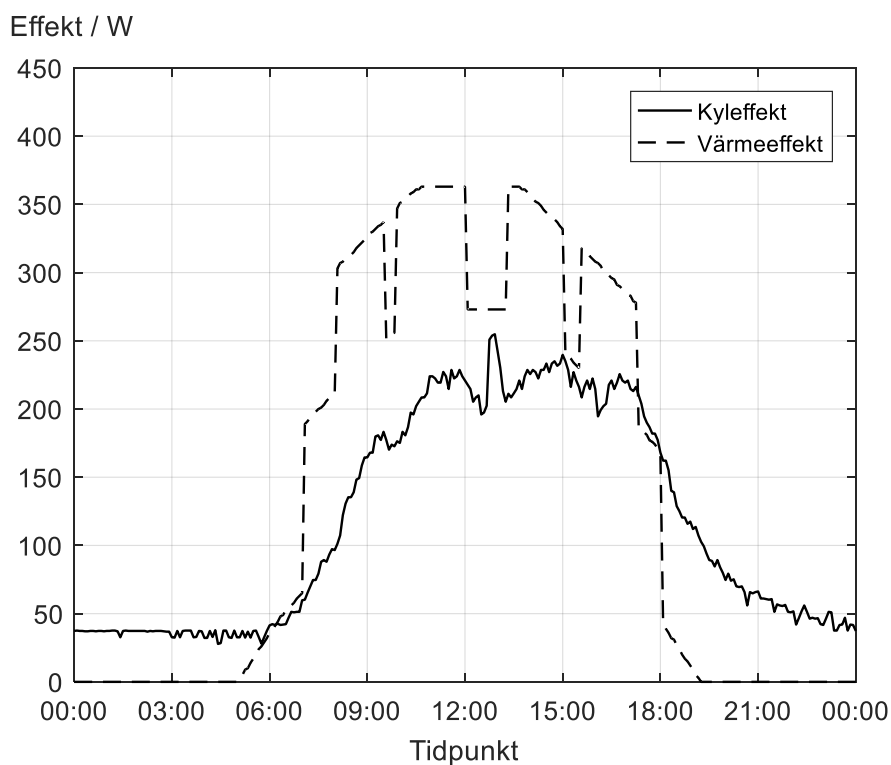
Enligt Figur 25 hölls inte tilluftstemperaturen inom $18 \pm 0,5$ °C. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,3 och 20,4 °C enligt bilaga 5 och höll sig därmed inom gränserna. Till- och frånluftsfördet redovisas i bilaga 5. Tilluftsfördet varierade mellan 38,3–40,0 l/s. Frånluftsfördet var för lågt, runt 37,8–38,6 l/s fram tills kl. 12. Därefter sjönk fördet till 37,8 l/s för att sedan stiga till 38,9 l/s. Under resterande tid varierade frånluftsfördet runt 38,9–39,7 l/s.

Temperaturverkningsgrad på de olika höjderna redovisas i Figur 26. I början av dygnet uppgick temperaturverkningsgraden till ca. 0,9 i andningszonen samt på höjden 1,8 m. På 0,1 m uppgick den till ca. 1,1. Kl. 06 då effekten från solsimulatorens hade ökat till 40 W ökade verkningsgraderna på respektive höjd till 2,6, 1,7 och 1,6. Under arbetsdagen var temperaturverkningsgraden ungefär 2,5 på 0,1 m, 1,5 i andningszonen och 1,1 på 1,8 m höjd. Vid dygnets slut uppgick temperaturverkningsgraderna till 1,1 på 0,1 m och 1,0 i andningszonen samt på 1,8 m. På 0,1 m och i andningszonen sänktes verkningsgraden markant kl. 12:45. Anledning till detta var tilluftstemperaturns variation under denna tidsperiod. Om dessa toppar försummas uppgick de maximala verkningsgraderna till 1,70 i andningszonen samt 1,26 på 1,8 m. För 0,1 m erhöles det maximala värdet 2,72 kl. 10:55.



Figur 26: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och deplacerande ventilation

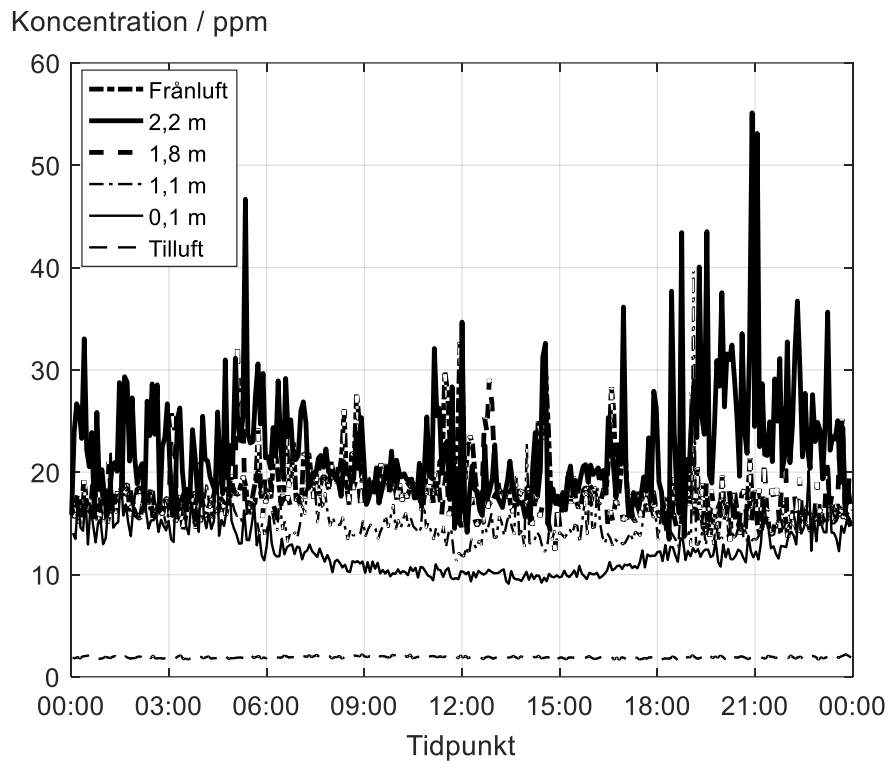
I Figur 27 redovisas kyl- och värmeeffekten. I början av dygnet fram tills värmekällorna startade var kyleffekten 38 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten markant fram tills kl. 10:40. Därefter planade kyleffekten ut och fram till kl. 17:15 varierade kyleffekten mellan ca. 205,0 och 240,0 W. Efter kl. 17:15 började kyleffekten sjunka och kl. 24 uppgick den till 37,0 W, dvs ungefär i samma nivå som den var i början av dygnet. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 363,0 W. Maximal kyleffekt var 254,8 W och den erhöles kl. 12:55, trots att personsimulatorens var avstängd 12:15–13:00. Anledningen till detta var troligtvis ökningen av frånluftsflödet samt att tilluftstemperaturen sjönk under denna period. Försumrades denna effekttopp var maximal kyleffekt istället 239,7 W vid kl. 15, precis innan personsimulatorens stängdes av. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet uppgick till 140,3 respektive 117,3 W. Med andra ord tillfördes det 22,8 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 83,7 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 27: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt

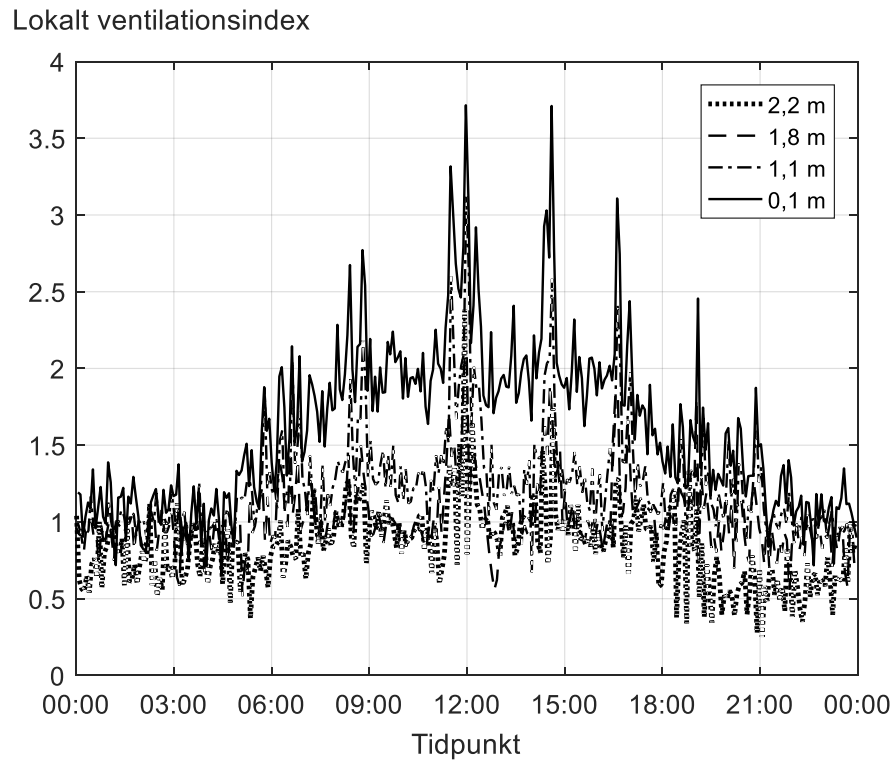
4.1.4 Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 28. Fram till kl. 06 uppgick koncentrationen i alla kanaler förutom tilluften, 1,8 samt 2,2 m till ca. 16–17 ppm med liten variation. På 1,8 och 2,2 m var variationen stor, ungefär 17–30 ppm. Efter kl. 06 började en större spridning erhållas mellan kanalerna. Då värmekällorna var igång uppgick koncentrationerna till ca. 10 ppm på 0,1 m och 14–16 ppm i andningszonen. På 1,8 m, 2,2 m samt i frånluften var koncentrationen ungefär samma och med stor variation, ca. 16–28 ppm. Efter kl. 18 varierade koncentrationen i alla mätpunkter mellan 12 och 19 ppm, förutom vid 2,2 m. Där var koncentrationen ca. 20–50 ppm.



Figur 28: Spårgaskoncentration vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt

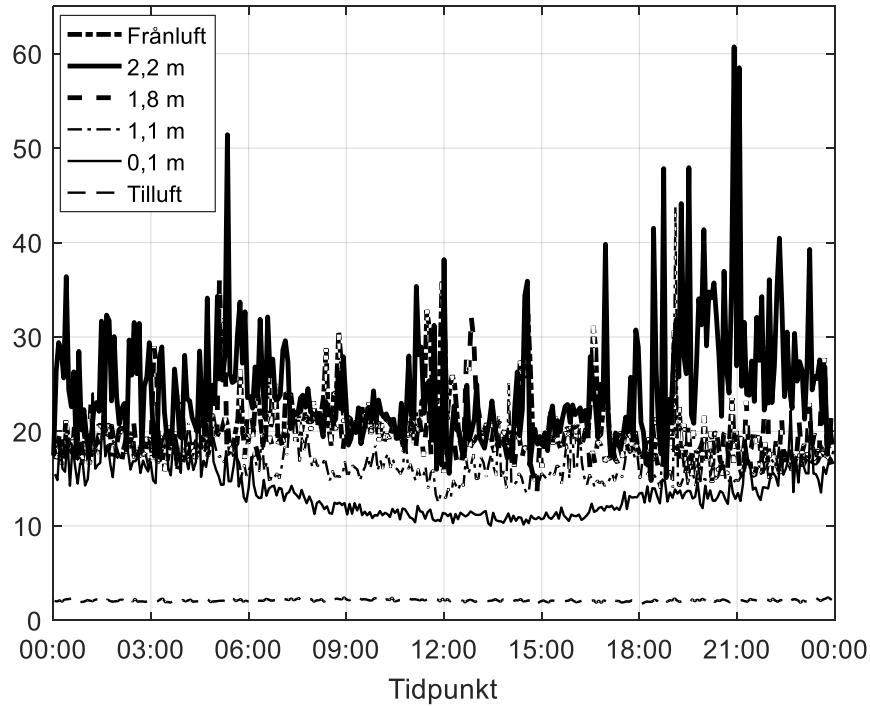
Resultat från beräkning av lokalt ventilationsindex redovisas i Figur 29. Innan kl. 06 var variationen av lokalt ventilationsindex 0,6–1,0 för 1,8 och 2,2 m. På 0,1 m och andningszonen var variationen under samma tidsperiod 0,8–1,3. Kl. 06–18 erhöles en större variation i alla mätpunkter. På 0,1 m uppgick det lokala ventilationsindexet till 1,5–3,5, i andningszonen till 1,0–2,5 och på 1,8 samt 2,2 m till 0,6–2,0. Efter kl. 18 varierade ventilationsindexet betydligt mindre. På 0,1 m var variationen 1,0–1,7, 1,0–1,5 i andningszonen, 0,8–1,3 på 1,8 m och 0,3–1,0 på 2,2 m.



Figur 29: Lokalt ventilationsindex vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt

Lokal medelålder redovisas i Figur 30. Fram till kl. 06 var medelåldern i alla punkter ungefär samma, runt 19 minuter förutom vid 1,8 samt 2,2 m. Där uppgick lokala medelåldern till 20–30 minuter. Efter kl. 06 erhöles medelåldern 11 minuter på 0,1 m, 18 minuter i andningszonen, 19 minuter i frånluften, 21 minuter på 1,8 m och 22 minuter på 2,2 m. Efter kl. 18 började lokala medelåldern jämnas ut sig mellan mätpunkterna, vid ca. 18–19 minuter, bortsett från på 2,2 m där den uppgick till 20–60 minuter.

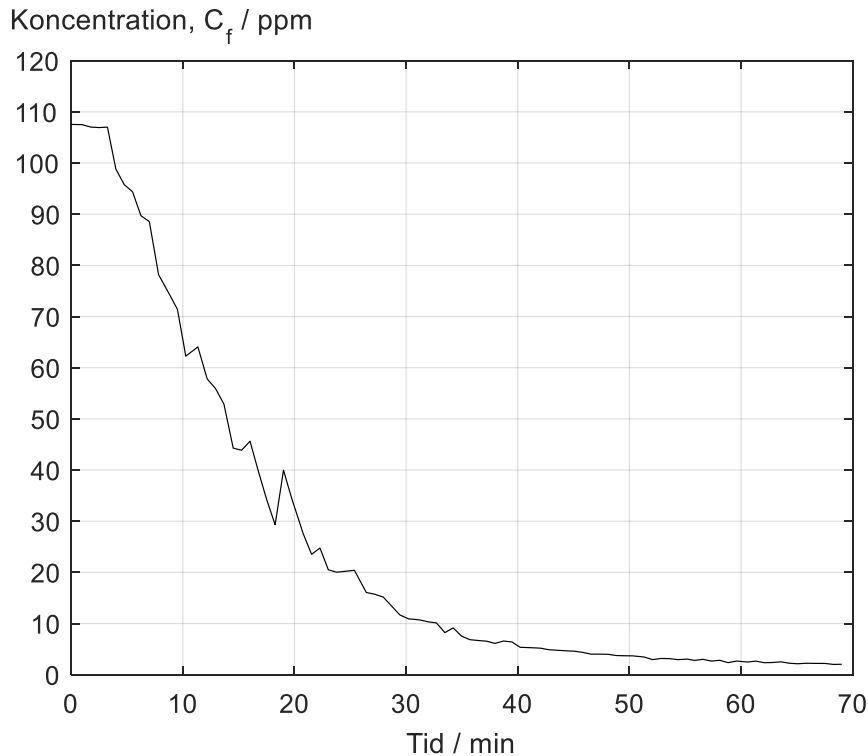
Lokal medelålder / min



Figur 30: Lokal medelålder vid deplacerande ventilation och variabel värmeeffekt

4.1.5 Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med låg värmeeffekt och deplacerande ventilation redovisas i Figur 31. Vid mätning var belysning, dator och personsimulator igång, vilka tillsammans gav värmeeffekten 213 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var ca. 107,6 ppm. Mätningen avbröts efter 69 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 2,04 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 1871,62 min·ppm respektive 29 165,34 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 31: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och deplacerande ventilation

Med avklingningskurvas totala area och moment kända kunde sedan ekvation (11), (12) och (13) användas för att beräkna medelkoncentration i rumsluft, lokal medelålder i frånluft och rumsluftens medelålder.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 107,55 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 1871,62 = 132,2 \text{ ppm} \quad (13)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{1871,62}{107,55} = 17,40 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{29\,165,34}{1871,62} = 15,58 \text{ min} \quad (15)$$

Med dessa mått bestämda användes till sist ekvation (3), (4), (5) och (6) för att beräkna ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid samt luftutbyteseffektivitet.

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{132,2 \cdot 10^{-6}} = 0,810 = 81,0 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 2 \cdot 15,58 = 31,16 \text{ min} \quad (6)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{31,16} = 0,454 = 45,4 \% \quad (7)$$

Om uteluftsflödet eller rummets volym var okänt eller osäkra kunde det faktum att nominella tidskonstanten är samma som lokal medelålder i frånluften utnyttjas. Nominella tidskonstanten beräknades då enligt ekvation (5).

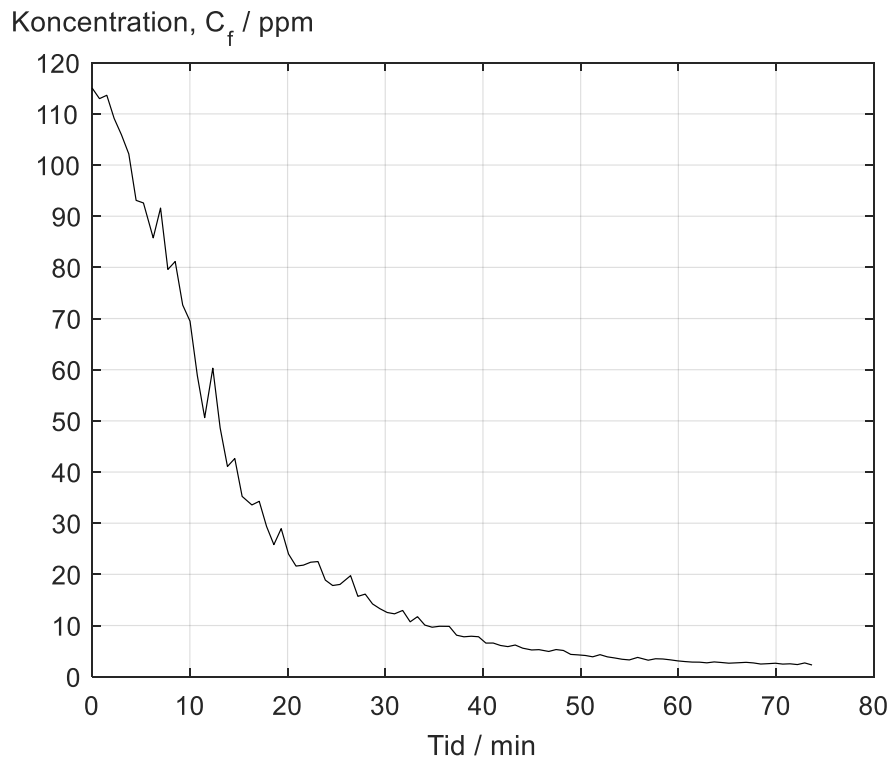
$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 17,40 \text{ min} \quad (5)$$

En ny luftutbyteseffektivitet kunde beräknas enligt ekvation (7).

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{17,40}{31,16} = 0,558 = 55,8 \% \quad (7)$$

4.1.6 Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med hög värmeeffekt och deplacerande ventilation redovisas i Figur 32. Vid mätningen var belysning, dator, personsimulator och solsimulator igång, dvs. värmeeffekten var 363 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var 115,05 ppm. Mätningen avbröts efter ca. 75 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 2,28 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 1914,53 min·ppm respektive 36 215,34 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 32: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och deplacerande ventilation

Med avklingningskurvas totala area och moment kända beräknades medelkoncentration i rumsluft, lokal medelålder i frånluft, rumsluftens medelålder, ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 115,05 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 1914,53 = 135,2 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{1914,53}{115,05} = 16,64 \text{ min} \quad (13)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{36\,215,34}{1914,53} = 18,92 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{135,2 \cdot 10^{-6}} = 0,792 = 79,2 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 2 \cdot 18,92 = 37,84 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{37,84} = 0,374 = 37,4 \% \quad (6)$$

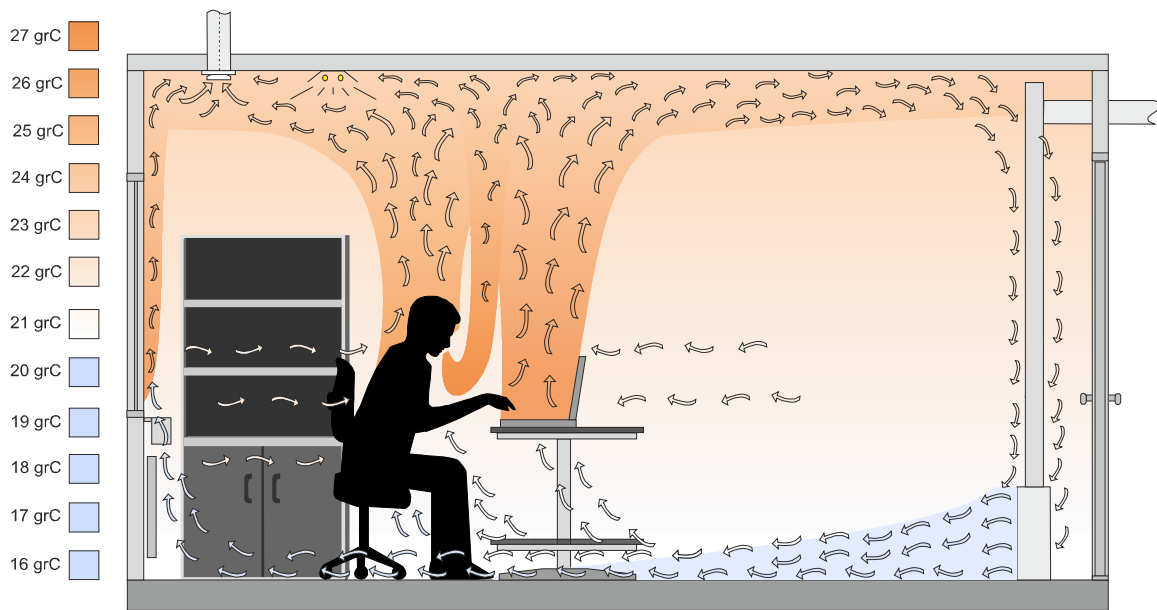
Om luftens lokala medelålder i frånluften användes istället för nominella tidskonstanten erhöles luftutbyteseffektivitet enligt ekvation (7).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 15,81 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{16,64}{37,84} = 0,440 = 44,0 \% \quad (7)$$

4.1.7 Röktest

Resultat från röktest på det deplacerande ventilationssystemet redovisas i Figur 33. En tydlig strömning från tilluftsdon bort mot personsimulator kunde ses. Vid personsimulator och dator steg sedan röken upp mot taket. Den del av röken som strömmade förbi personsimulatorens nådde den bortsida väggen och steg därifrån upp mot solinstrålningssimulatorens. En del av röken värmdes av solinstrålningssimulatorens och steg mot taket och evakuerades i frånluften. Den andra delen strömmade tillbaka mot personsimulatorens. En tydlig tillbakaströmning i taknivå kunde ses. Det vill säga att ungefär hälften av konvektionströmmarna från dator och personsimulator nådde taket och strömmade tillbaka mot väggen där tilluftsdonet var placerat. Där sjönk sedan röken ner mot tilluftsdonet och medejekterades i tilluften.

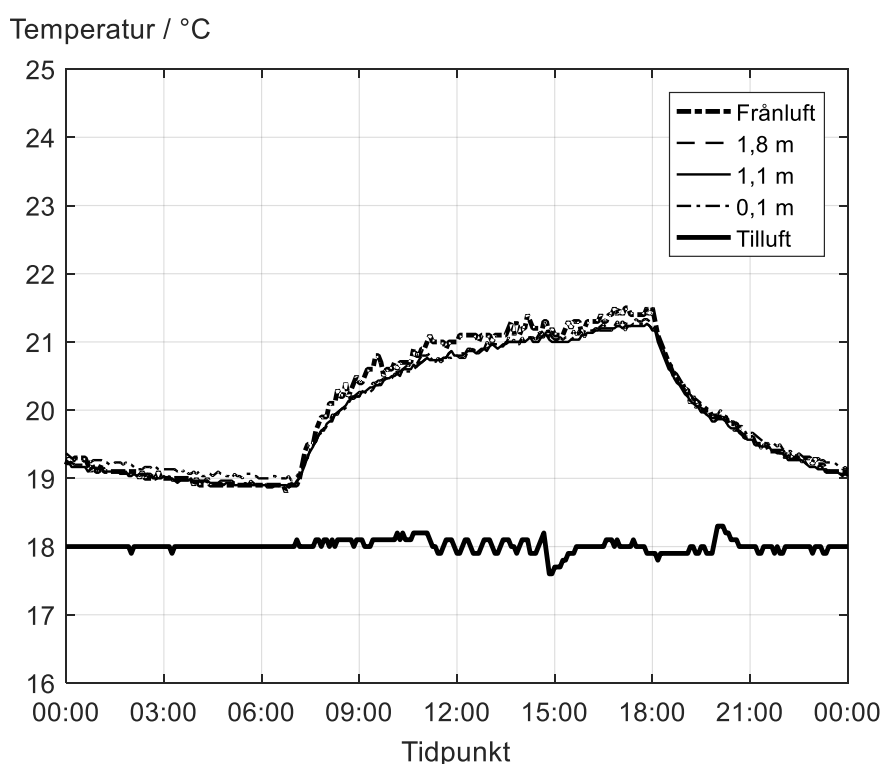


Figur 33: Luftströmning i försöksrummet vid deplacerande ventilation

4.2 Omblandande ventilation

4.2.1 Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt

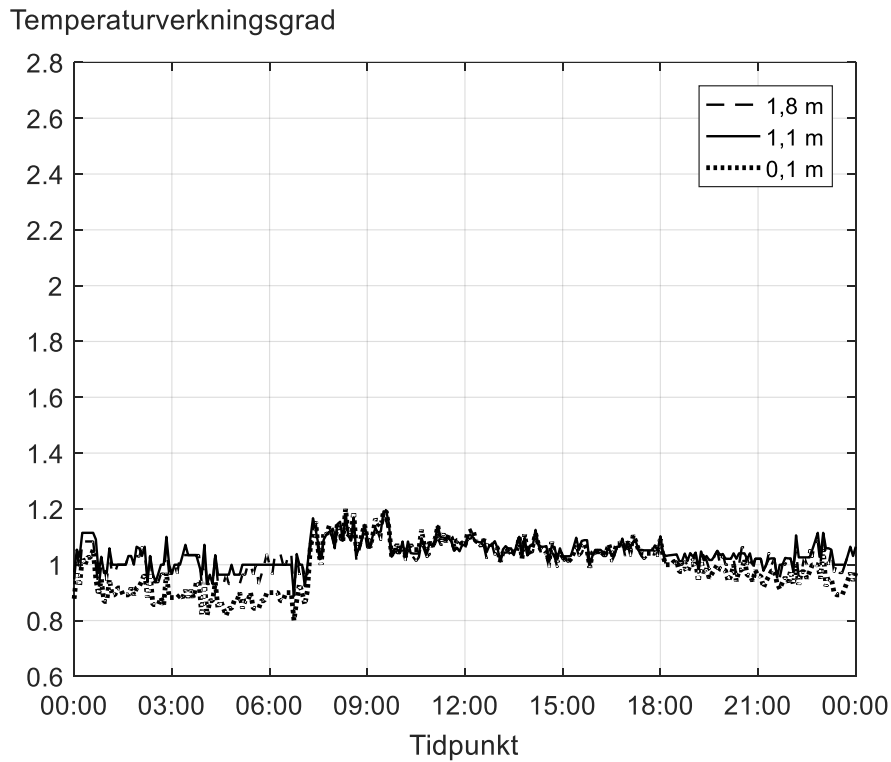
Lufttemperatur i försöksrum samt till- och frånluftstemperatur vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt redovisas i Figur 34. Lufttemperaturen uppgick till ca. 19 °C överallt i rummet fram till kl. 07. Efter kl. 07 ökade temperaturen i samtliga mätpunkter fram till kl. 18. Lufttemperaturen uppgick då till 21,3 °C på 0,1 m, i andningszonen, och på 1,8 m. I frånluften var temperaturen lite högre, 21,5 °C. Kl. 14:50 sjönk tilluftstemperaturen till 17,6 °C men ingen markant ändring av rumstemperaturen kunde ses på grund av detta. Kl. 20 ökade tilluftstemperaturen till 18,3 °C och samtidigt syntes en liten höjning av lufttemperaturen. När mätningen avslutades kl. 24 uppgick temperaturen till ca. 19,1 °C i alla mätpunkter. Kl. 17:45 uppgick den maximala lufttemperaturen på 0,1 m, i andningszonen och på 1,8 m till 21,3 °C. I frånluften var den 21,5 °C kl. 17:50. Eftersom temperaturen i försöksrummet vara samma i alla mätpunkter erhöles ingen vertikal temperaturgradient.



Figur 34: Lufttemperatur i försöksrum vid konstant värmeeffekt och omblandande ventilation

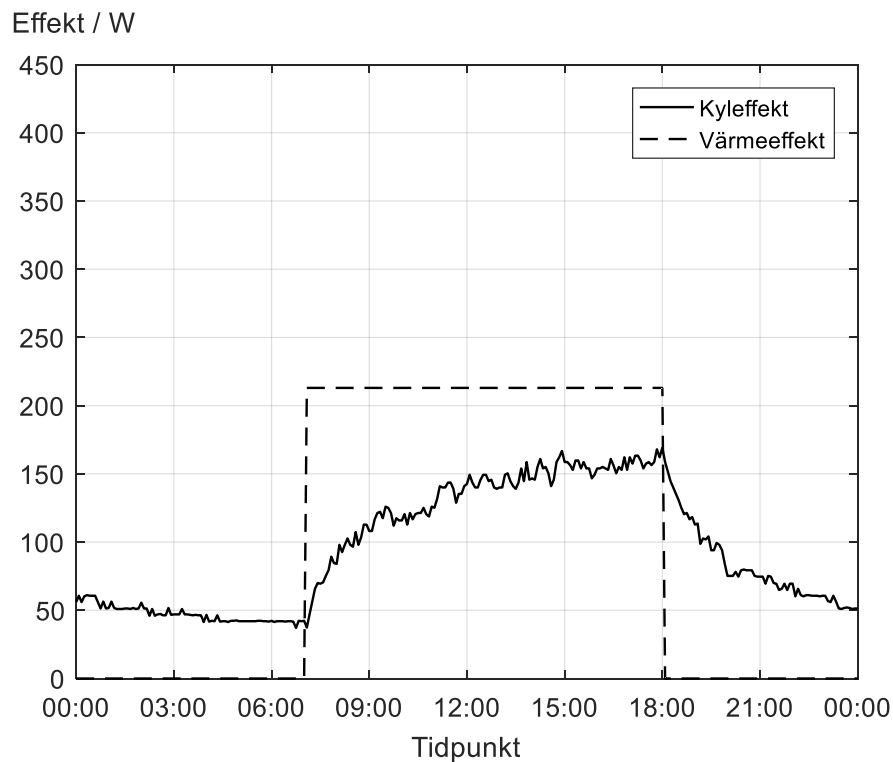
Enligt Figur 34 hölls tilluftstemperaturen inom $18 \pm 0,5$ °C. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,3 och 20,3 °C enligt bilaga 5 och höll sig därmed inom gränserna. Enligt bilaga 5 var till- och frånluftsflödet under dygnet 38,1–39,4 l/s respektive 37,5–39,7 l/s.

Temperaturverkningsgrad under samma tidsperiod redovisas i Figur 35. Initialt uppgick temperaturverkningsgraden till ca. 0,9 på höjden 0,1 m. I andningszonen och på 1,8 m var den ca. 1,0. Kl. 07–18 var verkningsgraden mycket jämn på alla höjder och uppgick då till ungefär 1,1. Efter kl. 18 sjönk verkningsgraden vid 0,1 m till ca. 0,9 och vid dygnets slut var temperaturverkningsgraden 0,9 på 0,1 m och 1,0 i andningszonen samt på 1,8 m. Kl. 08:20 erhöles den maximala verkningsgraden 1,2 på samtliga höjder.



Figur 35: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid konstant värmeeffekt och omblandande ventilation

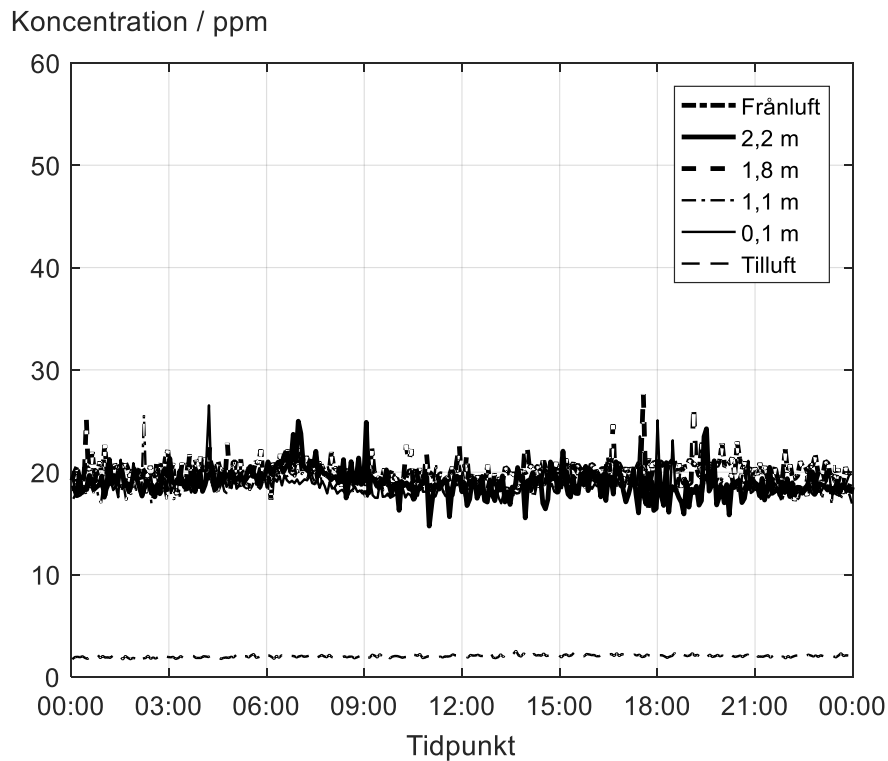
I Figur 36 redovisas kyl- och värmeeffekten. I början av dygnet uppgick kyleffekten till 56,0 W. Kl. 07 startade värmekällorna och då var kyleffekten 42,3 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten, vilket den gjorde ända fram tills kl. 18 då det maximala värdet 169,2 W erhöles. Då värmekällorna stängdes av sjönk kyleffekten och kl. 24 uppgick kyleffekten till 51,3 W. Alltså sjönk den till en lägre nivå än vad den var på i början av dygnet. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 213,0 W. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet var 97,3 respektive 95,1 W. Det tillfördes alltså 2,2 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 97,7 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 36: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt

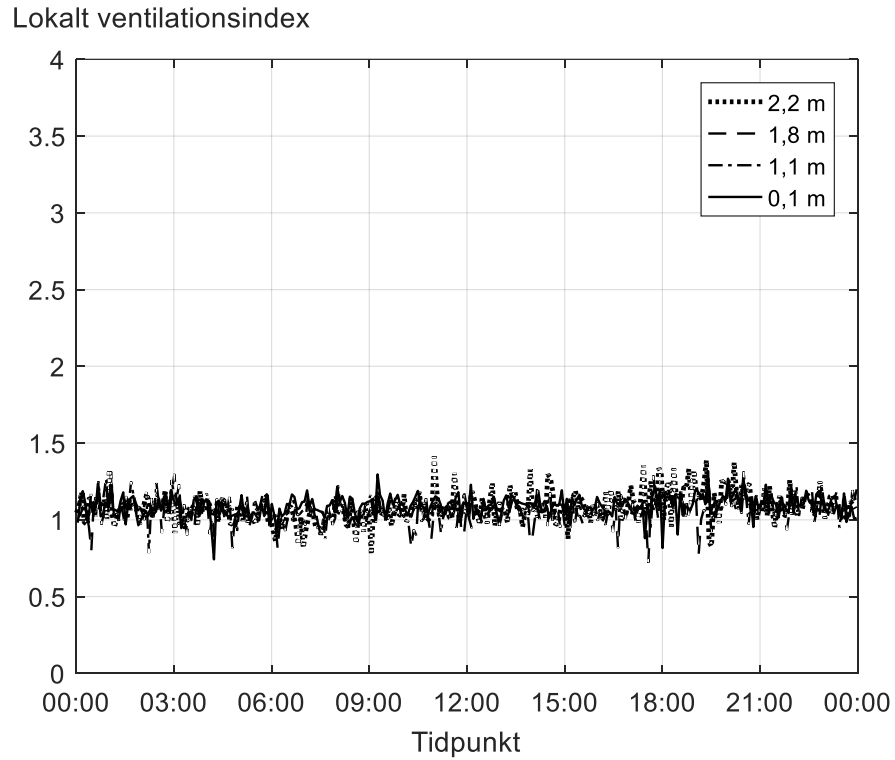
4.2.2 Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 37. Koncentrationen i tilluften var inte riktigt 0 vilket antagligen berodde på spårgasanalyserns nollpunktsdrift. Spårgaskoncentrationen i samtliga kanaler, förutom tilluften var mycket jämn och varierade mellan ca. 18 och 22 ppm fram till kl. 17:30. Kl. 17:30–19:45 varierade koncentrationen aningen mer, ca. 17–24 ppm. Därefter fram till kl. 24 erhöles återigen en jämn koncentration med låg variation, ca. 17–20 ppm mellan alla kanaler förutom frånluften. I slutet av dygnet uppgick spårgaskoncentrationen i frånluften till ca. 19–23 ppm, alltså lite högre än i övriga mätkanaler



Figur 37: Spårgaskoncentration vid omlandande ventilation och konstant värmeeffekt

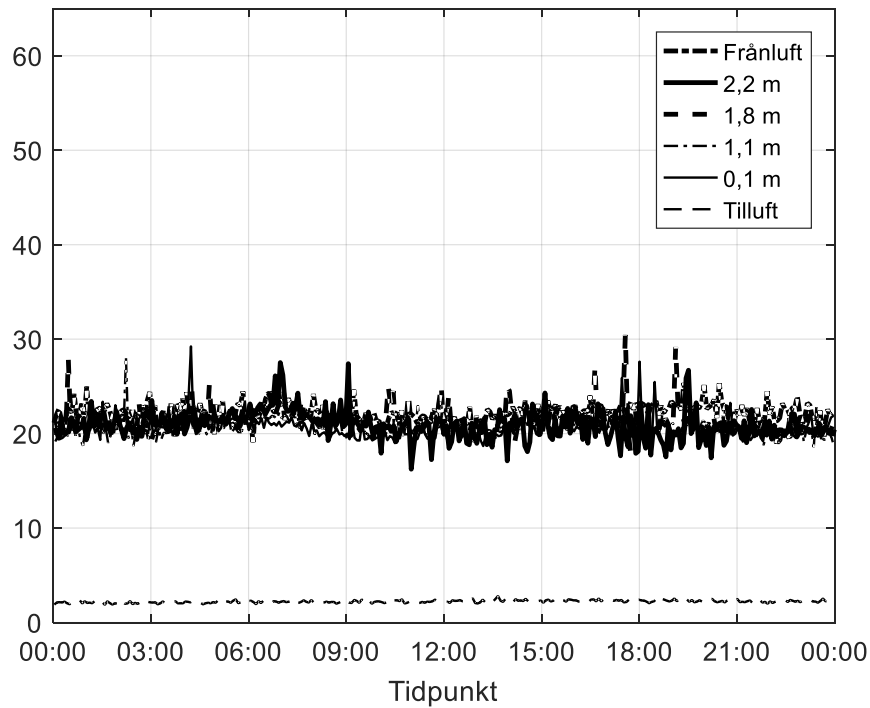
Variation av lokalt ventilationsindex under dygnet i respektive mätkanal redovisas i Figur 38. Det var under dygnet mycket liten spridning mellan de olika kanalerna. Fram till kl. 17:30 varierade det lokala ventilationsindexet ungefär runt 0,9–1,2 för alla kanalerna. Kl. 17:30–20:30 ökade indexet en aning och låg då runt $1,15 \pm 0,1$ för att sedan sjunka till samma nivå som tidigare under mätningen.



Figur 38: Lokalt ventilationsindex vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt

Lokal medelålder för respektive mätkanal redovisas i Figur 39. Ungefär samma medelålder erhöles i alla kanaler under dygnet. Fram till kl. 06:30 varierade medelåldern mellan 19 och 23 minuter, följt av en kort period på ungefär 1 timme, då medelåldern uppgick till ca. 21–25 minuter. Därefter sjönk medelåldern tillbaka till utgångsläget och låg där ungefär till kl. 17:15. Mellan kl. 17:15 och 19:45 erhöles en större variation av den lokala medelåldern, ca. 17,5–27 minuter. Detta gällde enbart mätkanalerna på 0,1, 1,8 samt 2,2 m. Från kl. 17:30 till 24:00 kunde en liten ökning av medelåldern i frånluften synas. Under slutdelen av mätningen minskade den lokala medelåldern i övriga mätkanaler och låg då runt 20 minuter.

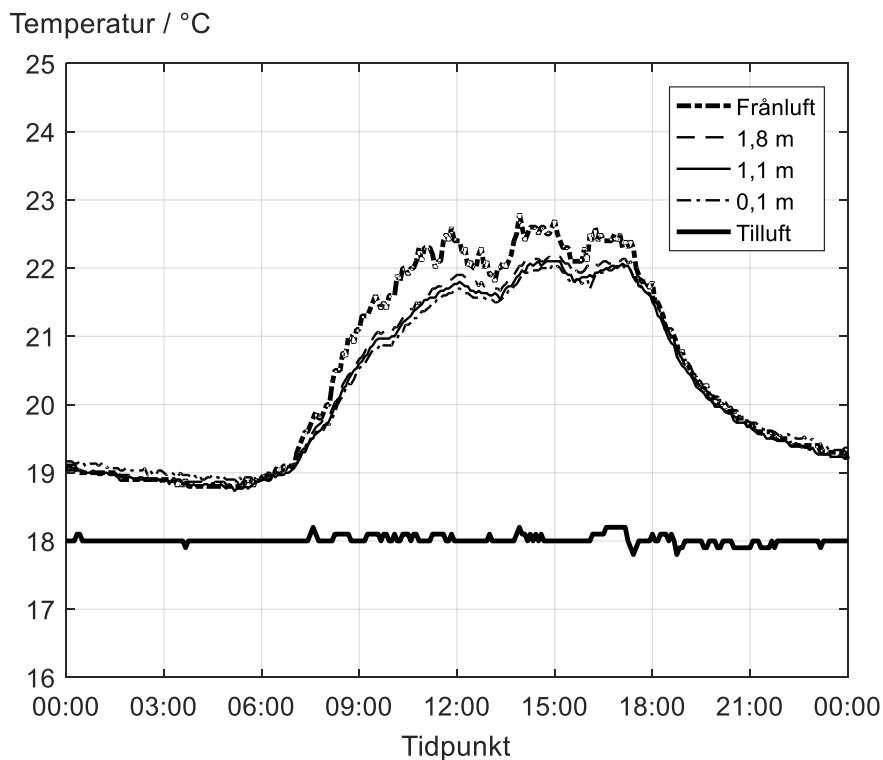
Lokal medelålder / min



Figur 39: Lokal medelålder vid omblandande ventilation och konstant värmeeffekt

4.2.3 Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt

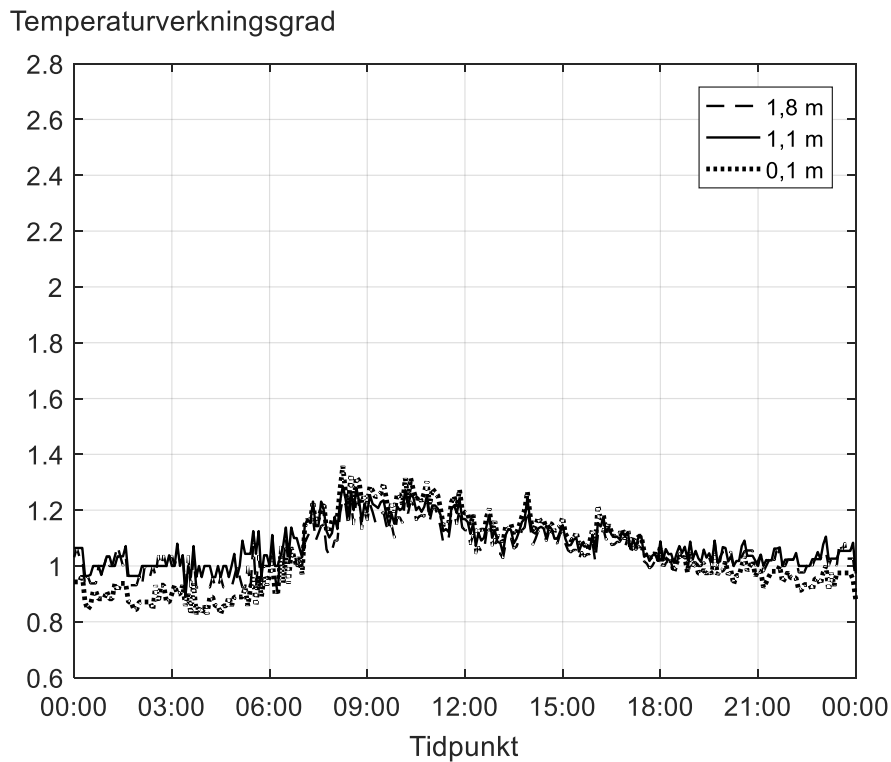
Lufttemperatur i försöksrum samt till- och frånluftstemperatur vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt redovisas i Figur 40. I början på dygnet innan värmekällorna startades var lufttemperaturen väldigt jämna i hela rummet. Temperaturen uppgick då till 19,0–19,1 °C i andningszonen, på 1,8 m och i frånluften. På 0,1 m var temperaturen lite högre, 19,2 °C. Fram till kl. 05 hade temperaturerna sjunkit till 18,7–18,9 °C. Mellan kl. 05 och 15 ökade samtliga temperaturer. På 0,1 m, i andningszonen samt på 1,8 m erhöles temperaturerna 22,0, 22,1 och 22,2 °C. I frånluften erhöles en högre temperatur vilken uppmättes till 22,7 °C. Efter kl. 17:20 började lufttemperaturerna sjunka och kl. 24 hade de sänkts till 19,4 °C på 0,1 m och 19,2 °C i andningszonen, på 1,8 m samt i frånluften. Kl. 11:50–13:55 och 15:00–16:05 kunde tydliga minskningar av lufttemperaturen ses. Under dessa perioder var personsimulatorens avstängd. Tilluftstemperaturen under dygnet varierade mellan 17,8 och 18,2 °C. Frånluften erhöles sin högsta temperatur, 22,8 °C kl. 13:55. Kl. 15:05 var temperaturen som högst på 0,1 m, i andningszonen och på 1,8 m. Då uppgick temperaturen på respektive höjd till 22,0, 22,1 och 22,2 °C. Med andra ord var den vertikala temperaturgradienten mycket liten, endast 0,2 °C.



Figur 40: Lufttemperatur i försöksrum vid variabel värmeeffekt och omblandande ventilation

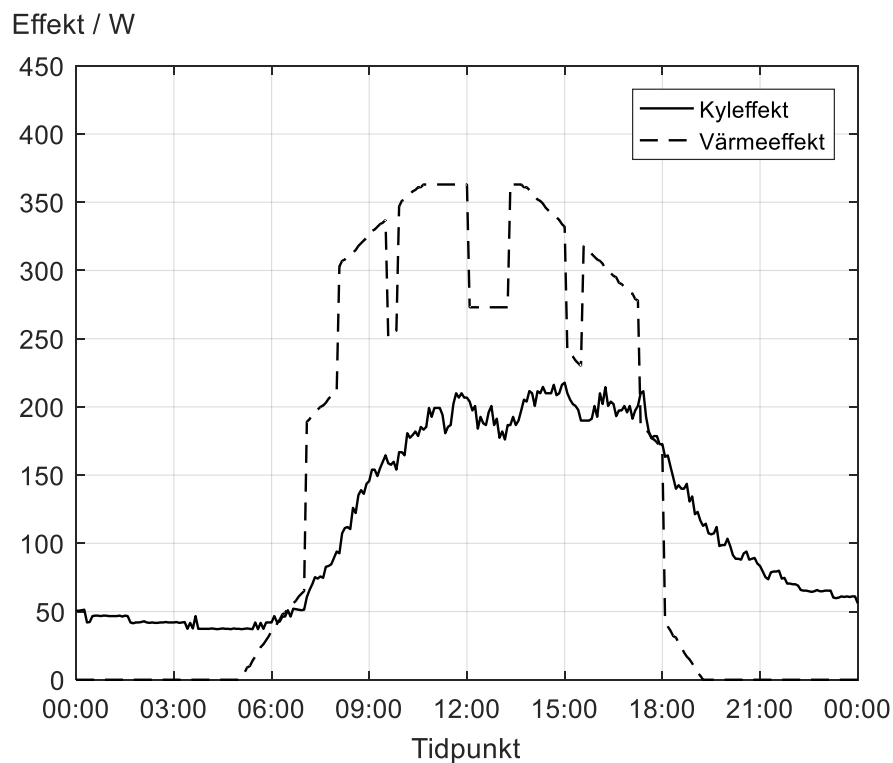
Enligt Figur 40 höll tilluftstemperaturen $18 \pm 0,5$ °C under hela mätningen. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,0 och 19,8 °C enligt bilaga 5 och höll sig därmed inom gränserna. Till- och frånluftsflödet redovisas i bilaga 5. Tilluftsflödet under hela dygnet var 38,1–39,7 l/s. Kl. 00–08 var frånluftsflödet var 38,9–40,0 l/s. Under resterande del av mätningen var det 38,6–39,7 l/s.

Temperaturverkningsgrad för de olika höjderna redovisas i Figur 41. I början av mätningen fram till kl. 06 uppgick temperaturverkningsgraden till ca. 0,83–0,96 på 0,1m, 0,89–1,08 i andningszonen samt 0,90–1,07 på höjden 1,8 m. Kl. 06–09 ökade verkningsgraden på alla höjder. Under denna period erhöles respektive höjd maximala verkningsgrad, 1,36 på 0,1 m, 1,29 i andningszonen och 1,24 på 1,8 m. De största värdena erhöles kl. 08:15. Därefter sjönk verkningsgraderna sakta under dagen ner mot 1,05 vid kl. 18. Sett över arbetsdagen var temperaturverkningsgraden ca. 1,1 på alla höjder. Efter kl. 18 planade temperaturverkningsgraderna ut och i andningszonen samt på 1,8 meter varierade de mellan ca. 0,98 och 1,09 fram till kl. 24. På 0,1 m var verkningsgraden lägre, ca. 0,91–1,00.



Figur 41: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och omblandande ventilation

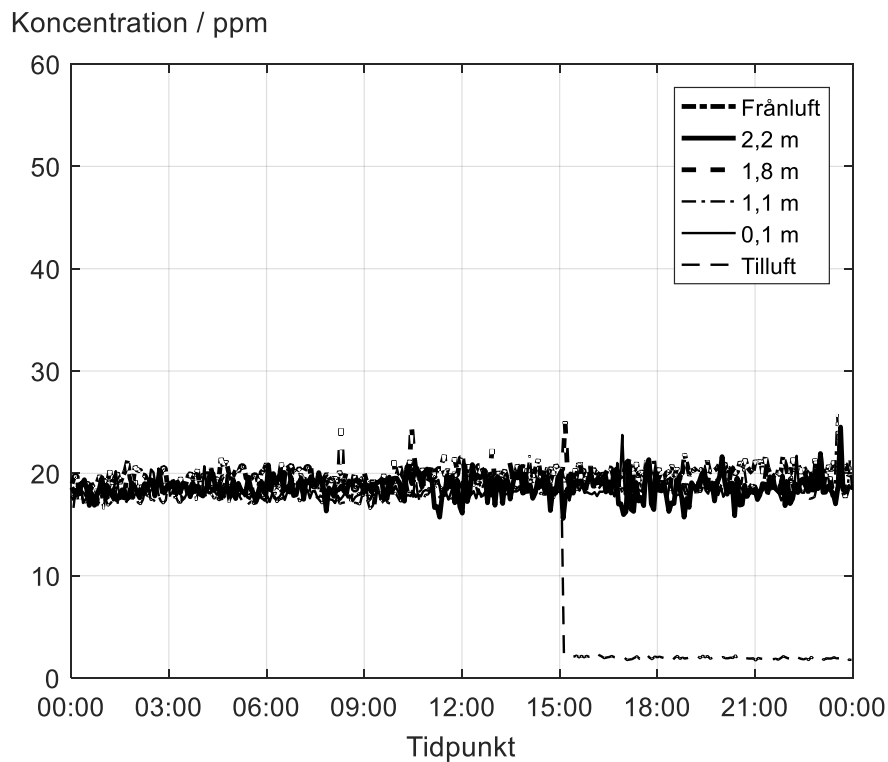
I Figur 42 redovisas kyl- och värmeeffekten. I början av mätningen var kyleffekten 50,6 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten markant fram tills kl. 11:50. Därefter planade kyleffekten ut och fram till kl. 17:25 varierade kyleffekten mellan ca. 180,0 och 215,0 W. Kl. 17:25–24:00 minskade kyleffekten och sjönk till slutvärdet 56,0 W. Alltså sjönk den inte till samma nivå som den var vid dygnets början. Under mätningen kunde fyra tydliga dalar av kyleffekten synas. Kyleffekten sjönk kl. 11:20 till 180,7 W, 13:10 till 176,1 W, 15:30 till 190,0 W och 16:35 till 193,2 W. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 363,0 W. Kyleffektens maxvärde var 217,8 W och det inträffade kl. 15. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet var 140,3 respektive 115,2 W. Med andra ord tillfördes det 25,1 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 82,3 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 42: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt

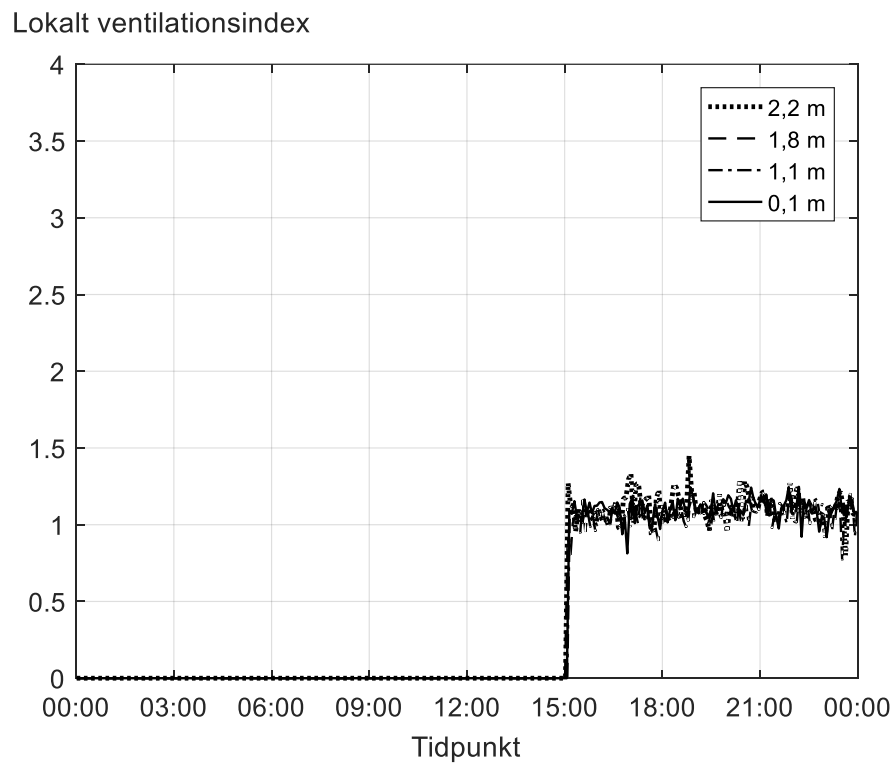
4.2.4 Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 43. Fram till kl. 06 var koncentrationen i alla kanaler förutom frånluften ca. 17–19 ppm med liten variation. I frånluften var koncentrationen högre, ungefär 19–21 ppm. Mellan kl. 06 och 18 kunde inte någon större skillnad ses mellan mätkanalerna. Koncentrationen under denna period var ca. 17–21 ppm. Efter kl. 18 sjönk koncentrationen ner till ca. 17–19 ppm igen, bortsett från på 2,2 m och i frånluften. På 2,2 m varierade koncentrationen mer, ca. 16–21 ppm. Samtidigt ökade koncentrationen i frånluften och var då 20–22 ppm. Tyvärr hade mätkanalen i tilluften ramlat ur donet i början av mätningen fram till kl. 15. Därför redovisar tilluftskanalen en mycket högre koncentration än den borde göra. Efter kl. 15 syntes vilken koncentration av spårgas som tilluften verkligen hade.



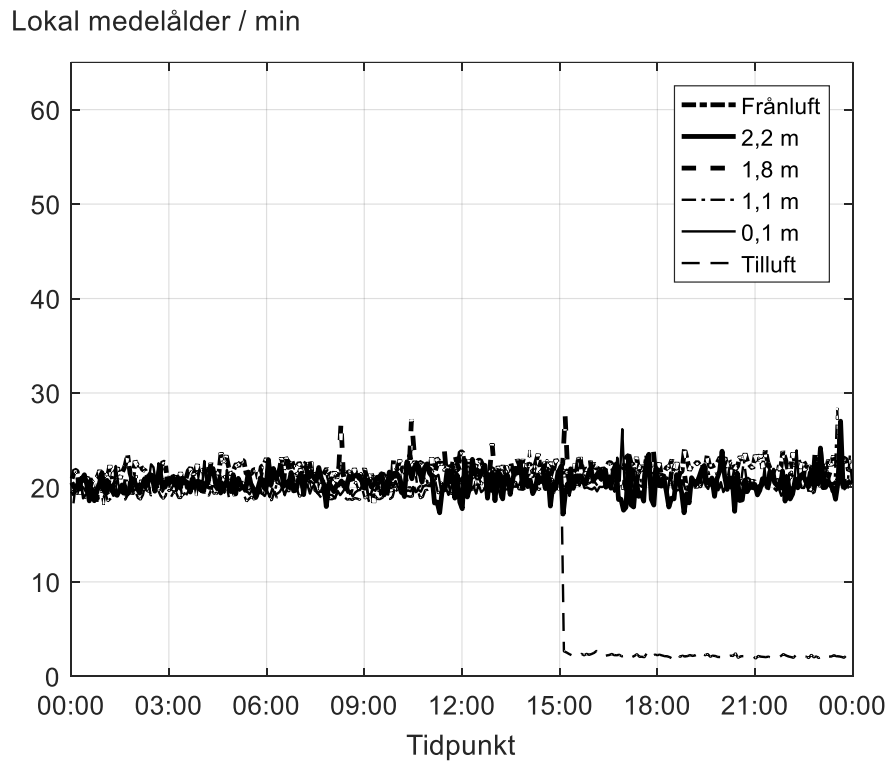
Figur 43: Spårgaskoncentration vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt

Resultat från beräkning av lokalt ventilationsindex redovisas i Figur 44. Eftersom mätkanalen i tilluften vid spårgasmätningen inte var korrekt placerad förrän kl. 15, redovisas endast värden på lokalt ventilationsindex efter denna tidpunkt. Kl. 15–18 var variationen av ventilationsindexet 0,81–1,18 på 0,1 m, 0,92–1,12 i andningszonen, 0,89–1,20.



Figur 44: Lokalt ventilationsindex vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt

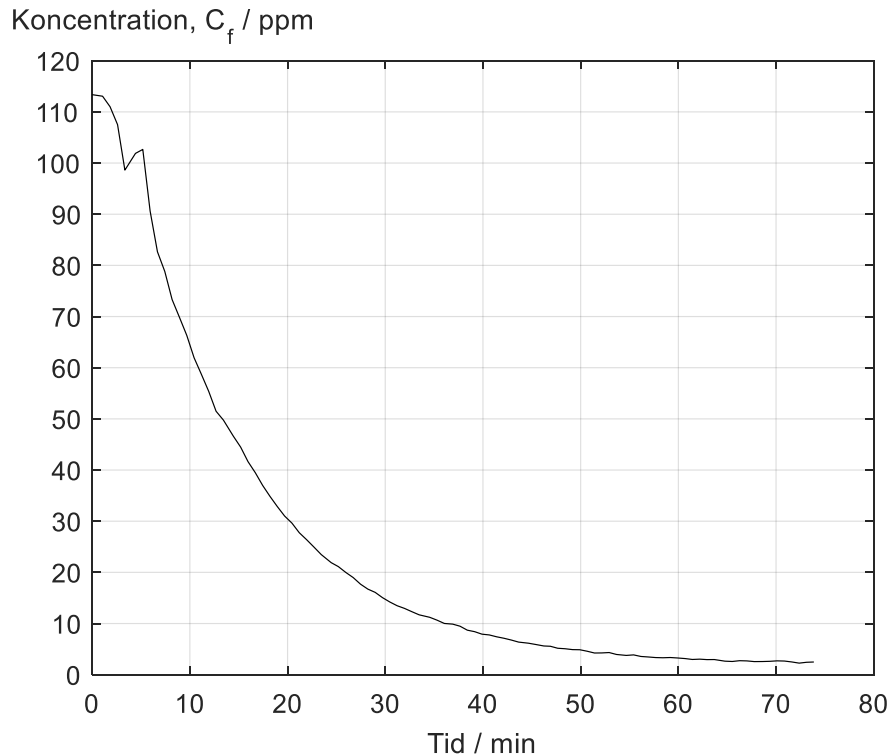
Resultat från beräkning av lokal medelålder redovisas i Figur 45. Fram till kl. 06 var medelåldern i alla punkter ungefär samma, runt 19–20 minuter, förutom i frånluften där den lokala medelåldern var ca. 22 minuter. Efter kl. 06 fram till k. 18 var medelåldern ungefär samma i alla mätkanaler. Dock var spridningen större ca. 18–23 minuter. Efter kl. 19 minskade spridningen och i alla mätkanaler, förutom frånluften, var den lokala medelåldern ca. 19–21. I frånluften var medelåldern högre, ca. 22–24 minuter.



Figur 45: Lokal medelålder vid omblandande ventilation och variabel värmeeffekt

4.2.5 Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation redovisas i Figur 46. Vid mätningen var belysning, dator och personsimulator igång, dvs. värmeeffekten var 213 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var 113,37 ppm. Mätningen avbröts efter ca. 75 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 2,48 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 1941,93 min·ppm respektive 37 435,44 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 46: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och omblandande ventilation

Med avklingningskurvas totala area och moment kända beräknades medelkoncentration i rumsluften, lokal medelålder i frånluft, rumsluftens medelålder ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 113,37 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 1943,80 = 137,3 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{1941,93}{113,37} = 17,13 \text{ min} \quad (13)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{37\,435,44}{1941,93} = 19,28 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{137,3 \cdot 10^{-6}} = 0,780 = 78,0 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 19,28 = 38,56 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{38,56} = 0,365 = 36,7 \% \quad (6)$$

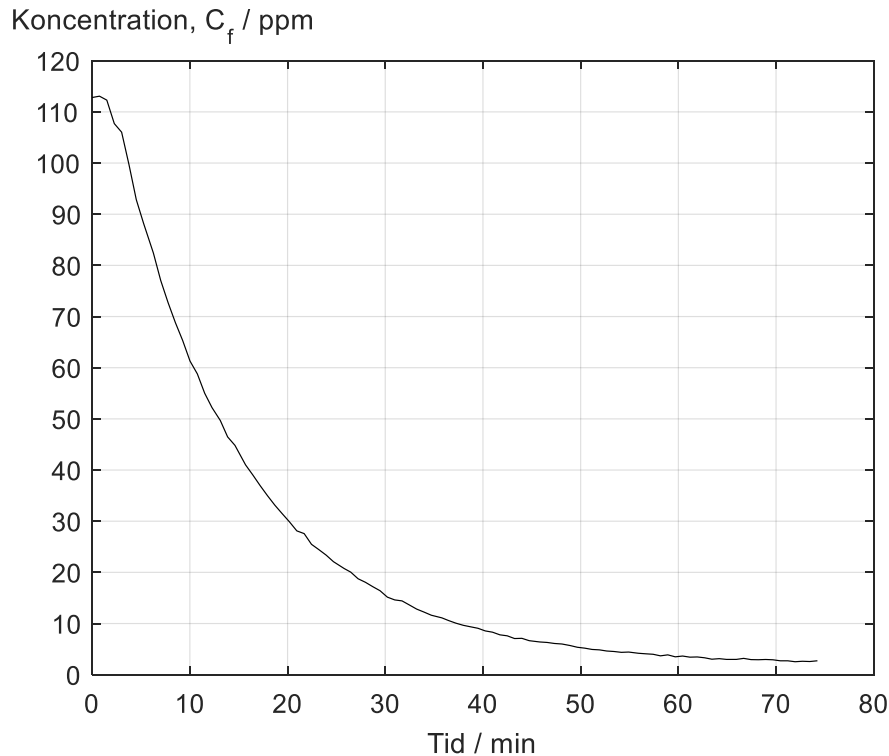
Om luftens lokala medelålder i frånluften användes istället för nominella tidskonstanten erhöles luftutbyteseffektivitet enligt ekvation (7).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 17,13 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{17,13}{38,56} = 0,442 = 44,4 \% \quad (7)$$

4.2.6 Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation redovisas i Figur 47. Vid mätningen var belysning, dator, personsimulator och solsimulator igång, dvs. värmeeffekten var 363 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var 112,8 ppm. Mätningen avbröts efter ca. 75 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 2,72 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 1985,15 min·ppm respektive 40 281,54 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 47: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation

Med avklingningskurvas totala area och moment kända beräknades medelkoncentration i rumsluft, lokal medelålder i frånluft, rumsluftens medelålder ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 112,81 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 1985,15 = 140,2 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{1985,15}{112,81} = 17,60 \text{ min} \quad (13)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{40\,281,54}{1985,15} = 20,29 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{140,2 \cdot 10^{-6}} = 0,764 = 76,4 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 2 \cdot 20,29 = 40,58 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{40,58} = 0,349 = 34,9 \% \quad (6)$$

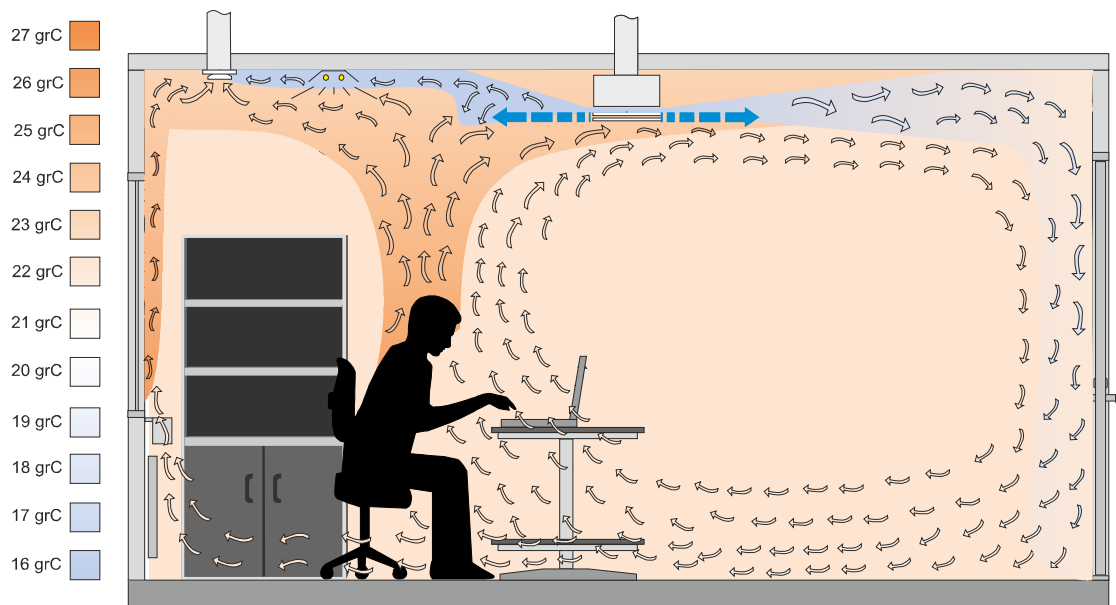
Om luftens lokala medelålder i frånluften användes istället för nominella tidskonstanten erhöles luftutbyteseffektivitet enligt ekvation (7).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 17,60 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{17,60}{40,58} = 0,434 = 43,4 \% \quad (7)$$

4.2.7 Röktest

Resultat från röktest på det omblandande ventilationssystemet redovisas i Figur 48. I den högra delen av rummet, dvs. mot dörren, kunde en tydlig omblandning av röken ses. Röken strömmade från tilluftsdon bort mot väggen. Där böjde den av och föll ner mot golvet. Vid golvet vände röken och strömmade tillbaka mot personsimulatorens och datorns. Vid personsimulator och dator steg sedan en del av röken tillbaka mot tilluftsdonet och medejekterades i tilluften. Den delen av röken som inte steg vid personsimulatorens fortsatte istället mot väggen. Där steg den, värmdes upp av solinstrålningssimulatorens och fortsatte upp mot taket där röken evakuerades i frånluftsdonet. I den vänstra delen av rummet var omblandningen dålig. Där krockade tilluftsströmmen med konvektionsströmmen från personsimulatorens. Hela tilluftsströmmen klarade inte av att strömma förbi konvektionsströmmen och böjde därför av nedåt och tillbaka mot den högra delen av rummet. Den delen av röken som trängde förbi konvektionsströmmen klistrades mot taket med Coanda-effekten och strömmade direkt till frånluftsdonet och evakuerades.

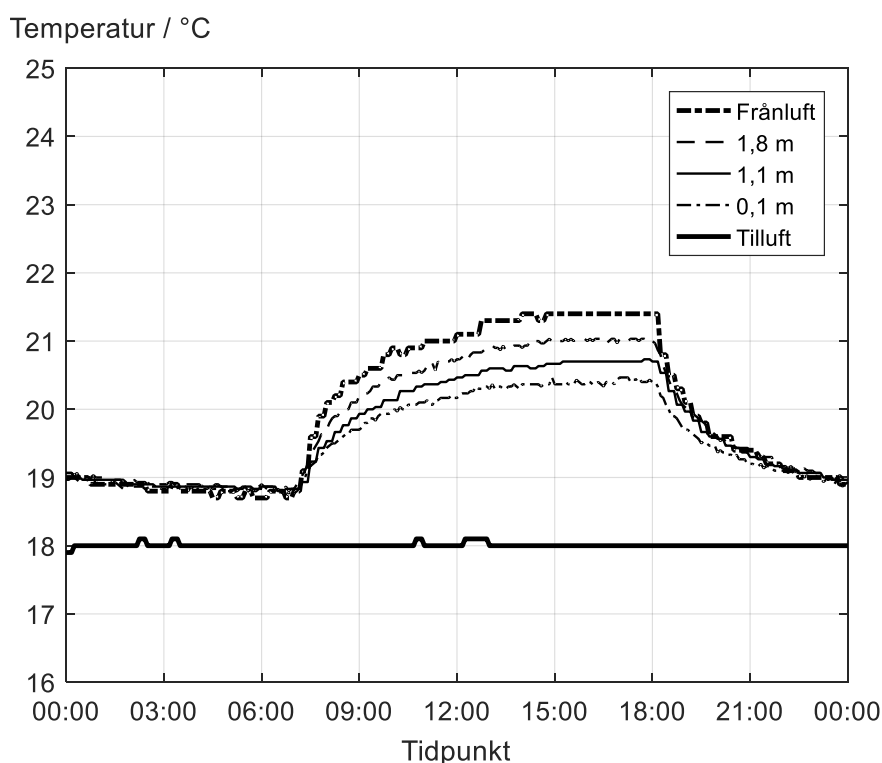


Figur 48: Luftströmning i försöksrummet vid omblandande ventilation

4.3 Utjämnande ventilation

4.3.1 Lufttemperaturmätning med konstant värmeeffekt

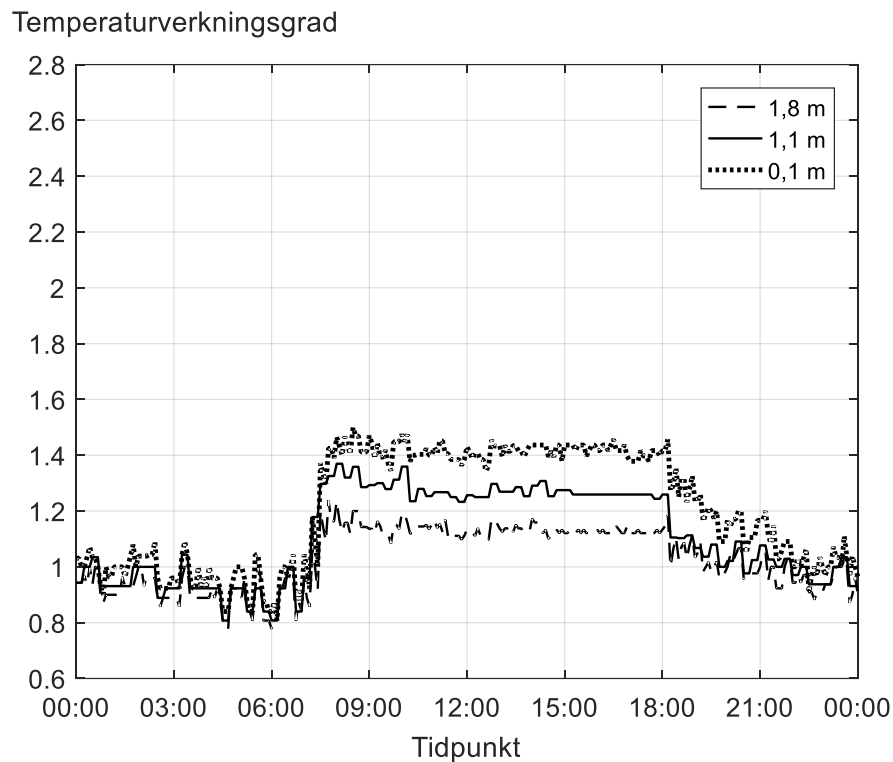
Lufttemperatur i försöksrum samt till- och frånluftstemperatur vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt redovisas i Figur 49. Vid mätningens start var temperaturen överallt i försöksrummet mycket jämn, ca. 19,0 °C. Därefter sjönk temperaturen en aning på alla höjder och kl. 07 uppgick temperaturen till 18,8 °C. Efter kl. 07 ökade temperaturen i samtliga mätpunkter. På 0,1 m och i frånluften ökade temperaturen fram till kl. 13:50, då erhöles de maximala temperaturerna, 20,5 respektive 21,4 °C. I andningszonen ökade temperaturen fram till kl. 15:15 och den högsta erhållna temperaturen var då 20,7 °C. På 1,8 m ökade lufttemperaturen fram till kl. 14:20 och den maximala temperaturen var då 21,0 °C. Fram till kl. 18 var temperaturerna på respektive mätställe konstanta. Kl. 18 började temperaturen sjunka och när mätningen avslutades kl. 24 uppgick den till ca. 19,0 °C på 0,1 m, i andningszonen, på 1,8 m samt i frånluften. Under hela mätningen varierade tilluftstemperaturen mellan 18,0 °C och 18,1 °C. Den vertikala temperaturgradienten begränsades och var under arbetsdagen ungefär 0,7 °C.



Figur 49: Lufttemperatur i försöksrum med konstant värmeeffekt och utjämnande ventilation

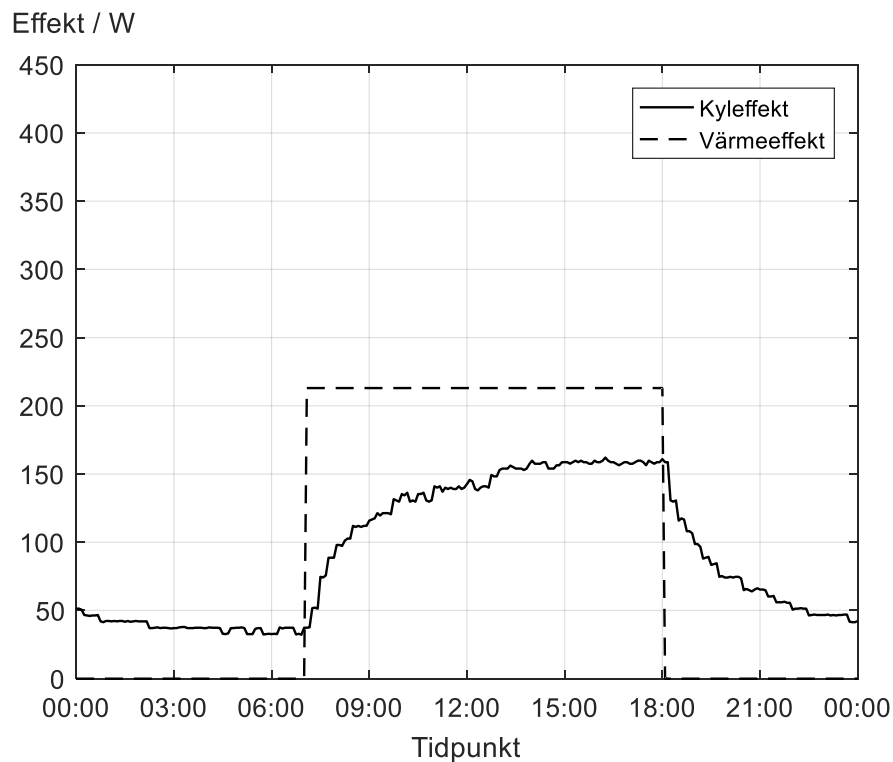
Enligt Figur 49 hölls tilluftstemperaturen inom $18 \pm 0,5$ °C. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,0 och 19,6 °C enligt bilaga 5 och höll sig därmed inom gränserna. Enligt bilaga 5 var till- och frånluftsfloödet under dygnet 38,0–39,4 l/s respektive 38,9–40,0 l/s.

Temperaturverkningsgrad under samma tidsperiod redovisas i Figur 50. Initialt uppgick temperaturverkningsgraden till ca. 1,03 på höjden 0,1 m. I andningszonen och på 1,8 m var den ca. 0,94. Verkningsgradernas variation i början av mätningen var relativt stor och på 0,1 m fram till kl. 07 var den 0,81–1,09. I andningszonen samt på 1,8 m var variationen 0,81–1,04 respektive 0,78–1,00 under samma tidsperiod. Kl. 07–18 ökade verkningsgraderna, samtidigt minskade variationen och på 0,1 m erhöles 1,34–1,50, i andningszonen 1,23–1,37 och på 1,8 m 1,08–1,24. Efter kl. 18 sjönk temperaturverkningsgraderna och i slutet av mätningen uppgick de till 0,96 på 0,1 m, 0,93 i andningszonen och 0,9 på 1,8 m.



Figur 50: Temperaturverkningsgrad i försöksrum med konstant värmeeffekt och utjämnande ventilation

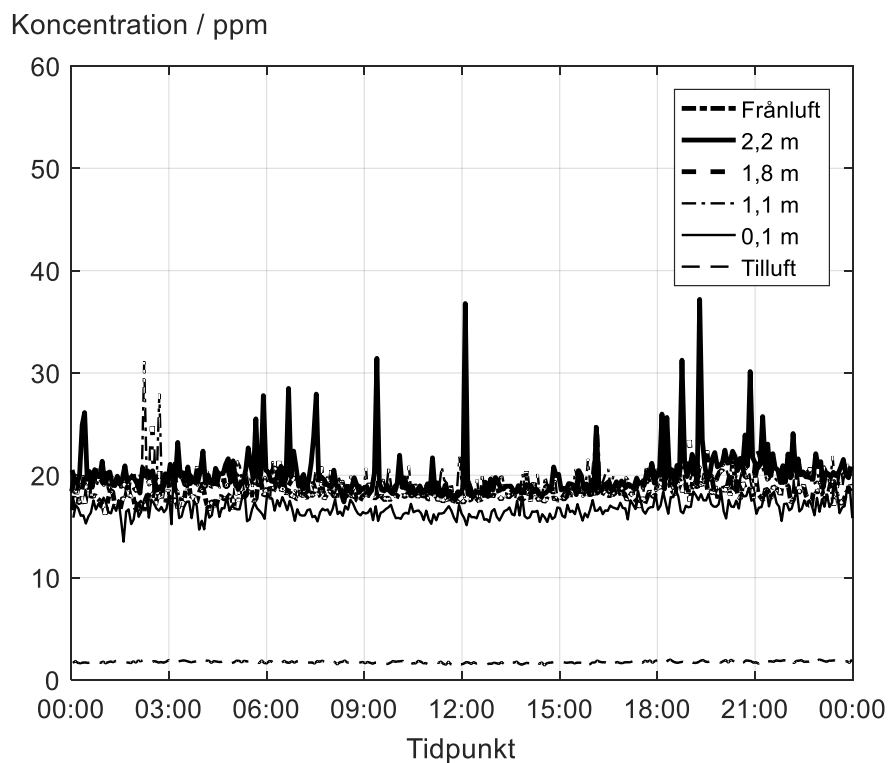
I Figur 51 redovisas kyl- och värmeeffekten. I början av dygnet var kyleffekten ca. 51,3 W. Innan värmekällorna startades kl. 07 hade den sjunkit till ungefär 37,3 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten, vilket den gjorde ända fram till kl. 15. Därefter planade den ut och fram till kl. 18:10 varierade kyleffekten mellan ca. 156,4 och 162,1 W. Efter kl. 18:10 sjönk kyleffekten fram tills mätningen avslutades kl. 24, då var kyleffekten 42,3 W. Alltså sjönk den till en lägre nivå än vad den var i början av dygnet. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 213,0 W. Kyleffektens maxvärde var 162,1 W och det inträffade kl. 16:15. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet var 97,3 respektive 91,6 W. Det tillfördes alltså 5,7 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 94,2 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 51: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt

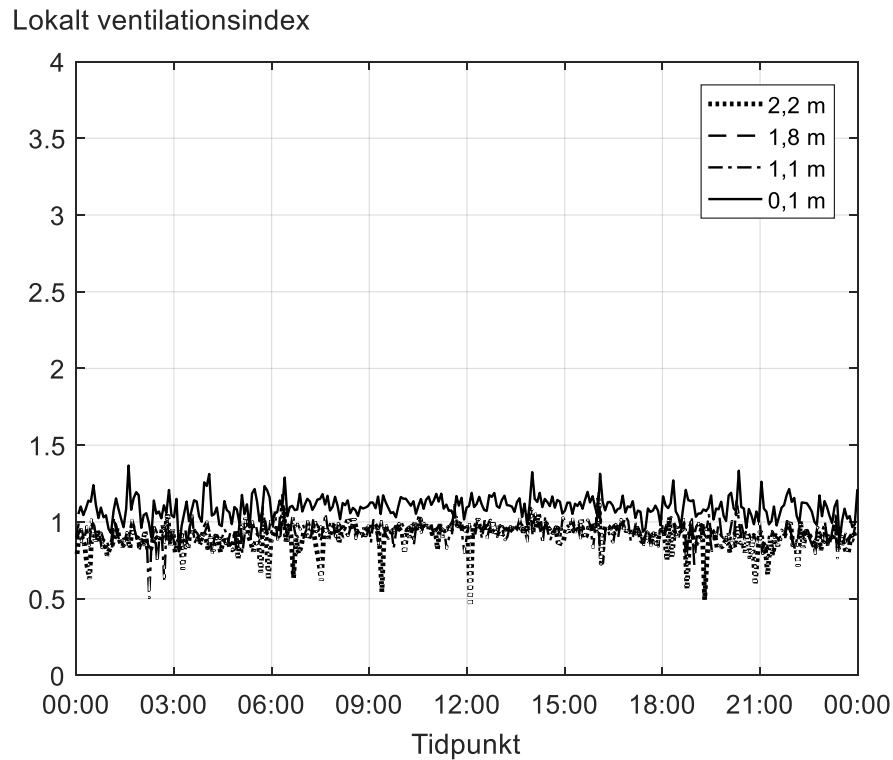
4.3.2 Homogenspridningsmetoden med konstant värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 52. Koncentrationen i tilluften var inte riktigt 0 vilket antagligen berodde på spårgasanalyserns nollpunktsdrift. Kl. 00–06 erhöles lite större variation av koncentrationen i mätkanalerna. Om de högsta topparna av koncentrationen försummas var variationen på 0,1 m 14–18 ppm, i andningszonen 18–22, på 1,8 m 18–23, 2,2 m och 18–24 i frånluften 16–20. Mellan 06–18 var koncentrationen på 0,1 m 15–18 ppm och på övriga mätställen 18–21 ppm. Efter kl. 18 fram till mätningens slut varierade koncentrationerna återigen mer. På 0,1 m erhöles koncentrationen 16–19 ppm, i andningszonen samt på 1,8 m 19–22 ppm, på 2,2 m 19–24 ppm och i frånluften 17–21 ppm.



Figur 52: Spårgaskoncentration vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt

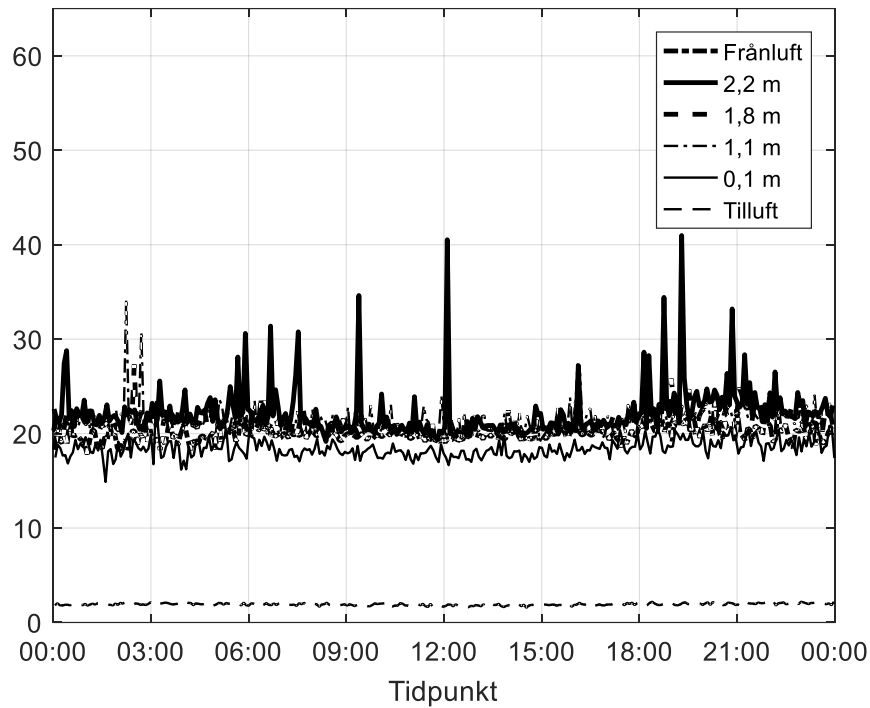
Variation av lokalt ventilationsindex under dygnet i respektive mätkanal redovisas i Figur 53. På 0,1 m varierade indexet under dagen mellan ca. 0,96 och 1,23. De lägsta och högsta värdena under mätningen var 0,90 respektive 1,33. I övriga mätpunkter var ventilationsindexet ungefär samma, dock var variationen i andningszonen och på 2,2 m större. I andningszonen erhöles variationen 0,50–1,18, på 1,8 m 0,72–1,11 och på 2,2 m 0,45–1,15. Om de största och minsta värdena försumrades var det lokala ventilationsindexet ca. 0,93–1,20 på 0,1 m och 0,76–1,11 i de övriga kanalerna.



Figur 53: Lokalt ventilationsindex vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt

Lokal medelålder för respektive mätkanal redovisas i Figur 54. Alla kanaler följde samma mönster. I början av mätningen fram till kl. 06 var variationerna relativt stora. Kl. 06–18 jämnade kurvorna ut sig med färre toppar. Om ingen hänsyn till de högsta topparna togs, var lokala medelåldern på 0,1 m ca. 16,7–20,4 min, i andningszonen 19,1–24,1 min, på 1,8 m 19,2–23,5 min, på 2,2 m 19,2–24,2 min och i frånluften 18,6–23,6 min. Efter kl. 18 fram till mätningen avslutades ökade medelåldern i samtliga mätkanaler förutom frånluften. På 0,1 m var lokala medelåldern då 17,1–21,2 min, i andningszonen 20,6–24,3 min, på 1,8 m 20,1–24,9, på 2,2 m 20,5–26,5 min och i frånluften 18,4–22,5 min.

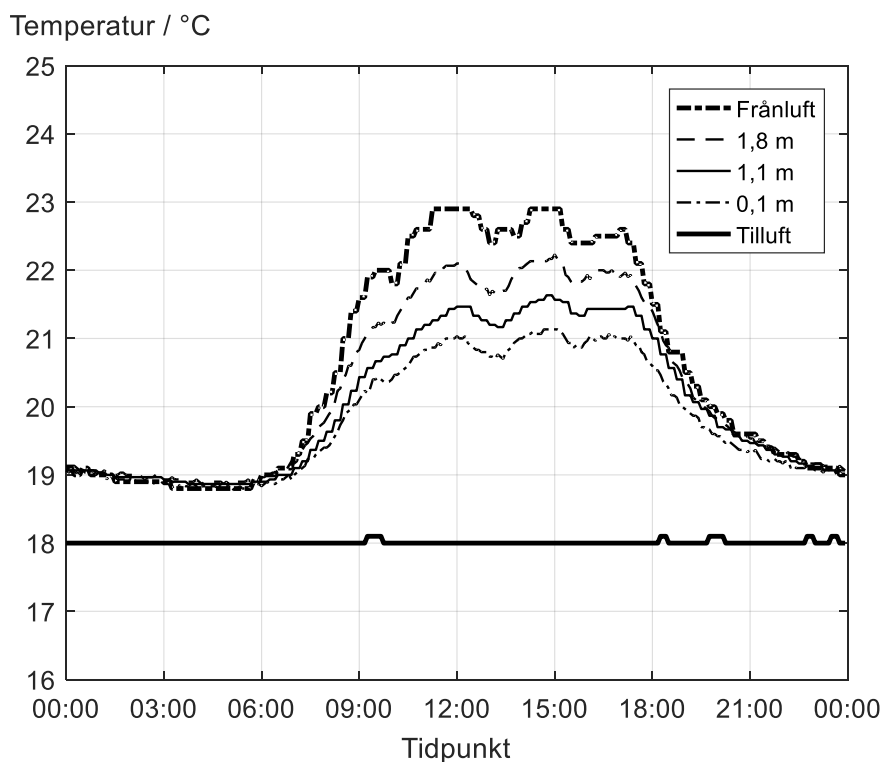
Lokal medelålder / min



Figur 54: Lokal medelålder vid utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt

4.3.3 Lufttemperaturmätning med variabel värmeeffekt

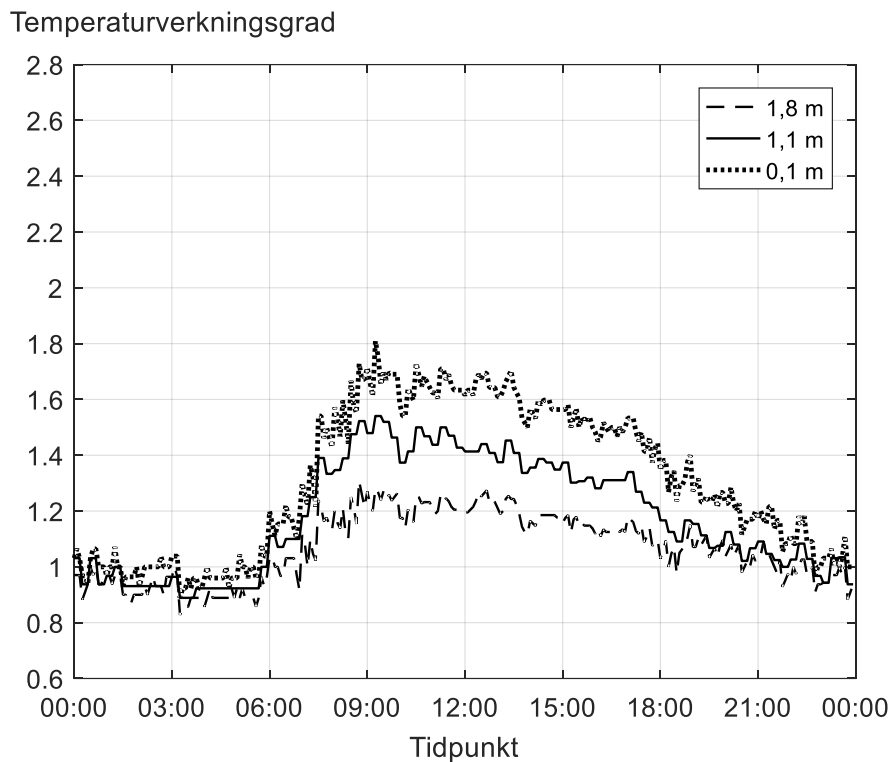
Lufttemperatur i försöksrum vid utjämnande ventilation och variabla värmelaster redovisas i Figur 55. I början på dygnet innan värmekällorna startades var lufttemperaturen väldigt jämna i hela rummet, ca. 19,1 °C. Kl. 05 startades solsimulatorens men initialt var värmeeffekten mycket låg och därför syntes ingen ökning av temperaturen. När övriga värmekällor startades kl. 07–08 syntes en tydlig temperaturökning. Fram till kl. 12 ökade temperaturen till 21,0 °C på 0,1 meter, 21,5 °C i andningszonen, 22,1 °C på 1,8 meter och 22,9 °C i frånluften. Kl. 12:00–13:30 var personsimulatorens avstängd vilket medförde att lufttemperaturen i försöksrummet sjönk under denna period. Då personsimulatorens startades igen ökade lufttemperaturen fram till kl. 15. Då var temperaturen 21,1 °C på 0,1 m, 21,6 °C i andningszonen, 22,2 °C på 1,8 m och 22,9 °C i frånluften. Även kl. 15:00–15:30 var personsimulatorens avstängd och en likadan temperaturminskning följt av en ökning kunde ses. Därefter sjönk lufttemperaturen fram till kl. 24 då mätningen avslutades. Temperaturen var då ca 19,0–19,1 °C på alla höjder. Den maximala temperaturen som erhöles var 21,1 °C på 0,1 m, 21,6 °C i andningszonen, 22,2 °C på 1,8 m och 22,9 °C i frånluften. Den vertikala temperaturgradienten under arbetsdagen var som högst ca. 1,1 °C, vilket den var ungefär mellan kl. 11:30 och 17:00. Tilluftstemperaturen under dygnet varierade mellan 18,0 och 18,1 °C.



Figur 55: Lufttemperatur i försöksrum med variabel värmeeffekt och utjämnande ventilation

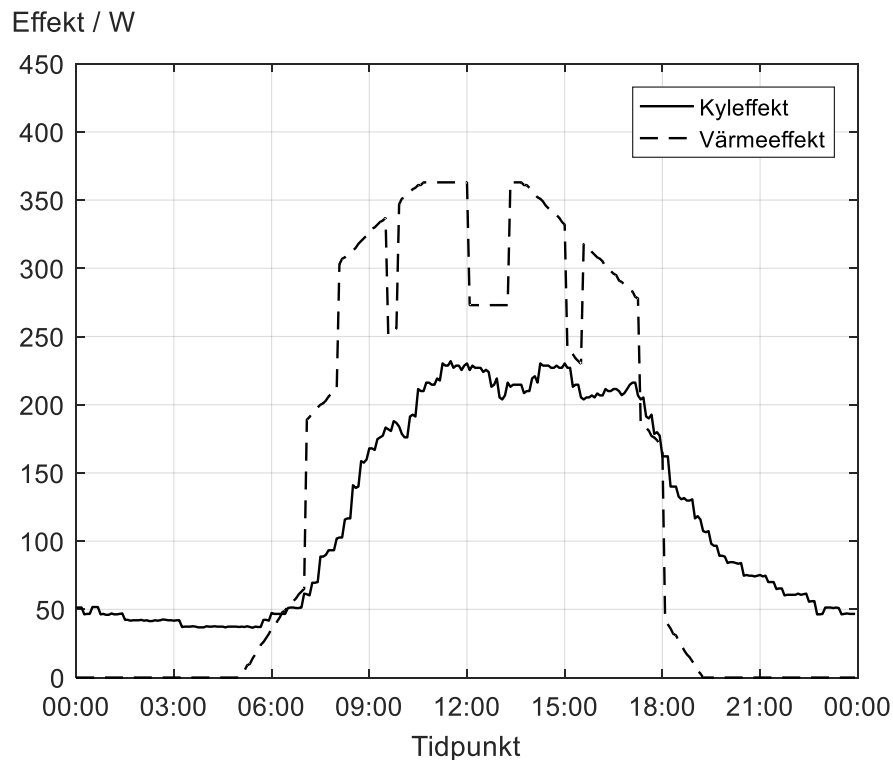
Enligt Figur 55 hölls tilluftstemperaturen inom $18 \pm 0,5$ °C. Temperaturen i rummet utanför försöksrummet varierade mellan 19,1 och 19,4 °C enligt bilaga 5 och höll sig därmed inom gränserna. Till- och frånluftsflödet redovisas i bilaga 5. Tilluftsflödet varierade mellan 38,0–39,7 l/s. Frånluftsflödet var lågt, runt 37,8–38,3 l/s fram tills kl. 13:20. Därefter sjönk flödet till 37,8 l/s för att sedan stiga till 39,7 l/s. Under resterande tid var frånluftsflödet 38,9–39,7 l/s.

Temperaturverkningsgrad för de olika höjderna redovisas i Figur 56. Initialt var temperaturverkningsgraden 1,03 på höjden 0,1 m samt i andningszonen. På 1,8 m var den ca. 0,97. Lite innan kl. 06 kunde en ökning ses och vid kl. 09 nådde verkningsgraderna sina maximala värden, 1,81 på 0,1 m, 1,54 i andningszonen samt 1,31 på 1,8 m. Därefter sjönk verkningsgraderna sakta under dagen ner mot 1,35 på 0,1 m, 1,17 i andningszonen och 1,03 på 1,8 m vid kl. 18. Sett över arbetsdagen var temperaturverkningsgraden ca. 1,6 på 0,1 m, 1,4 i andningszonen och 1,2 på 1,8 m. Efter kl. 18 fortsatte temperaturverkningsgraderna att sjunka och kl. 24 hade de minskat till 1,00 på 0,1 m och 0,94 i andningszonen samt på 1,8 m.



Figur 56: Temperaturverkningsgrad i försöksrum vid variabel värmeeffekt och utjämnande ventilation

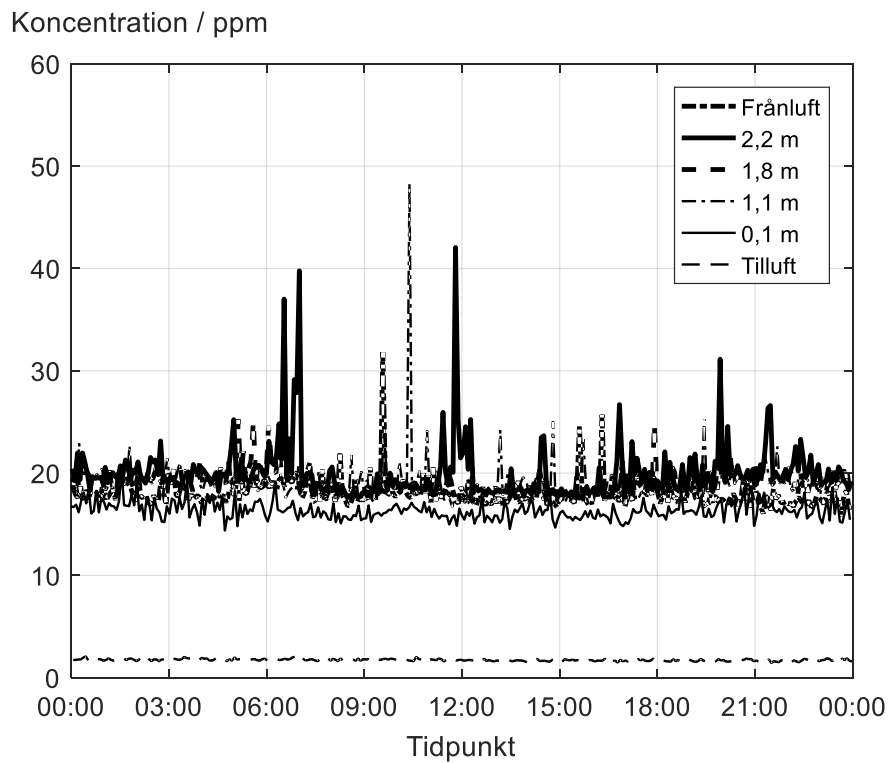
I Figur 57 redovisas kyl- och värmeeffekten. I början av dygnet var kyleffekten 51,3 W. Innan värmekällorna startades hade den sjunkit till ungefär 37,0 W. När värmekällorna startade ökade kyleffekten markant fram tills kl. 10:30. Därefter planade kyleffekten ut och fram till kl. 17:25 varierade den mellan ca. 204 och 230 W. Efter kl. 17:25 började kyleffekten sjunka och kl. 24:00 hade den sjunkit till ca. 46,7 W. Alltså sjönk den till en lägre nivå än vad den var i början av dygnet. Maximal tillförd värmeeffekt under dygnet var 363,0 W. Kyleffektens maxvärde var 231,9 W och det inträffade kl. 11:30. Genomsnittlig värme- och kyleffekt under dygnet var 140,3 respektive 120,2 W. Med andra ord tillfördes det 10,1 W mer än det kylades bort, vilket innebär att ventilationsluften förde bort 85,8 % av den tillförda värmeeffekten.



Figur 57: Kyl- och värmeeffekt i försöksrum vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt

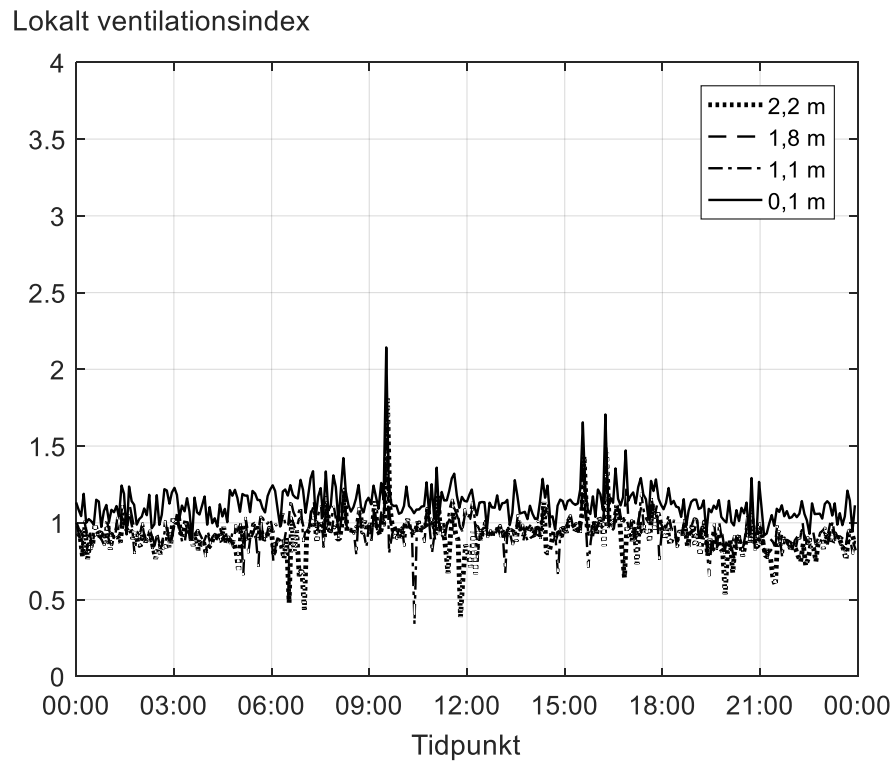
4.3.4 Homogenspridningsmetoden med variabel värmeeffekt

Spårgaskoncentration i de sex mätkanalerna under mätningen redovisas i Figur 58. Koncentrationen på 0,1 m var lägst under hela mätningen och varierade mellan ca. 15 och 19 ppm. Mellan andningszonen, 1,8 samt 2,2 m var koncentrationen mycket jämn med variationen ca. 17–23 ppm. Fram till kl. 06 var variationen i frånluften ungefär 17–20 ppm. Därefter ökade koncentrationen och kl. 06–18 uppgick variationen till ca. 17–22 ppm. Efter kl. 18 sjönk koncentrationen igen till ca. 16–20 ppm. Det kunde även ses några koncentrationstoppar under mätningen som sträckte sig upp emot 27–48 ppm.



Figur 58: Spårgaskoncentration vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt

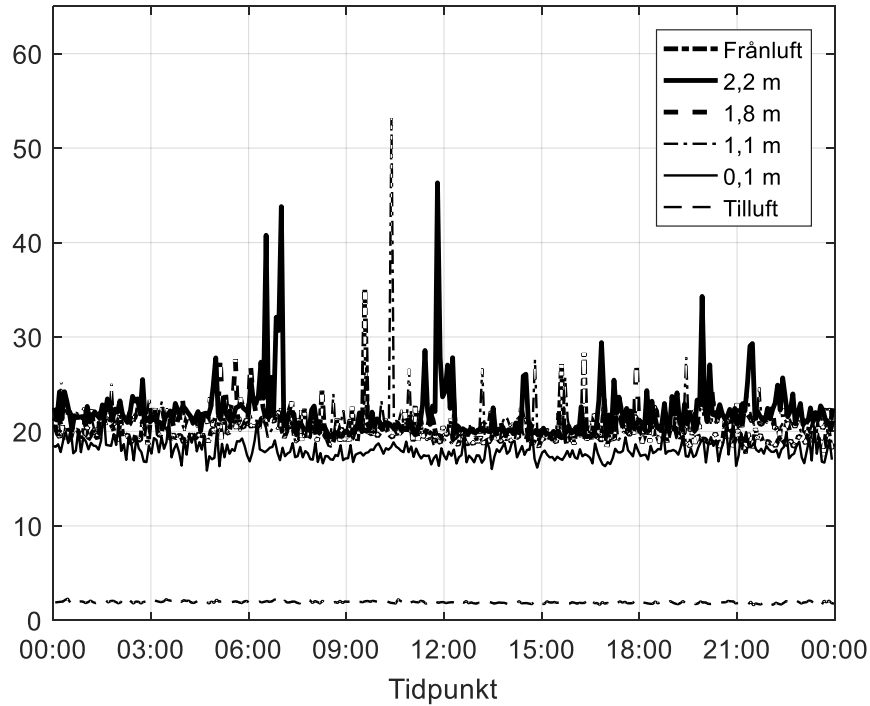
Resultat från beräkning av lokalt ventilationsindex redovisas i Figur 59. Störst värden erhöles på 0,1 m, där varierade ventilationsindexet mellan ca. 0,92 och 1,42. De absolut högsta värdena gick upp emot 1,47–2,14. I andningszonen, på 1,8 samt 2,2 m erhöles i värden under 1,00 stora delar av dygnet. Lokala ventilationsindexet på dessa höjder var ca. 0,65–1,19. De högsta värdena uppgick till 1,39–1,75 och de lägsta 0,34–0,65.



Figur 59: Lokalt ventilationsindex vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt

Resultat från beräkning av lokal medelålder redovisas i Figur 60. Under hela mätningen var variationen av medelåldern på 0,1 m ca. 16–20 min. I andningszonen, på 1,8 samt 2,2 m var variationen större, ca. 19–26 min. Däremot uppgick de högsta topparna till 34–53 min. I frånluften var variationen fram till kl. 06, 19–22 min. Kl. 06–18 varierade den lokala medelåldern mellan 18 och 28 minuter. Efter kl. 18 sjönk medelåldern återigen och variationen uppgick då till 17–22 min.

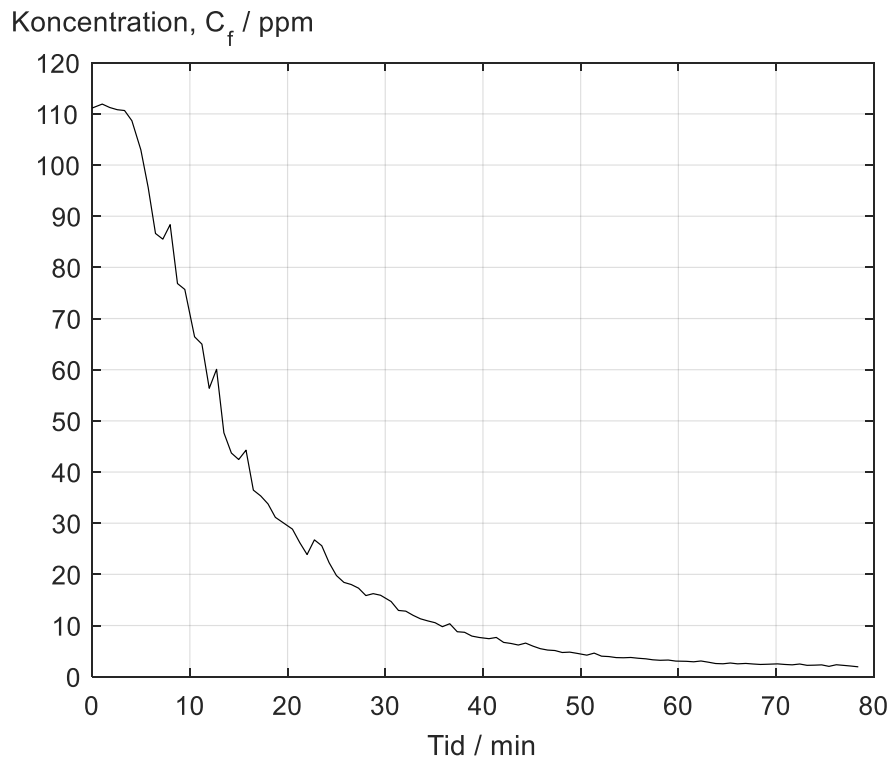
Lokal medelålder / min



Figur 60: Lokal medelålder vid utjämnande ventilation och variabel värmeeffekt

4.3.5 Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation redovisas i Figur 61. Vid mätningen var belysning, dator och personsimulator igång, dvs. värmeeffekten var 213 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var ca. 111,2 ppm. Mätningen avbröts efter ca. 80 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 1,93 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 2009,49 min·ppm respektive 39 718,43 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 61: Avklingningskurva i frånluft med låg värmeeffekt och utjämnande ventilation

Med avklingningskurvas totala area och moment kända beräknades medelkoncentration i rumsluft, lokal medelålder i frånluft, rumsluftens medelålder ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 111,15 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 2009,49 = 141,9 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{2009,49}{111,15} = 18,08 \text{ min} \quad (13)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{39\,718,43}{2009,49} = 19,77 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{141,9 \cdot 10^{-6}} = 0,755 = 75,5 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 19,77 = 39,54 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{39,54} = 0,358 = 35,8 \% \quad (6)$$

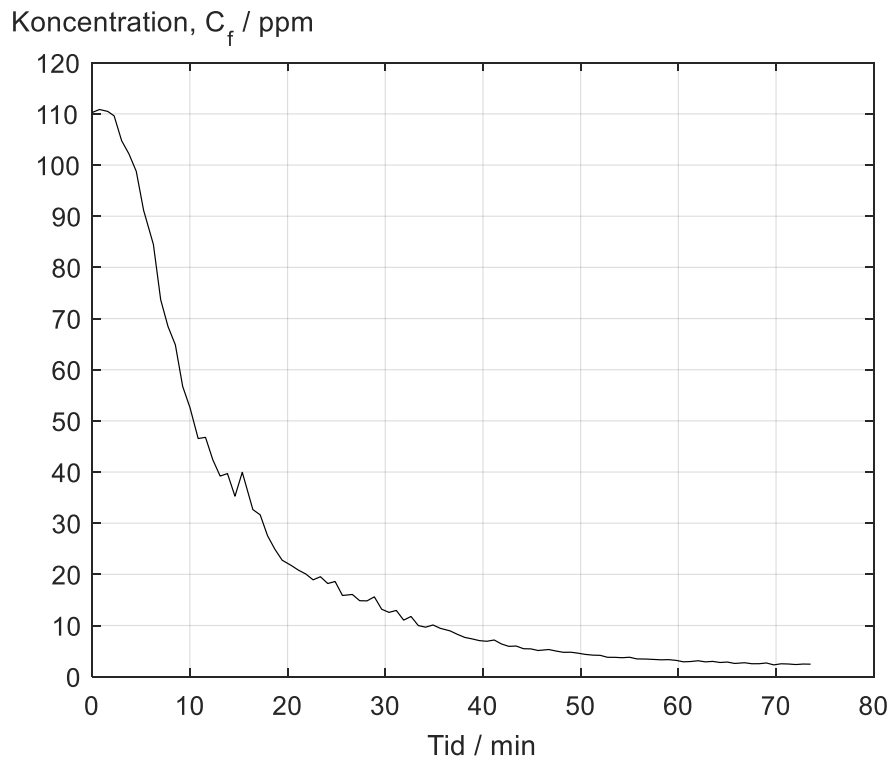
Om luftens lokala medelålder i frånluften användes istället för nominella tidskonstanten erhöles luftutbyteseffektivitet enligt ekvation (7).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 18,08 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{18,08}{39,54} = 0,457 = 45,7 \% \quad (7)$$

4.3.6 Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

Resultat från avklingningsmätning i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation redovisas i Figur 62. Vid mätningen var belysning, dator, personsimulator och solsimulator igång, dvs. värmeeffekten var 363 W. Begynnelsekoncentrationen av spårgas var ca. 110,3 ppm. Mätningen avbröts efter ca. 75 minuter och då hade koncentrationen sjunkit till ca. 2,4 ppm. Den totala arean och momentet som erhöles av avklingningskurvan var 1798,72 min·ppm respektive 35 607,82 min²·ppm, se bilaga 6.



Figur 62: Avklingningskurva i frånluft med hög värmeeffekt och utjämnande ventilation

Med avklingningskurvans totala area och moment kända beräknades medelkoncentration i rumsluft, lokal medelålder i frånluft, rumsluftens medelålder ventilationseffektivitet, nominell tidskonstant, luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet.

Uteluftsflöde, $q_v = 38,9 \text{ l/s} = 0,0389 \text{ m}^3/\text{s} = 2,334 \text{ m}^3/\text{min}$

Försöksrummets volym, $V = 33,05 \text{ m}^3$

Begynnelsekoncentration, $C(0) = 110,27 \text{ ppm}$

Konstant avgiven mängd förorening per tidsenhet, $m = 4,167 \cdot 10^{-3} \text{ l/s}$

$$\langle \bar{C} \rangle = \frac{q_v}{V} \cdot \sum C_i \Delta \tau = \frac{2,334}{33,05} \cdot 1798,72 = 127,0 \text{ ppm} \quad (12)$$

$$\bar{\tau}_p = \frac{\sum C_i \Delta \tau}{C(0)} = \frac{1798,72}{110,27} = 16,31 \text{ min} \quad (13)$$

$$\langle \bar{\tau} \rangle = \frac{\sum \tau_i (C_i \Delta \tau)}{\sum (C_i \Delta \tau)} = \frac{35\,607,82}{1798,72} = 19,80 \text{ min} \quad (14)$$

$$\langle \varepsilon \rangle^c = \frac{m/q_v}{\langle \bar{C} \rangle \cdot 10^{-6}} = \frac{4,167 \cdot 10^{-3} / 38,9}{127,0 \cdot 10^{-6}} = 0,843 = 84,3 \% \quad (3)$$

$$\tau_n = \frac{V}{q_v} = \frac{33,05}{0,0389} = 849,61 \text{ s} = 14,16 \text{ min} \quad (4)$$

$$\bar{\tau}_r = 2 \cdot \langle \bar{\tau} \rangle = 2 \cdot 19,80 = 39,60 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{14,16}{39,60} = 0,358 = 35,8 \% \quad (6)$$

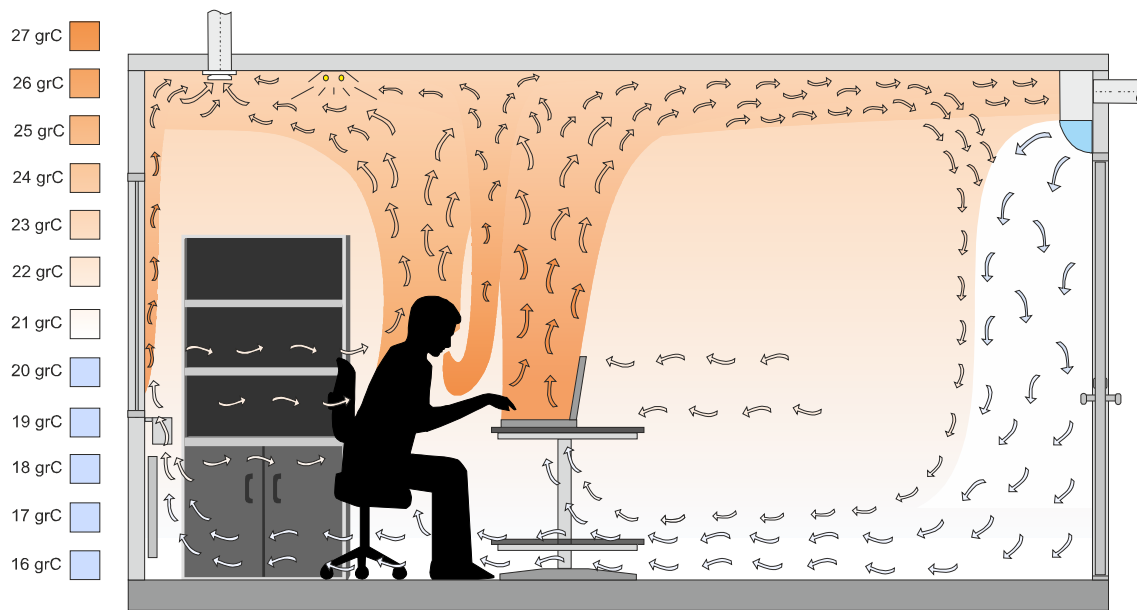
Om luftens lokala medelålder i frånluften användes istället för nominella tidskonstanten erhöles luftutbyteseffektivitet enligt ekvation (7).

$$\tau_n = \bar{\tau}_{p,frånluft} = 16,31 \text{ min} \quad (5)$$

$$\varepsilon_a = \frac{\tau_n}{\bar{\tau}_r} = \frac{16,31}{39,60} = 0,412 = 41,2 \% \quad (7)$$

4.3.7 Röktest

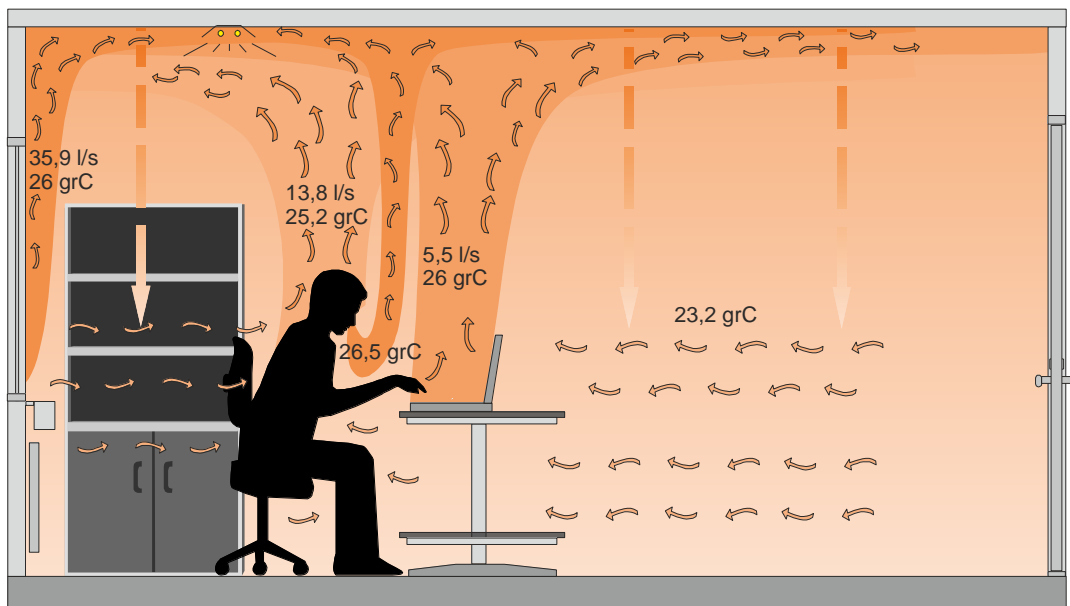
Resultat från röktest på det utjämnande ventilationssystemet redovisas i Figur 63. Från tilluftsdonet föll röken ner mot golvet, där breddade den ut sig över hela rummets bredd och strömmade mot värmekällorna mitt i försöksrummet. Vid personsimulator och dator steg en del av röken upp mot taket. Ungefär hälften av konvektionsflödet strömmade mot frånluftsdon och evakuerades medan den andra halvan strömmade tillbaka mot tilluftsdonet. Där medejekterades röken i tilluften ner mot golvet. Den del av röken som strömmade förbi värmekällorna nådde den vänstra väggen och steg mot solinstrålningssimulatorens. En del av röken strömmade upp och förbi solinstrålningssimulatorens mot frånluftsdonet. Den andra delen strömmade istället tillbaka mot personsimulatorn och datorn där den värmdes upp och steg mot taket.



Figur 63: Luftströmning i försöksrummet med utjämnande ventilation

4.4 Luftflödesmätning i värmekällornas konvektionsströmmar

Mätning av lufthastighet och area för bestämning av luftflöde gjordes 20 cm ovanför andningszonen, dvs. på höjden 1,3 m. Resultat som erhöles redovisas i Figur 64. Personsimulatorns konvektionsström hade hastigheten 0,11 m/s och arean 0,125 m², vilket gav konvektionsflödet 13,8 l/s. Datorns konvektionsström hade hastigheten 0,09 m/s och arean 0,062 m², och flödet uppgick då till 5,5 l/s. I solinstrålningsimulatorns konvektionsström erhöles hastigheten 0,11 m/s och arean 0,065 m², vilket resulterade i flödet 7,15 l/s. Någon mätning på belysning utfördes inte då dess placering inte tillät det. Summering konvektionsflödet gav det totala flödet 26,45 l/s i konvektionsströmmarna. Eftersom uteluftsflödet var ca 38,9 l/s innebar det att gränsen mellan den övre förorenade och under rena zonen borde vara högre upp i rummet. Det innebär att med dessa förutsättningar borde en sittande person andas in luft från den undre rena zonen.



Figur 64: Luftflöde i värmekällornas konvektionsströmmar

4.5 Summering resultat

Om medelvärdet av lokal medelålder i de olika mätpunkterna med homogensspridningsmetoden togs över hela dygnet erhöles resultat enligt Tabell 4. Med deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt erhöles lägst medelålder i tilluft, därefter på 0,1 m, andningszon, frånluft, 1,8 m och högst medelålder på 2,2 m höjd. Vid variabel värmeeffekt var medelålder lägst i tilluft, därefter på 0,1 m, andningszon, 1,8 m, frånluft och högst medelålder på 2,2 m. Med omblandande ventilation och konstant värmeeffekt erhöles lägst medelålder i tilluft, därefter på 0,1 m, andningszon, 2,2 m, 1,8 m och högst medelålder i frånluft. Vid det variabla fallet var medelåldern lägst i tilluft, dock äldre än den borde varit eftersom mätkanalen föll ur donet. Därefter på 0,1 m, 2,2 m, andningszon, 1,8 m och störst i frånluft. Då utjämnande ventilation och konstant värmeeffekt undersöktes erhöles lägst medelålder i tilluft, därefter på 0,1 m, frånluft, 1,8 m, andningszon och störst medelålder på 2,2 m. Med variabel värmeeffekt var medelålder lägst i tilluft, därefter på 0,1 m, i frånluft, 1,8 m, i andningszon och högst på 2,2 m.

Tabell 4: Summering medelvärden av lokal medelålder under dygnet i respektive mätkanal med homogensspridningsmetoden

Luftföringsprincip	Deplacerande		Omblandande		Utjämnande	
	Konstant	Variabel	Konstant	Variabel	Konstant	Variabel
Mätfall						
Frånluft / min	18,2	19,7	22,2	22,0	20,0	20,0
2,2 m / min	22,7	24,6	20,9	20,5	22,2	22,0
1,8 m / min	19,6	19,7	21,3	21,1	21,2	20,8
Andningszon (1,1 m) / min	17,1	16,7	20,7	20,5	21,4	21,1
0,1 m / min	14,3	13,8	20,6	20,2	18,4	18,0
Tilluft / min	2,11	2,09	2,22	13,09	1,91	1,91

En summering av resultaten från avklingningsmätningarna och rådande förhållanden redovisas i Tabell 5.

Tabell 5: Summering resultat från avklingningsmätningar vid respektive mätfall

Luftföringsprincip	Deplacerande		Omblandande		Utjämnande	
	Låg	Hög	Låg	Hög	Låg	Hög
Mätfall						
Lokal medelålder / min	17,4	16,6	17,1	17,6	18,1	16,3
Nominell tidskonstant / min	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2	14,2
Luftutbytestid / min	31,2	37,8	38,6	40,6	39,5	39,6
Luftutbytesteffektivitet med τ_n	45,4	37,4	36,7	34,9	35,8	35,8
Luftutbytesteffektivitet med $\bar{\tau}_p$	55,8	44,0	44,4	43,4	45,8	41,2
Ventilationseffektivitet	81,0	79,2	78,0	76,4	75,5	84,3

5 Diskussion

5.1 Lufttemperatur

Mätning av lufttemperaturen i försöksrummet vid de olika ventilationssystemen gav att, vid omblandande ventilation erhöles en jämn rumstemperatur vid både konstant och variabel värmeeffekt. Eftersom tanken med principen är just detta var resultatet väntat. Då både till- och frånluftsdon placeras i taknivå och systemet inte är rätt dimensionerat, kan kortslutning uppstå. Det leder till att frånluftstemperaturen kan bli aningen lägre än rumsluftens temperatur. I detta fall erhöles en högre temperatur i frånluften vid bägge fallen. Anledningen till det förklaras med hjälp av röktesterna.

Med deplacerande ventilation åstadkoms en temperaturskillnad i höjddled. Vid båda de undersökta fallen erhöles en vertikal temperaturgradient. Vid fallet med konstant värmeeffekt, skedde 49 % av temperaturökningen mellan till- och frånluft, upp till 0,1 m. Med variabel värmeeffekt var temperaturökningen upp till 0,1 m 44 %. Även vid utjämnande ventilation åstadkoms en temperaturskillnad i höjddled. Denna ska dock vara begränsad jämfört med deplacerande ventilation. Det görs genom att tilluften tillförs på en hög nivå och värms därmed upp innan den når golvnivå. Resultaten från försöken visar att temperaturen på 0,1 m var högre för det utjämnande systemet. Samtidigt var den vertikala temperaturgradienten mindre än vid den deplacerande ventilationen. Eftersom tilluften värms upp innan den når golvnivå, blir temperaturökningen upp till 0,1 m större för det utjämnande systemet. Med konstant värmeeffekt skedde 74 % av temperaturökningen mellan till- och frånluften upp till 0,1 m och med variabel värmeeffekt 63 %.

Frånluftstemperaturerna med konstant värmeeffekt var i princip samma för de tre olika ventilationssystemen, medan temperaturen i andningszonen var lägst för deplacerande ventilation och högst för omblandande. Med variabel värmeeffekt var frånluftstemperaturen ungefär samma för deplacerande samt utjämnande ventilation men lägre vid omblandande. Trots det erhöles en högre temperatur i andningszonen med det omblandande ventilationssystemet än för de två andra. Alltså kan en högre tilluftstemperatur användas vid deplacerande och utjämnande ventilation och ändå nå samma lufttemperatur i andningszonen som vid omblandande ventilation. Det innebär att deplacerande och utjämnande ventilation är att föredra framför omblandande ur energisynpunkt, då systemen används för komfortkyllning och uteluften behöver kylas. Framförallt i varma klimat hade energibesparingen varit stor. Vid fallet med konstant värmeeffekt hade tilluftstemperaturen kunnat höjas mest vid det deplacerande systemet. För att erhålla samma lufttemperatur i andningszonen som det omblandande systemet, med variabel värmeeffekt, hade tilluftstemperaturen behövts höjas lika mycket för både, det deplacerande och det utjämnande ventilationssystemet.

För alla tre ventilationssystem och två olika fall hölls lufttemperatur och vertikal temperaturgradient inom komfortkraven. Lufttemperaturerna var högre än väntat med tanke på det stora ventilationsflödet. Noterbart var att ventilationen var igång dygnet runt vid mätningarna, vilket innebar att lufttemperaturen vid arbetsdagens start var låg. I ett verkligt fall där ventilationssystemet inte varit igång under natten hade starttemperaturen sannolikt varit högre.

5.2 Temperaturverkningsgrad

Temperaturverkningsgraden var högre för fallen med variabel värmeeffekt än de med konstant. I andningszonen erhöles temperaturverkningsgraden ca. 1,4 sett över arbetsdagen vid deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt. Vid det variabla fallet var verkningsgraden ca. 1,5. Motsvarande verkningsgrad för det omblandande systemet var ca. 1,10 respektive 1,15 samt ca. 1,3 respektive 1,4 för det utjämnande ventilationssystemet. Vid det deplacerande samt utjämnande systemet var resultaten rimliga.

Temperaturverkningsgraderna bör vara över 1 eftersom systemen strävar efter en vertikal temperaturgradient, vilket medför att verkningsgraden blir över 1. Att verkningsgraderna blev högre med variabel värmeeffekt var också rimligt, eftersom frånluftstemperaturen bör öka vid ökande värmeeffekt samtidigt som lufttemperaturen begränsas. Sett till hur ett omblandande ventilationssystem bör fungera, var resultaten orimliga. Med omblandande ventilation erhålls frånluftsförhållanden i rummet, vilket leder till att temperaturverkningsgraden borde vara 1 både med konstant och variabel värmeeffekt. Om ventilationen är kortsluten strömmar en del av tilluften direkt till frånluftsdonet och sänker frånluftstemperaturen. Det leder till att en temperaturverkningsgrad mindre än 1 kan erhållas. För att erhålla verkningsgrader över 1 måste frånluftstemperaturen vara högre än rumstemperaturen, vilket inte borde inträffa vid omblandande ventilation. Vid fullständig omblandning blev verkningsgraden 1 och vid fallet som beskrevs ovan, där frånluftstemperaturen blev lägre än lufttemperaturen, erhöles verkningsgrader under 1. Resultaten var däremot inte orimliga med tanke på att frånluftstemperaturen var högre än rumstemperaturen vid bägge fallen.

5.3 Kyl- och värmeeffekt

Med deplacerande ventilation och konstant värmeeffekt fördes 90,7 % av värmeeffekten bort med ventilationsluften. Med omblandande ventilation fördes 97,7 % bort och med det utjämnande systemet fördes 94,2 % av värmeeffekten bort med ventilationsluften. Det innebär att försöksrummet var mycket tätt och endast en mycket liten del av värmen försvann som läckage samt transmissionen genom golv, väggar och tak. Vad gäller mätningarna med variabel värmeeffekt fördes 83,7 % av värmeeffekten bort med det deplacerande ventilationssystemet, 82,3 % med det omblandande samt 85,8 % med det utjämnande systemet. Alltså blev mängden bortförd värme med ventilationsluften betydligt mindre då värmeeffekten ökade. Detta i sig är rimligt med tanke på att rumstemperaturen ökar vid ökande värmeeffekt. Därmed blev temperaturskillnaden mellan försöksrummet och rummet utanför större, vilket ledde till att läckaget genom otätheter ökade samt att transmissionen genom golv, väggar och tak blev större.

5.4 Homogenspridningsmetoden

Vid spårgasmätning med homogenspridningsmetoden erhöles blandade resultat. Diskussionen baserades därför endast på förhållandet mellan mätkanalerna. Det omblandande ventilationssystemet gav en jämn spårgaskoncentration i alla kanaler oavsett höjd och om värmekällorna var igång eller ej. För det deplacerande och utjämnande systemet erhöles däremot oväntade resultat. Gränsen mellan den övre omblandade och undre renare zonen vid deplacerande och utjämnande ventilation blir där ventilationsflödet och det totala konvektionsflödet är samma. Då värmekällorna är avstängda blir konvektionsflödet minimalt och gränsen borde därför ligga väldigt nära golvnivå. Därmed borde spårgaskoncentrationen vara samma på alla höjder då värmekällorna är avstängda.

Resultaten från det deplacerande ventilationssystemet bekräftar detta. För det utjämnande systemet syntes däremot en skillnad i höjdlöd även när värmekällorna var avstängda. Framförallt syntes att på 0,1 m samt i frånluften var koncentration lägre än på övriga höjder. Då värmekällorna var aktiva syntes att spårgaskoncentrationen varierade i höjdlöd för både det deplacerande och utjämnande ventilationssystemet. För båda systemen erhöles dock en lägre koncentration i frånluften än vid 1,8 samt 2,2 m. Detta syntes tydligast för det deplacerande systemet med konstant värmeeffekt. Varför spårgaskoncentrationen var lägre i frånluften kunde inte förklaras.

Det lokala ventilationsindexet anger hur effektivt en viss förorening transporteras bort från en viss punkt i rummet och ett värde mindre än 1 tyder på kortslutning i ventilationen. För det utjämnande ventilationssystemet var det lokala ventilationsindexet nästan alltid under 1,0, bortsett från vid 0,1 m. Det gällde både vid konstant samt variabel värmeeffekt. Ingen skillnad kunde tydas då värmekällorna var igång eller avstängda. Vid deplacerande ventilation erhöles ventilationsindex under 1,0 innan värmekällorna startades. Då värmekällorna startade ökade ventilationsindexet i andningszonen samt på 0,1 m och var tydligt över 1,0 under arbetsdagen. På 1,8 m och 2,2 m var indexet däremot mindre än 1,0 större delen av mätningarna. Resultaten för både det deplacerande och utjämnande systemet tyder på en del kortslutning av ventilationen. Noterbart är att det deplacerande systemet gav ett betydligt bättre resultat i andningszonen jämfört med det utjämnande.

Eftersom större delen av tiden i ett kontor spenderas sittande är indexet i andningszonen en viktig aspekt. Ett lägre index på låg eller hög höjd kan accepteras då denna luft ej andas in. Då mätningar utfördes på det omblandande ventilationssystemet erhöles lokala ventilationsindex över 1,0 under mer eller mindre hela mätningarna. Eftersom systemet är avsett för att skapa samma förhållanden i frånluften som i utrymmet borde ventilationsindexet vara 1,0. Att värdena blev högre förklaras med att den erhållna koncentrationen i frånluften var högre än i resten av försöksrummet.

Inga rekommenderade värden på den lokala medelåldern hittades, bortsett från i frånluften där den ska vara samma som nominella tidskonstanten. Därför kunde diskussion endast föras utifrån förhållandet mellan de olika mätkanalerna. Eftersom resultaten av lokal medelålder följer resultaten från spårgasmätningarna kan samma resonemang föras för båda måtten. Då värmekällorna inte var igång borde den lokala medelåldern varit ungefär samma oavsett höjd, vilket stämde för den deplacerande men ej utjämnande ventilationen. Då värmekällorna var igång erhöles en skillnad i höjdlöd, dock var lokala medelåldern i frånluften inte högst vilken den borde varit för deplacerande och utjämnande ventilation. För det omblandande ventilationssystemet erhöles en jämn lokal medelålder på alla höjder, bortsett från i frånluften där medelåldern var lite högre. En person antas sitta ner större delen av tiden i ett kontor. Alltså är en viktig aspekt att lokala medelåldern är låg i andningszonen (1,1 m). I andningszonen erhöles klart lägst lokal medelålder under arbetsdagen med deplacerande ventilation, ca. 15–16 min, medan med utjämnande och omblandande var medelåldern ca. 20 min.

Den nominella tidskonstanten rekommenderas vara 20 min för ett kontor, vilken enligt ekvation (4) beräknades till 14,16 minuter. Eftersom den lokala medelåldern i frånluften är samma som den nominella tidskonstanten kunde dessa jämföras. För alla mätningar och ventilationssystem var den lokala medelåldern ca. 18–22 min i frånluften oavsett om

värmekällorna var igång eller avstängda, vilket alltså var inom rekommendationen. Däremot hade den beräknade nominella tidskonstanten överskattats, vilket innebär att uteluftsflödet eller rumsvolymen var fel. Alltså tyder resultaten från den lokala medelåldern för alla ventilationssystemen, att ventilationen inte fungerat som tänkt och/eller att homogenspridningsmetoden inte ger önskat resultat.

5.5 Avklingningsmetoden

Precis som med homogenspridningsmetoden hittades inte något rekommenderat värde för den lokala medelåldern med avklingningsmetoden. Därmed kunde ingen kontroll mot riktvärde göras. Istället jämfördes de olika ventilationssystemen och fallen. Vid fallen med låg värmeeffekt var lokala medelåldern i frånluften kortast med deplacerande, därefter med omblandande och längst medelålder erhöles med utjämnande ventilationen. För fallen med hög värmeeffekt var resultaten tvärtom, längst medelålder för utjämnande och därefter omblandande och deplacerande. Utjämnande ventilation gav både den kortaste och längsta lokala medelåldern. Noterbart var även att med deplacerande och utjämnande ventilation var lokal medelålder längre för fallet med låg värmeeffekt än det med hög. För alla ventilationssystem, oavsett värmeeffekt, erhöles en lägre lokal medelålder i frånluften än medelålder i rumsluften. En jämförelse mellan mätmetoderna kunde även göras. Det visade att den lokala medelåldern i frånluften var lite lägre vid avklingningsmätningarna. Detta kan bero på att lokala medelåldern är beroende av avklingningskurvas area, vilket innebär att den påverkas av vilka punkter som används för att anpassa den räta linjen och därmed beräkna arean.

Luftutbytestiden var kortare för alla ventilationssystem med låg värmeeffekt än de med hög effekt. Skillnaden i luftutbytestid mellan hög och låg värmeeffekt med utjämnande och omblandande ventilation var liten, 1,7 min för omblandande och 0,06 min för utjämnande. Däremot erhöles en stor skillnad mellan hög och låg värmeeffekt med deplacerande ventilation, 6,7 min. Luftutbytestiden var klart bäst med deplacerande ventilation. Oavsett värmeeffekt var den deplacerande ventilationens längsta luftutbytestid fortfarande mindre än övriga systems lägsta värde. I Tabell 1 anges luftutbytestiden för olika luftföringsprinciper. Gemensamt för alla ventilationssystemen var att resultaten gav en längre luftutbytestid än rekommenderat om den beräknade nominella tidskonstanten enligt ekvation (4) användes. Även när antagandet att lokala medelåldern i frånluften är samma som nominella tidskonstanten används, visar det att luftutbytestiden är längre än rekommenderat för alla tester utom deplacerande med låg värmeeffekt. Dessa resultat tyder på kortslutning i systemen, att avklingningsmetoden överskattar luftutbytestiden och/eller att den nominella tidskonstanten är för liten. Det är även så att luftutbytestiden, precis som lokala medelåldern, är beroende av avklingningskurvas area. Därmed påverkas den av vilka punkter som används för att anpassa den räta linjen och därmed beräkna arean. Eftersom uteluftsflödet under mätningarna var högre än normalt, ca 38,9 l/s jämfört med 28 l/s (Warfvinge & Dahlblom, 2010), tydde det på att de låga resultaten troligtvis berodde på den anpassade räta linjen och avklingningsmetoden.

Luftutbyteseffektiviteten var högst för fallen med låg värmeeffekt. Klart bäst luftutbyteseffektivitet erhöles för deplacerande ventilation med låg värmeeffekt. Vid övriga fall erhöles en låg, men jämn luftutbyteseffektivitet. Luftutbyteseffektiviteten är beroende av luftutbytestiden. Dessa konstaterades vara längre än rekommenderat och påverkade därmed luftutbyteseffektivitet negativt vid alla mätningar. Då den beräknade nominella

tidskonstanten användes erhöles mycket låga värden, mindre än 40 % för alla utom deplacerande ventilation med låg värmeeffekt. Då den lokala medelåldern användes erhöles en högre effektivitet men fortfarande lägre än rekommenderat. Enbart med deplacerande ventilation och hög värmeeffekt erhöles en luftutbyteseffektivitet över 50 %. Resultaten tyder på en kortslutning i ventilationen, att ventilationssystemen inte fungerat som tänkt och /eller att avklingningsmetoden inte ger ett förväntat resultat.

Det ventilationssystem som gav bäst ventilationseffektivitet var utjämnande ventilation med hög värmeeffekt. Noterbart var att utjämnande ventilation med låg värmeeffekt gav det sämsta resultatet. Med deplacerande ventilation erhöles de två näst bästa värdena och bedöms därmed vara det bästa systemet avseende ventilationseffektivitet. Precis som för övriga mått var ventilationseffektiviteten lägre än önskat. Högsta effektiviteten var 84,3 % och det erhöles för det utjämnande ventilationssystemet med hög värmeeffekt. Önskvärt är att ventilationseffektiviteten ska vara 100 % eller högre. Återigen tydde resultaten på kortslutning, dåligt ventilationssystem och/eller att avklingningsmetoden inte ger ett rimligt resultat. Ventilationssystemen borde fungerat bättre vid låg värmeeffekt än med hög.

5.6 Röktester

Röktesterna bekräftade att luftströmningen inte fungerade som den borde gjort för de olika ventilationssystemen. På det deplacerande och utjämnande systemet erhöles en sekundärströmning vilken förde gammal förorenad luft tillbaka ner mot tilluftsdonen och medejekterades i tilluftsströmmen. Det innebär att systemen betedde sig mer som ett dåligt omblandande system vilket kunde förklara de dåliga resultaten. Anledningen till det var antagligen att konvektionsflödet från värmekällorna var större än ventilationsflödena. Kontoret har mycket få värmekällor med låg effekt och därför kan ventilationsflödena ha varit lägre än flödesmätarna visade. På det omblandande ventilationssystemet syntes även tecken på att uteluftsflödet var lägre än tänkt. Under röktestet syntes att tilluftsströmmen från tilluftsdonet inte trängde undan konvektionsströmmen från värmekällorna utan vände och strömmade tillbaka mot dörren. Därmed bildades en omblandad zon i den högre delen av rummet. I den vänstra delen av rummet var omblandningen mycket dålig. Eftersom en del av konvektionsflödet direkt strömmade till och evakuerades av frånluftsdonet, höjdes frånluftstemperaturen. Om uteluftsflödet varit ca. 38,9 l/s som tänkt hade detta troligtvis inte inträffat och därför var flödet sannolikt betydligt mindre. Placeringen av det omblandande donet inverkade också. Donet hängde ner ca. en dm och luftstrålen klistrades inte mot taket fullt ut, med hjälp av Coandaeffekten, vilket förkortade kastlängden.

5.7 Jämförelse med liknande studier

Att lufttemperaturen var lägre jämfört med resultaten i Erlandsson & Glyré (2014) var väntat, eftersom de valde att plocka ner belysningen och minskade därmed värmeeffekten. Att skillnaden var så stor var dock oväntat. Resultaten från denna studie har antytt att uteluftsflödet var lägre än tänkt, vilket även skulle kunna förklara den stora skillnaden i lufttemperatur, eftersom ett lägre uteluftsflöde skulle innebära att kylningen av försöksrummet blev mindre. Då luftflödesmätaren flyttades inför denna studie kan luftflödena varit olika i studierna. I Erlandsson & Glyré (2014) var temperaturverkningsgraderna lägre för deplacerande och omblandande ventilation, men högre för utjämnande. Någon trolig förklaring till detta hittades inte.

I Henriksson & Nilsson (2016) erhöjls h"gre lufttemperaturer f"r alla ventilationssystem och fall, d"r lufttemperatur redovisades. I den studien var f"rs"ksrummet utrustad med en station"r dator vilken gav 82 W. Till denna studie antogs ist"llet att b"rbara datorer var vanligare. D"rf"r byttes den station"ra datorsimulatoren ut mot en simulator som skulle motsvara en b"rbar dator p" 30 W och v"rmeeffekten i f"rs"ksrummet blev d"rmed l"gre. Den l"gre erh"llna temperaturen var d"rf"r rimlig. Vid j"mf"relse av temperaturverkningsgrader erh"lls l"gre v"rden i denna studie j"mf"rt med Henriksson & Nilsson (2016) f"r alla redovisade temperaturverkningsgrader f"rutom med utj"mnande ventilation och konstant v"rmeeffekt, utj"mnande ventilation och variabel v"rmeeffekt redovisades enbart f"r 0,1 m. Det f"ljde allts" m"nstret fr"n j"mf"relsen med Erlandsson & Glyr" (2014) men varf"r det blev s" kunde inte f"rklaras. Vid j"mf"relse av lokal medel"lder gjordes det f"r resultaten fr"n homogenspridningsmetoden. Alla resultat visade att lokala medel"ldern var l"gre i denna studie, oavsett ventilationssystem. Troligtvis berodde det p" att golvet t"tats. Allts" var det ventilerade utrymmet mindre i denna studie j"mf"rt med Henriksson & Nilsson (2016). Vid j"mf"relse av lokala ventilationsindex kunde inte n"gon st"rre skillnad urskiljas mellan studierna.

5.8 Eventuella fel

Efter att ha analyserat resultaten fr"n alla m"tningar gavs en tydlig bild av att resultaten f"r de olika ventilationssystemen var mycket l"ga oavsett v"rmeeffekt och vilken m"tmetod som anv"ndes. De l"ga resultaten kunde "ven relateras till hur luftstr"mningen s"g ut i f"rs"ksrummet vid r"ktesterna. Med tanke p" det h"ga uteluftsfl"det som valts borde inte luftstr"mning sett ut som den gjorde.

5.8.1 Uteluftsfl"de

En m"jlig f"rklaring kunde vara att luftfl"desm"taren visade fel och att uteluftsfl"det var l"gre "n vad som var t"nkt. D"rf"r utf"rdes en kontroll p" denna efter alla m"tningar. Det visade sig att denna placerats f"r n"ra fl"kten p" tilluftskanalen. D"rf"r gjordes en tryckfallsm"tning "ver det omblandande tilluftsdonet och med hj"lp av tryckfallet samt donets k-faktor ber"knades tilluftsfl"det till ca. 25,6 l/s. Allts" var uteluftsfl"det endast ca. 66 % av det "nskade fl"det. I ber"kning av ventilationseffektivitet och nominell tidskonstant anv"nds f"rv"ntat uteluftsfl"de. Eftersom uteluftsfl"det antogs vara h"gre "n det var, blev dessa resultat troligtvis felaktiga. D"remot b"r "vriga resultat fr"n homogenspridnings- samt avklingningsmetoden ha varit korrekta.

Luftfl"desm"taren p" fr"nluften hade en korrekt placering och kan d"rf"r ha visat ett korrekt fl"de. Om s" var fallet ledde det till att ett undertryck skapades i f"rs"ksrummet, vilket innebar att transmission och inl"ckage fr"n det yttre rummet "kade. Kyleffekt beror av tilluftstemperaturen, fr"nluftstemperatur och ventilationsfl"de. I resultaten antogs att allt fl"de in i f"rs"ksrummet bestod av tilluft med temperaturen 18 °C. Eftersom tilluftsfl"det var mycket mindre innebar det att bara en del av fl"det hade temperaturen 18 °C och resterande del hade samma temperatur som i rummet utanf"r f"rs"ksrummet. D"rmed var kyleffekten egentligen l"gre "n vad som ber"knades. Information om storleken p" tilluftsfl"det och inl"ckaget fr"n det yttre rummet var sv"rt att best"mma och d"rf"r gjordes ingen uppdaterad ber"kning av kyleffekten.

Att fl"det var s" pass mycket mindre innebar ocks" att konvektionsfl"det fr"n v"rme k"llorna var st"rre "n uteluftsfl"det. Det innebar att gr"nsen mellan den "vre f"rorenade och undre

rena zonen bör ha varit längre ner än vad som först antogs, vilket medför att en sittande person i försöksrummet möjligtvis hade andats in luft från den övre zonen.

Riktvärdet för nominella tidskonstanten var 20 min för kontor. Lokal medelålder i frånluft är lika med nominella tidskonstanten. Den högsta lokala medelåldern i frånluften som erhöles vid avklingningsmätningarna var 18,08 min. Med andra ord är en nominell tidskonstant runt 20 minuter inte tillräckligt för att ventilationssystemen ska fungera tillfredställande.

Lokal medelålder, luftutbytestid och luftutbytese effektivitet är inte beroende av vilket uteluftsflöde som antas, om den sistnämnda beräknas med lokal medelålder i frånluft istället för nominell tidskonstant. Dessa beror enbart på aktuell spårgasmätning och påverkades därmed inte av det felaktiga flödet. Det gjorde däremot nominell tidskonstant, luftutbytese effektivitet med nominella tidskonstanten och ventilationseffektivitet. Om uteluftsflödet, 25,6 l/s istället användes i beräkningarna erhöles värden enligt Tabell 6.

Tabell 6: Summering resultat som påverkades av det nya uteluftsflödet, 25,6 l/s

Luftföringsprincip	Deplacerande		Omblandande		Utjämnande	
	Låg	Hög	Låg	Hög	Låg	Hög
Nominell tidskonstant /min	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5	21,5
Luftutbytese effektivitet med τ_n	69,0	56,9	55,4	53,0	54,5	54,3
Ventilationseffektivitet	187,1	182,9	180,1	176,4	174,3	194,7

Det verkliga uteluftsflödet var lägre än vad som rekommenderas för ett kontorsrum. Under normala förhållanden kan resultaten därför variera från vad som erhöles i studien.

Den nya nominella tidskonstanten blev 21,52 min jämfört med 14,16 min och var högre än den lokala medelåldern. Då röktesterna visade att ventilationssystemen inte gav önskad luftströmning i försöksrummet, borde luftutbytese effektiviteten samt ventilationseffektiviteten vara lägre än vad som föreskrivits. Då dessa beräknades med de nya förutsättningarna, erhöles värden vilka gav intryck av att ventilationssystemen fungerade mycket bra. Framförallt vid beräkning av ventilationseffektiviteten erhöles väldigt höga värden. Eftersom tidskonstanten och luftutbytese effektiviteten redovisade högre värden än de borde, gjordes antagande om att även ventilationseffektiviteten var högre än den egentligen var. Kontrollen av uteluftsflödet gjordes enbart vid ett tillfälle på ett don och var därmed osäkert. Det nya flödet kan ha underskattats, dvs. att det riktiga uteluftsflödet egentligen var högre. Alltså borde de korrekta värdena borde rimligtvis legat någonstans mellan resultaten med uteluftsflödet 38,9 l/s och 25,6 l/s.

5.8.2 Rummets täthet

Tätningen av det justerbara golvet gjordes tillfälligt och vidhäftningen mot väggarna var dålig. Det antogs vara tillräckligt eftersom ingen tryckskillnad skulle uppstå i försöksrummet, uteluftsflödet skulle vara lika stort som frånluftsflödet. Då det visade sig att uteluftsflödet var mycket mindre innebar det att ett undertryck bildades, vilket bör ha lett till att luftläckaget från utrymmet under golvet ökat. Tätning av genomföringar genom väggar var också dåligt utförda vilket även gjort inläckage från det yttre rummet större.

5.8.3 Rotametern

Ett annat fel som kan ha påverkat mätningarna var rotametern som styrde spårgasflödet. Att ställa in den exakt rätt och likadant från mätning till mätning var en omöjlighet. Påverkade resultat var lokal medelålder med homogenspridningsmetoden och ventilationseffektiviteten med avklingningsmetoden. Någon större påverkan på resultaten bör det inte ha gjort, men en noggrannare flödesmätare för spårgasutsläpp rekommenderas.

5.8.4 Temperaturgivare tilluft

Temperaturgivarens placering i tilluften medförde problem. När spårgas släpps ut vid avklingningsmätningar ska ventilationssystemet vara avstängt. Det innebar att ventilationssystemet var avstängt under 30 minuter och att lufttemperaturen i försöksrummet höjdes. Lufttemperaturgivaren i tilluften var placerad inne i försöksrummet och registrerade den höjda temperaturen. När ventilationssystem och avklingningsmätning sedan startade ville systemet justera tilluftstemperaturen till 18 °C och ventilationsflödet till 38,9 l/s, vilket tog lite tid. Tilluftstemperaturen sjönk inte direkt till 18 °C utan istället en bit under, till ca. 14–15 °C. Därefter höjdes den till över 18 °C för att till slut ställa in sig rätt. Detta kan ha påverkat de erhållna resultaten. Ventilationsflödet ställde däremot in sig på rätt värde relativt fort och bör därmed inte ha påverkat mätningarna. Lufttemperaturgivaren i tilluften borde alltså placerats utanför försöksrummet i anslutningskanalen till tilluftsdonen. Då spårgasen släpptes ut kunde anslutningskanal kopplats loss och ventilationssystemet hade inte behövts stängas av. När utsläppet av spårgas var färdigt kunde anslutningskanalen kopplats på igen och systemet hade därmed inte behövt justeras.

5.8.5 Loggning av temperatur

Loggning av lufttemperatur skulle göras var 5:e sekund, men det visade sig att loggning enbart gjordes var 5:e minut. Alltså kan lufttemperaturen sett jämnare ut än vad den verkligen varit. Någon påverkan på resultaten bör det dock inte haft men snabba temperaturvariationer har inte kunnat upptäckas.

5.8.6 Datorn vid variabel värmeeffekt

För att likna ett mer verkligt fall med ett normalt kontor, borde datorsimulator och belysning inte varit igång under hela arbetsdagen vid fallet med variabel värmeeffekt. Datorsimulatorens borde simulerats med strömsparläge då personen gick på rast och belysningen borde varit närvarostyrd, dvs att den stängdes av då personen lämnade kontoret.

5.8.7 Placering av omblandande och deplacerande tilluftsdon

Det omblandande donet hängde ner ca. en dm. Coandaeffekten utnyttjades därmed inte fullt ut och kastlängden blev kortare. Förutom det låga tilluftsflödet kan även detta medverkat till att tilluftsströmmen inte trängde genom konvektionsströmmen från värmekällorna. Det deplacerande tilluftsdonet hade inte monterats i väggen, utan stod ca. en halvmeter ut från väggen, dock bör inte luftströmningen påverkats.

5.9 Framtida mätningar

Vid framtida mätningar bör de eventuella felen rättas till för att erhålla mer korrekta resultat. För att kunna jämföra konstant och variabel värmeeffekt med homogenspridningsmetoden bättre bör bägge fallen ha samma värmeeffekter. Det vill säga att solegg även ska vara med på det konstanta fallet, dock utan variation under dagen.

Det rekommenderas att mätningarna uppdateras med korrekt uteluftsflöde för att säkrare kunna bedöma mätmetoderna tillförlitlighet och resultat.

6 Slutsats

Att dra några slutsatser om homogenspridningsmetodens tillförlitlighet var svårt. Sex mätkanaler ansågs inte vara tillräckligt för att bestämma alla mått. Därmed kunde endast spårgaskoncentration, lokalt ventilationsindex och lokal medelålder bestämmas. Lokala ventilationsindexet ansågs vara korrekt utifrån försöksrummets luftströmning och lokala medelåldern stämde relativt väl överens med resultaten från avklingningsmätningarna. Däremot kunde inga slutsatser om spårgaskoncentration dras, eftersom denna är beroende av den tillförda mängden spårgas samt att inga riktvärden hittats. Att bedöma mätmetodens tillförlitlighet utifrån så få resultat ansågs orättvist och gjordes därför inte. Mätmetodens tillförlitlighet avseende lokal medelålder och lokalt ventilationsindex, ansågs däremot vara bra.

Med avklingningsmetoden kunde alla mått beräknas. Däremot ställde uteluftsflödets osäkerhet till problem vid utvärderingen. Luftutbytestid och luftutbyteseffektivitet med lokal medelålder i frånluft istället för nominella tidskonstanten kunde relateras till hur luftströmningen faktiskt såg ut i försöksrummet vid röktesterna. Eftersom dessa mått inte påverkades av det antagna uteluftsflödet anses avklingningsmetoden ge tillförlitliga värde avseende dessa. Om luftflödesmätare vilka är kalibrerade och rätt placerade används kan nominella tidskonstanten användas. Däremot rekommenderas att den lokala medelåldern i frånluften används istället, för att undvika enkla fel. Med det tänkta uteluftsflödet 38,9 l/s erhöles en mycket låg ventilationseffektivitet och med verkliga flödet 25,6 l/s erhöles orimligt höga värden. För att kunna dra slutsatser om avklingningsmetodens tillförlitlighet avseende denna bör nya mätningar göras med ett känt uteluftsflöde.

Ett sekundärt mål med studien var att avgöra vilket av donen som gav bäst resultat. Temperaturverkningsgraden var bäst för deplacerande, därefter för utjämnande ventilation. En högre tilluftstemperatur kunde alltså använts på dessa system för att erhålla samma temperatur som vid omblandande ventilation. I klimat där uteluften behöver kylas kan alltså energibesparing göras med dessa system. Då uteluften behöver värmas hade energibesparingen varit störst för omblandande ventilation.

Övriga resultat gav, helt enligt riktvärden, att deplacerande ventilation var bäst, avseende alla index och mått förutom ventilationseffektivitet och lokal medelålder. Där kunde inget av systemen sägas vara bäst sett till bägge mätfallen. Skillnaden mellan omblandande och utjämnande ventilation var mycket liten under de förutsättningar som rådde under mätningarna. Vid normala förhållanden kan resultaten se annorlunda ut.

7 Referenser

Arbetsmiljöverket, 2009:2. *Arbetsplatsens utformning - Arbetsmiljöverkets föreskrifter om arbetsplatsens utformning, grundföreskrift 2009:2 och ändringsföreskrift 2013:3 - föreskrifter samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna*, Stockholm: Arbetsmiljöverket.

Boverket, 2014:3. *Boverkets författningssamling - Boverkets föreskrifter om ändring i verkets byggregler (2011:6) - föreskrifter och allmänna råd*, Karlskrona: Boverket.

Erlandsson, A. & Glyré, C.-J., 2014. *Ventilationseffektivitet i kontorsmiljö - En jämförelse av deplacerande och omblandande ventilation ur termisk komfort*, Helsingborg: LTH Ingenjörshögskolan.

Gavhed, D. & Holmér, I., 2006:2. *Det termiska klimatet på arbetsplatsen, Arbetslivsrapport*, Stockholm: Arbetslivsinstitutet.

Henriksson, M. & Nilsson, H., 2016. *Ventilation measurements - A comparison between three supply air methods*, Helsingborg: LTH Ingenjörshögskolan.

Kristensson, D., 2015. *Betydelsen av hög ventilationseffektivitet, relativt klädsel, luftflöde och energianvändning - Presentation vid Tema Renrum 2015*. Stockholm: AirSon.

Rengholt, U., 1991. *Inneklimat och hälsa - en handbok om inneklimatets inverkan på människors trivsel, komfort och hälsa, Handboksserien*. Stockholm: Svenska Inneklimatinstitutet.

Sandberg, M., Blomqvist, C., Stymne, H. & Mattsson, M., 1993. *Ventilation i funktion - en handledning för konsulter och kontrollanter*. Gävle: Statens institut för byggnadsforskning.

Skistad, H., 1988. *Deplacerande ventilation*. Stockholm: VVS-Tekniska Föreningen.

Skistad, H. o.a., 2004. *Displacement ventilation in non-industrial premises*. 2 red. Bryssel: REHVA.

Svensson, A., 1995. *Ventilationsteknik - Del av kursmaterial för installationsteknik FK*, Lund: Avdelningen för byggnadsfysik, LTH.

Svensson, P., 2004. *Low energy cost and less sick leave with displacement ventilation versus mixing ventilation*. Coimbra, Portugal, Roomvent 9th International conference..

Warfvinge, C. & Dahlblom, M., 2010. *Projektering av VVS-installationer*. 1:3 red. Lund: Studentlitteratur.

Bilaga 1 – Mätschema homogenspridningsmetoden

Mätningar med homogenspridningsmetoden utförs enligt ett bestämt schema, se Tabell 7.

Tabell 7: Schema vid mätning med homogenspridningsmetoden

Dag	Tid	Händelse
1	20:00	Ventilation och utsläpp av spårgas startas
2	00:00	Mätning variabel värmeeffekt startar
2	05:00	Solsimulatorns schema startar
2	07:00	Belysning och dator startar
2	08:00	Personsimulatorns schema startar
2	17:00	Personsimulatorn stängs av
2	18:00	Belysning och dator stängs av
2	19:15	Solsimulatorn stängs av
2	24:00	Mätning variabel värmeeffekt avslutas
3	00:00	Mätning konstant värmeeffekt startar
3	07:00	Belysning, dator och personsimulator startar
3	18:00	Belysning, dator och personsimulator stängs av
3	24:00	Mätning konstant värmeeffekt avslutas
4	08:00	Ventilation och utsläpp av spårgas stängs av

Bilaga 2 – Mätschema avklingningsmetoden

Mätningar med avklingningsmetoden utförs efter ett bestämt schema, se Tabell 8.

Tabell 8: Schema vid mätning med avklingningsmetoden

Tid	Händelse
14:25	Ventilationssystemet stängs av
14:30	Utsläpp av spårgas börjas
14:44	Utsläpp av spårgas avslutas och försöksrummet står orört så gaskoncentrationen jämnas ut
15:00	Ventilationssystemet startas och avklingningsmätning påbörjas
16:20	Avklingningsmätning avslutas

Bilaga 3 – Kalibrering temperaturgivare

Innan mätningarnas start utfördes en kalibrering av temperaturgivarna. Givarna kontrollerades mot 0 °C. Alla 11 givarna sänktes ner i isvatten och låg där tills temperaturen stabiliserats. Resultatet som erhöles redovisas Tabell 9.

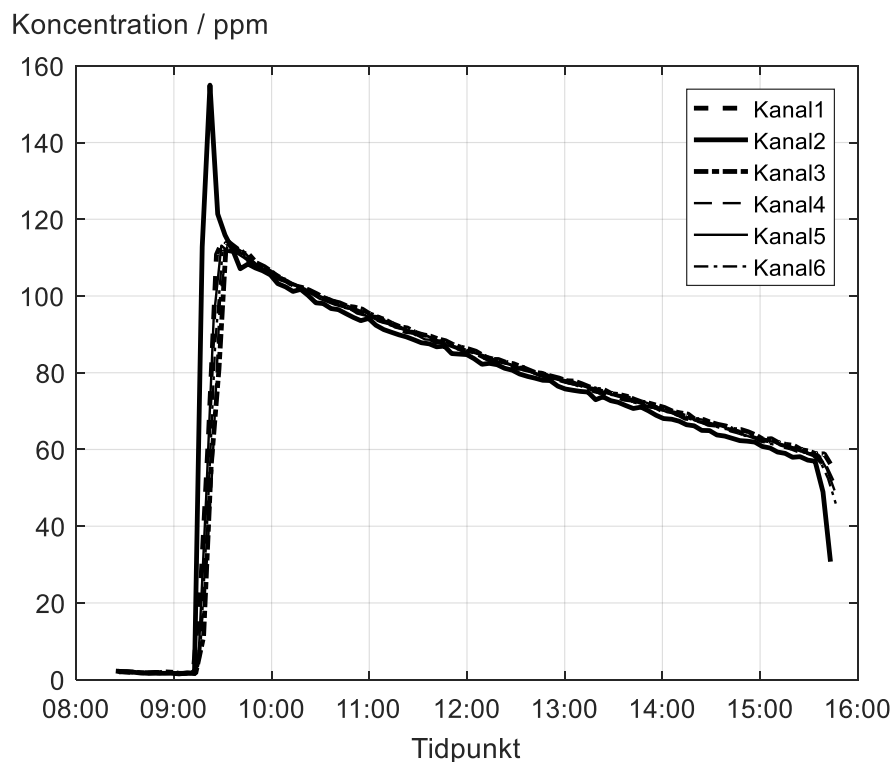
Tabell 9: Kalibrering temperaturgivare

Givare	Tilluft	1	2	3	4	5	6	7	8	9	Frånluft
Temperatur (°C)	0,0	-0,1	0,1	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	0,1	-0,2	0,2	0,0

Värdena i tabellen ovan används för att räkna om de uppmätta temperaturerna vid de olika försöken.

Bilaga 4 - Kontroll spridning av spårgas samt inverkan av densitetskillnad mot luft

Kl. 09:10 började spårgasen släppas ut. I diagrammet syns detta genom en markant ökning av koncentrationen samt att de olika kurvorna var något spridda. Framförallt kanal 2 skiljer sig från de övriga kanalerna, vilket kan bero på att den placerades för nära ett utsläpp. Då tillförseln av spårgas stoppades uppgick koncentrationen i rummet till ca. 115 ppm. När koncentrationen minskar närmar kurvorna sig varandra och efter ca. 20 min var koncentrationen i alla kanalerna på ungefär samma nivå. Därmed anses spridningen vara likformig i hela utrymmet och spårgasens densitet antas inte bidra till någon skiktning. Inga blandningsfläktar användes under kontrollen.

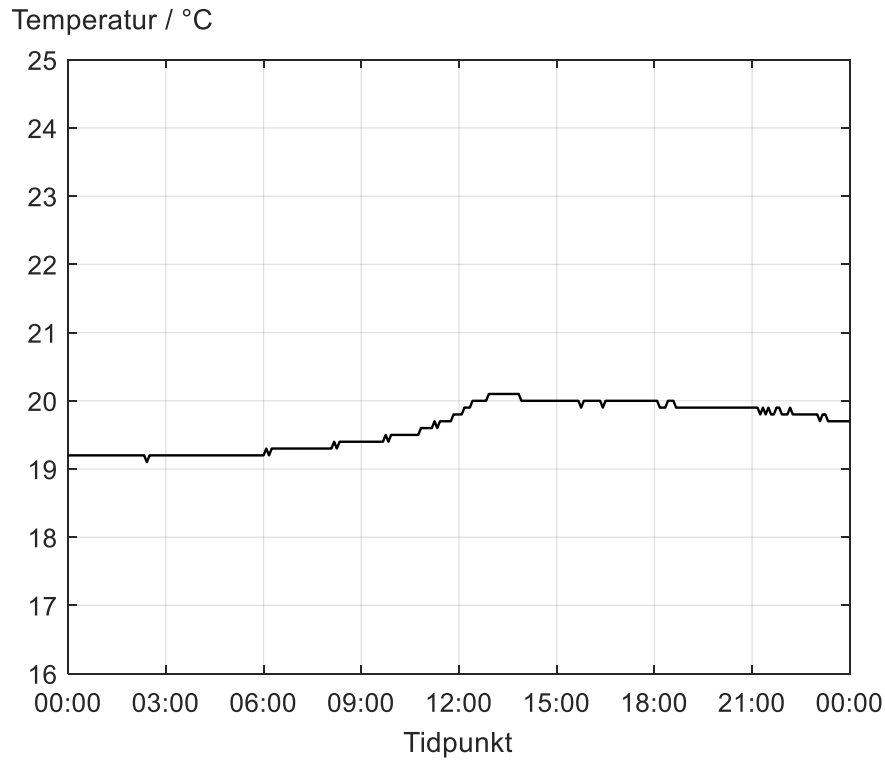


Figur 65: Spårgasens koncentration i rummet vid avstängt ventilationssystem

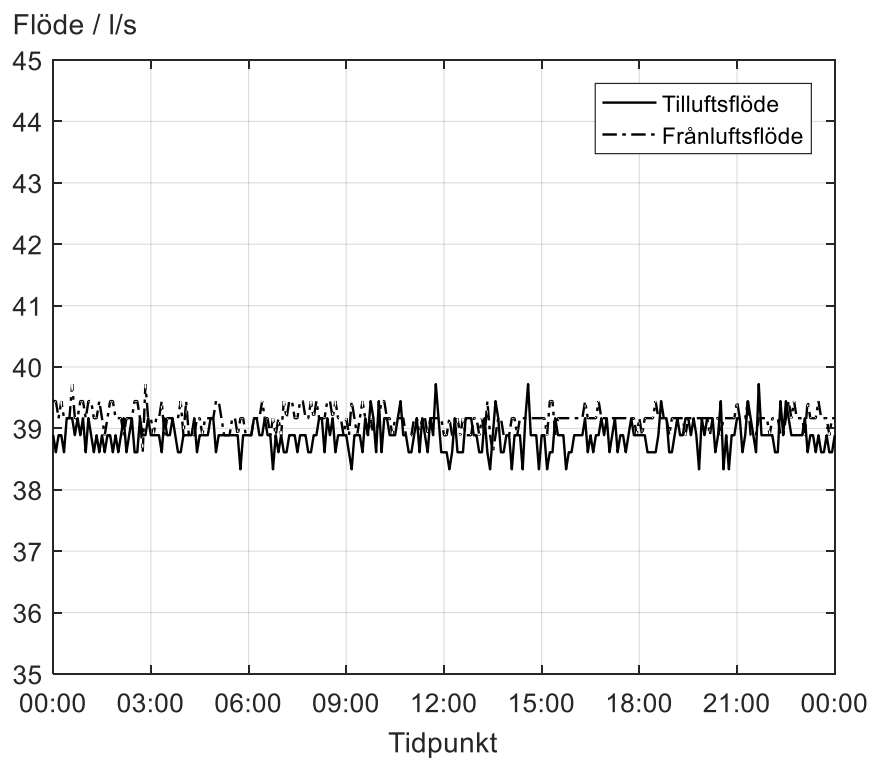
Bilaga 5 – Lufttemperatur i rum utanför försöksrum samt till- och frånluftsflöde

Deplacerande ventilation

Konstant värmeeffekt



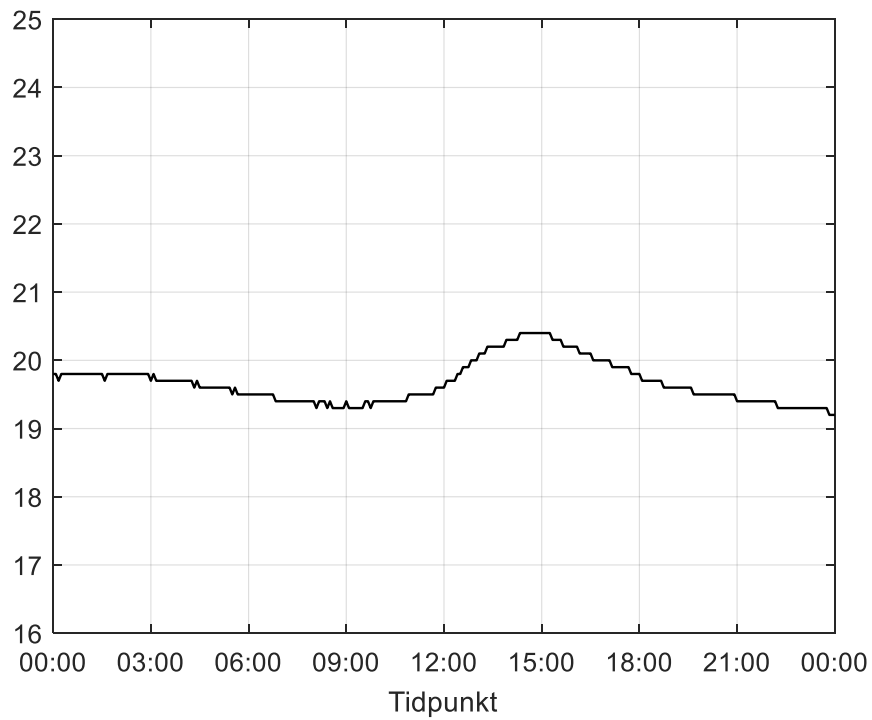
Figur 66: Temperatur i rum utanför försöksrum vid deplacerande ventilation och konstanta värmelaster



Figur 67: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid deplacerande ventilation och konstanta värmelaster

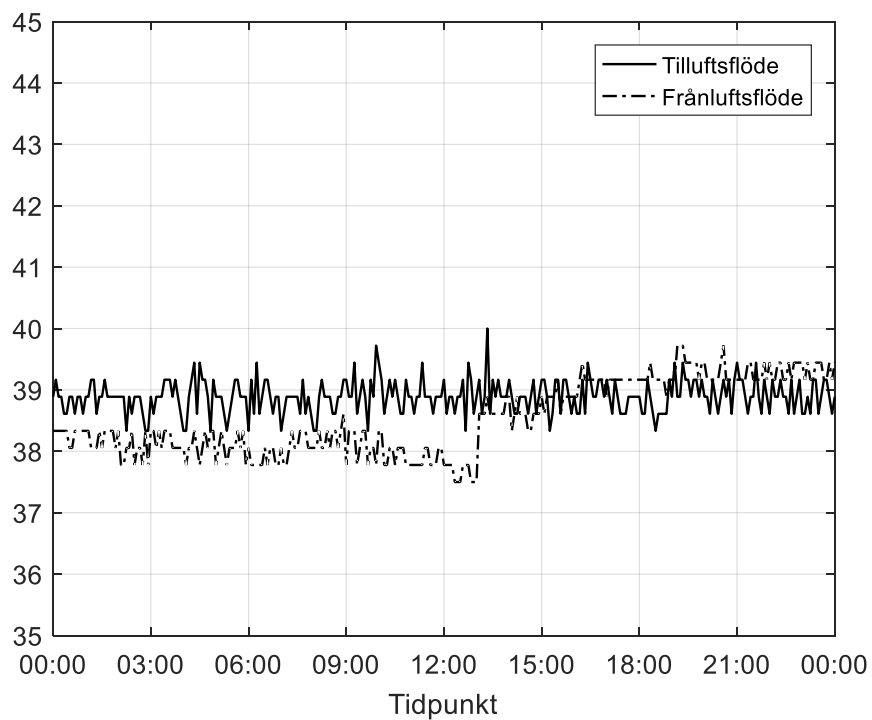
Variabel värmeeffekt

Temperatur / °C



Figur 68: Temperatur i rum utanför försöksrum vid deplacerande ventilation och variabla värmelaster

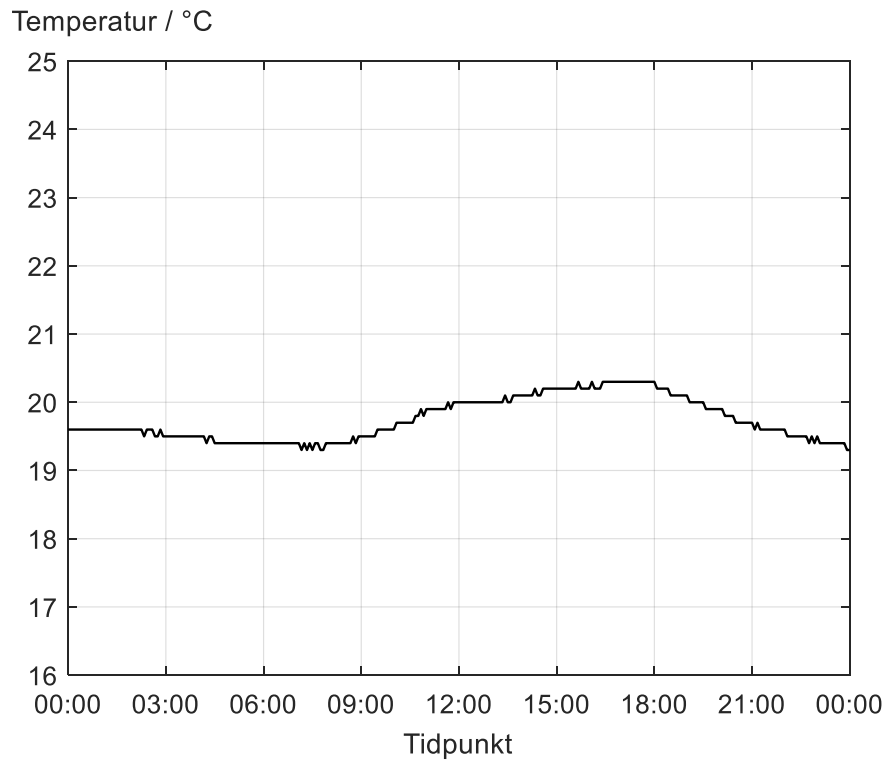
Flöde / l/s



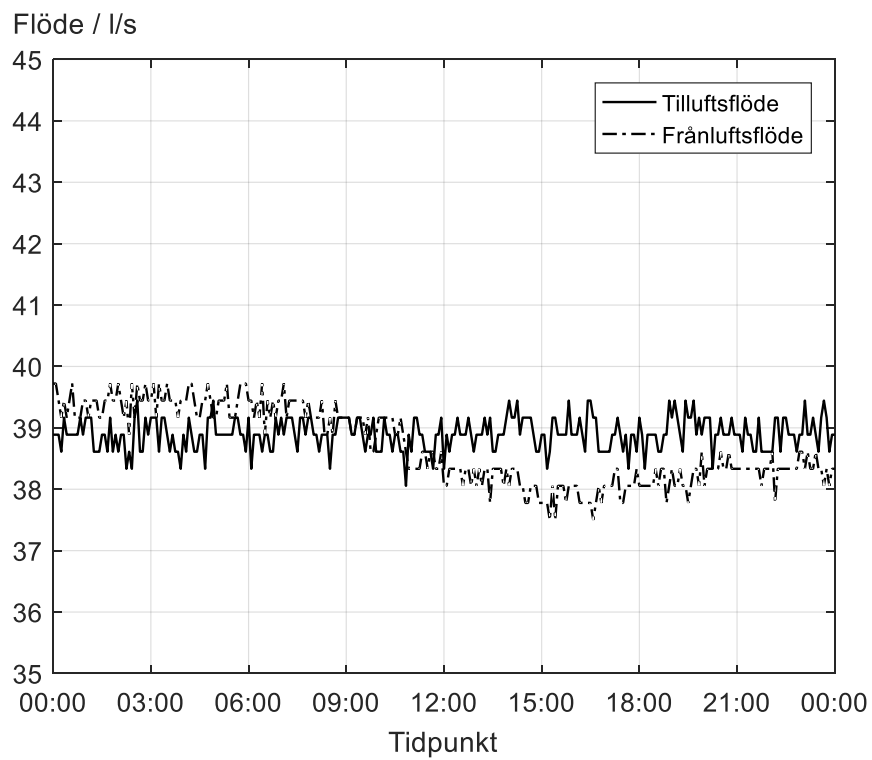
Figur 69: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid deplacerande ventilation och variabla värmelaster

Ombländande ventilation

Konstant värmeeffekt



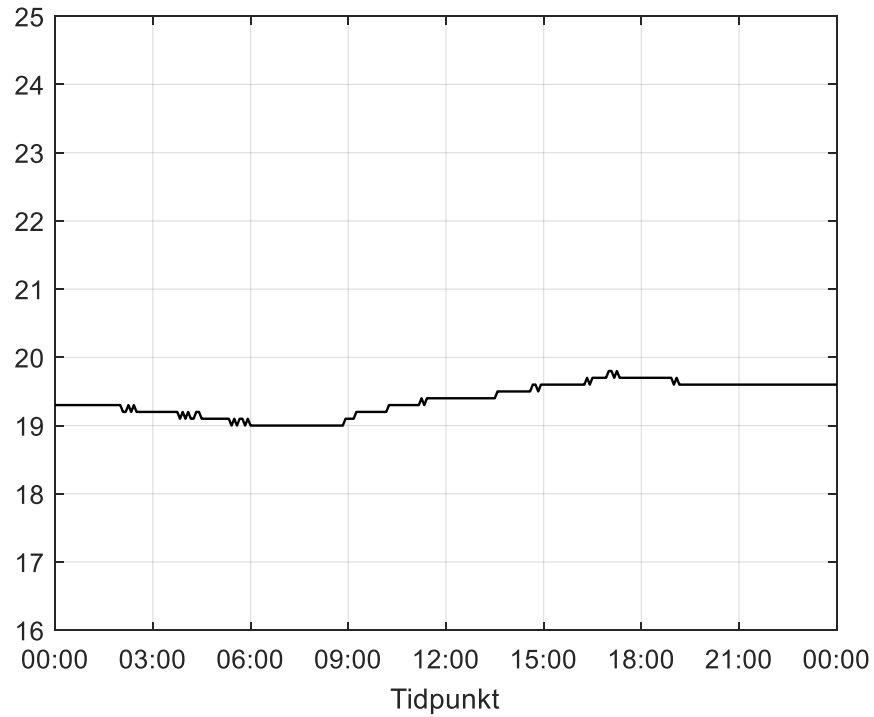
Figur 70: Temperatur i rum utanför försöksrum vid ombländande ventilation och konstanta värmelaster



Figur 71: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid ombländande ventilation och konstanta värmelaster

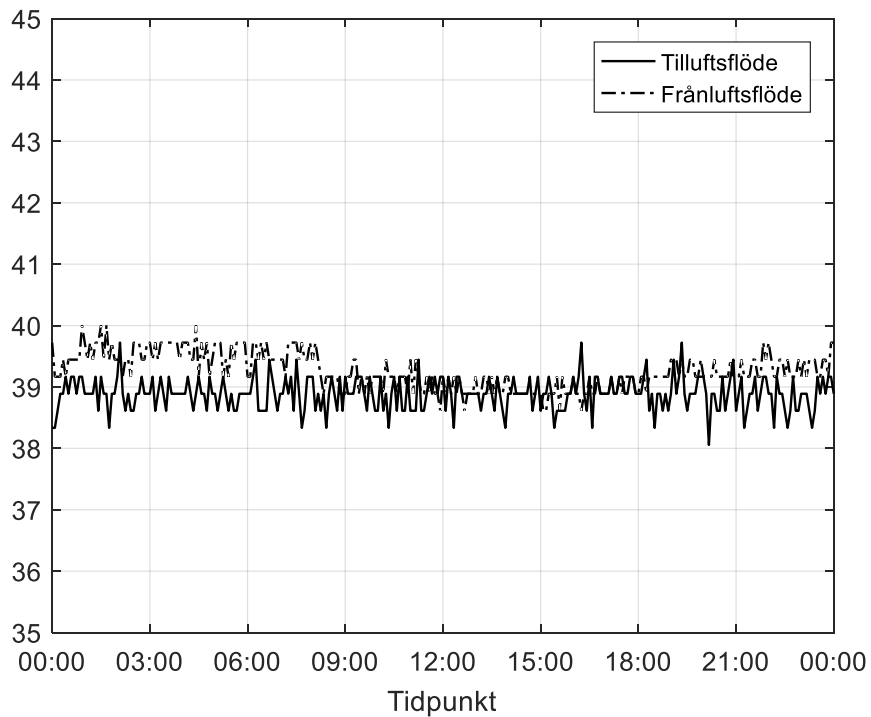
Variabel värmeeffekt

Temperatur / °C



Figur 72: Temperatur i rum utanför försöksrum vid omblandande ventilation och variabla värmelaster

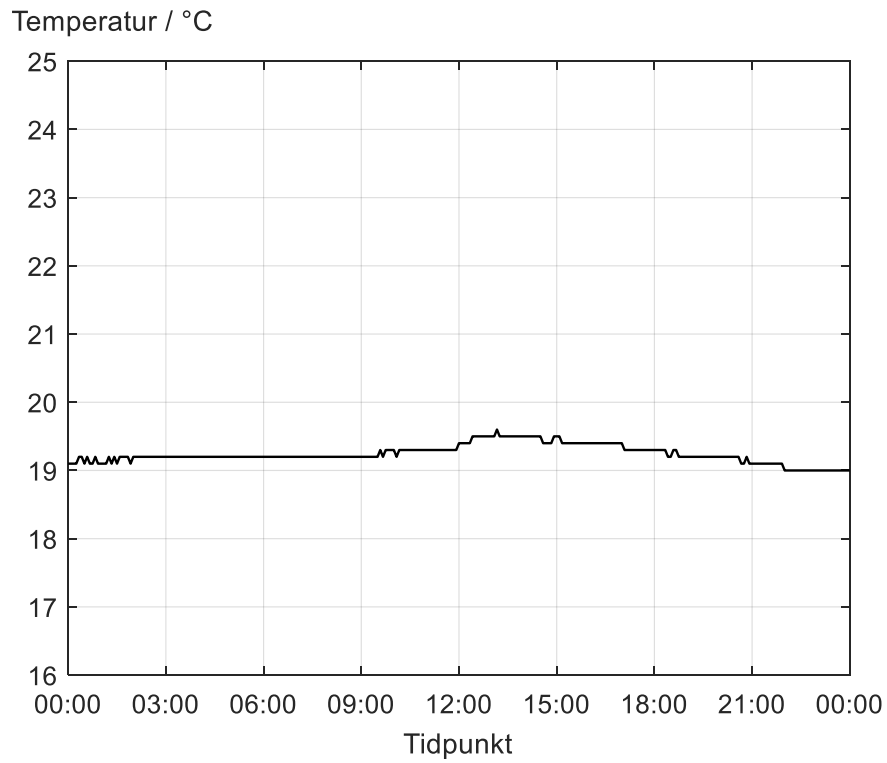
Flöde / l/s



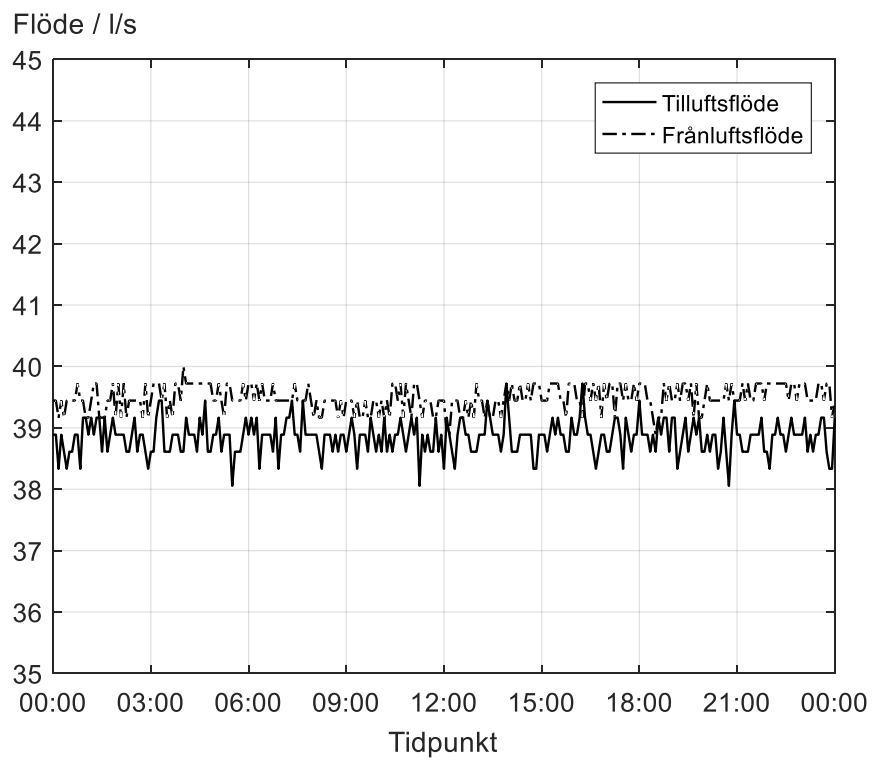
Figur 73: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid omblandande ventilation och variabla värmelaster

Utjämnande ventilation

Konstant värmeeffekt



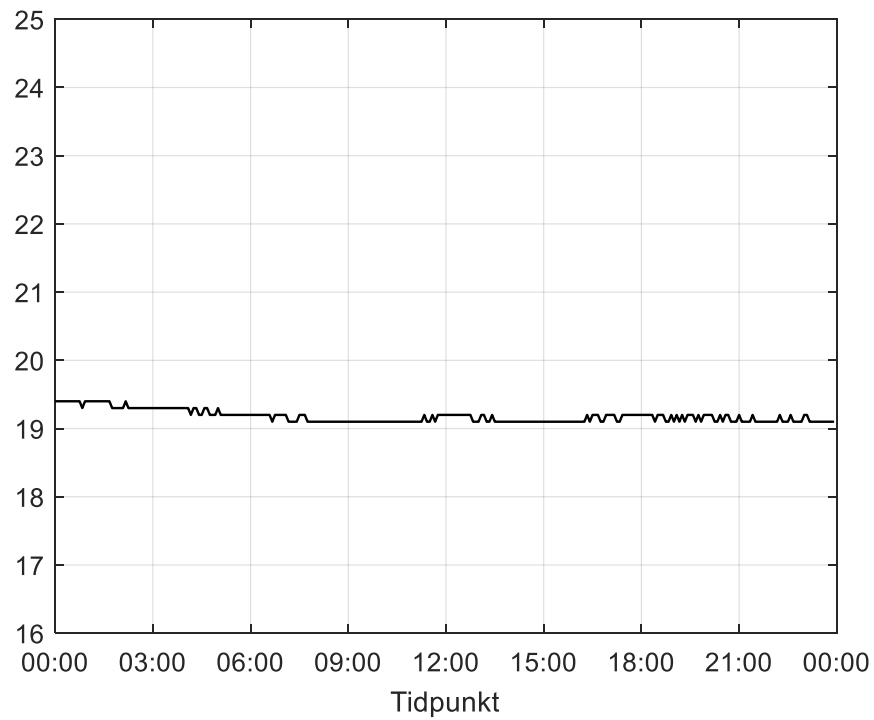
Figur 74: Temperatur i rum utanför försöksrum vid utjämnande ventilation och konstanta värmelaster



Figur 75: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid utjämnande ventilation och konstanta värmelaster

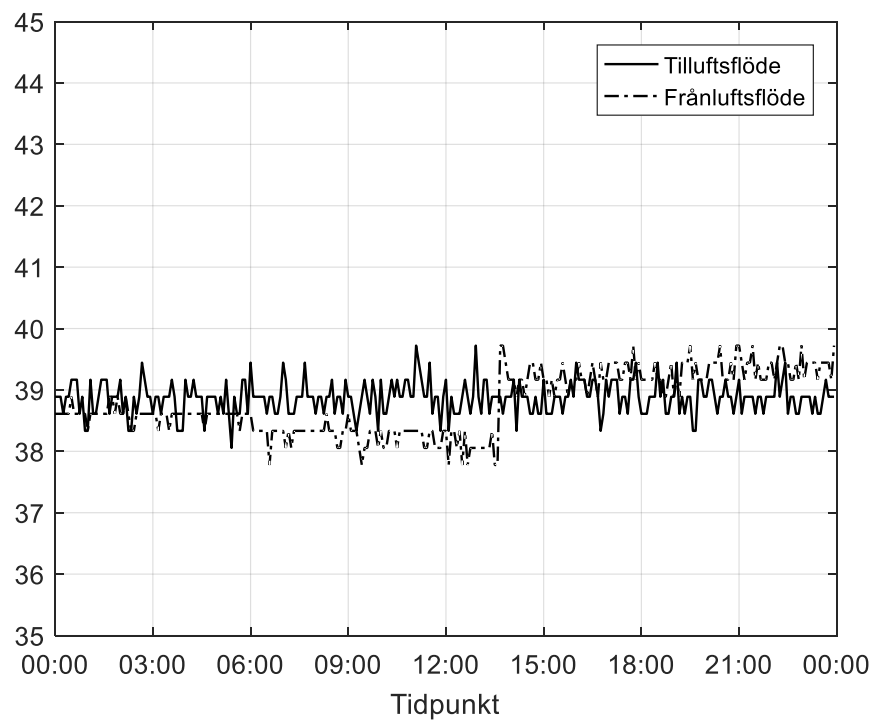
Variabel värmeeffekt

Temperatur / °C



Figur 76: Temperatur i rum utanför försöksrum vid utjämnande ventilation och variabla värmelaster

Flöde / l/s



Figur 77: Till- och frånluftsflöde i försöksrum vid utjämnande ventilation och variabla värmelaster

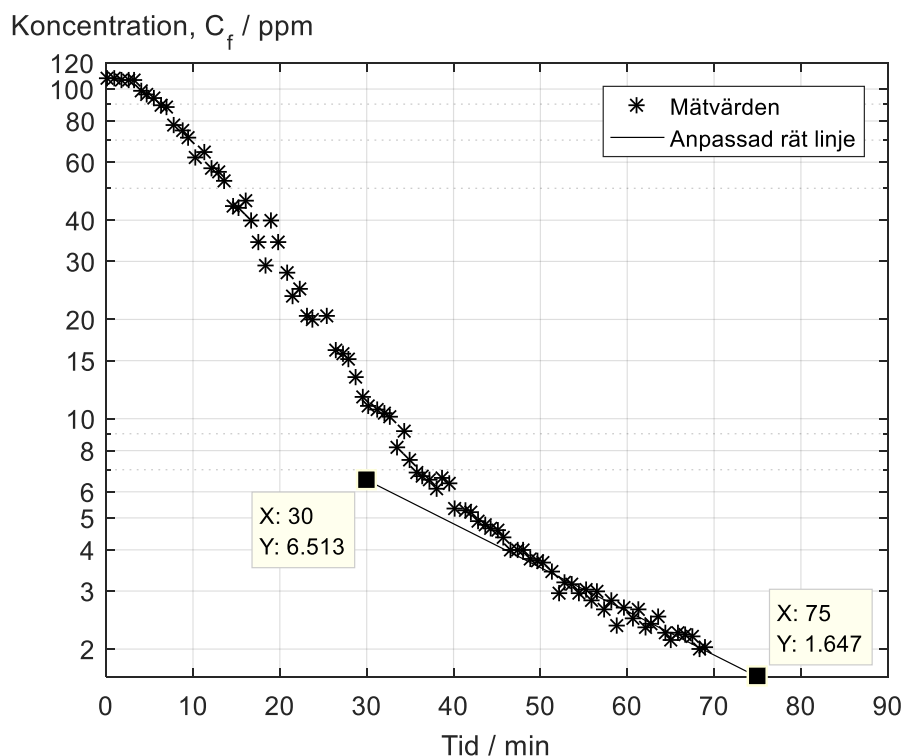
Bilaga 6 – Avklingningsmätningar total area och moment

Nedan redogörs hur den totala arean samt momentet beräknats vid de olika avklingningsmätningarna. För beräkning av mätta areor och moment med trapetssummering utnyttjades ett färdigt Excel-program som skapats av Dennis Johansson, Swegon.

Deplacerande ventilation

Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 78. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,012 ppm och tiden 45,32 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 2,036 ppm vid tiden 67,68 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1805,08 min·ppm och momentet 22 487,81 min²·ppm.



Figur 78: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och deplacerande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 78. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 6,513$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 1,647$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 30$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 75$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 1,647 - \ln 6,513}{30 - 75} = 0,0306 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 2,036$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{2,036}{0,0306} = 66,54 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 67,68$ min

$$\begin{aligned} M_{Rest} &= \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{2,036}{0,0306} \cdot \left(67,68 + \frac{1}{0,0306} \right) = \\ &= 6677,53 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \end{aligned} \quad (11)$$

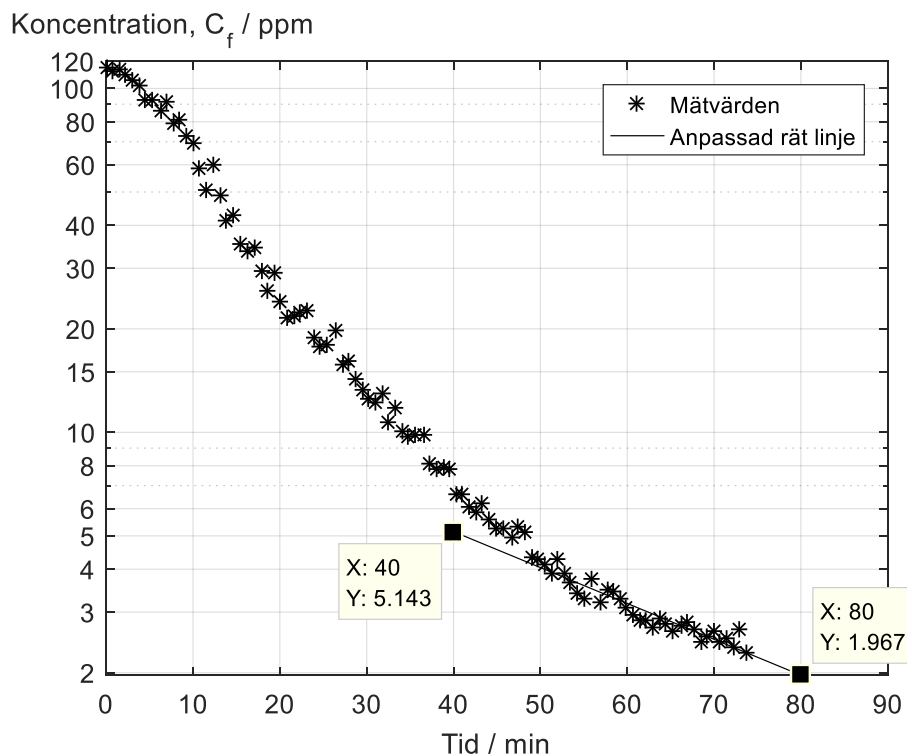
Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

$$Total \text{ area} = 1805,08 + 66,54 = 1871,62 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 22487,81 + 6677,53 = 29165,34 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$

Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 79. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,357 ppm och tiden 48,98 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 2,284 ppm vid tiden 73,68 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1819,36 min·ppm och momentet 25 218,18 min²·ppm.



Figur 79: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och deplacerande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 79. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 5,143$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 1,967$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 40$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 80$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 1,967 - \ln 5,143}{40 - 80} = 0,0240 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 2,284$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{2,284}{0,0240} = 95,17 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 73,68$ min

$$\begin{aligned} M_{Rest} &= \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{2,284}{0,0240} \cdot \left(73,68 + \frac{1}{0,0240} \right) = \\ &= 10\,997,16 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \end{aligned} \quad (11)$$

Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

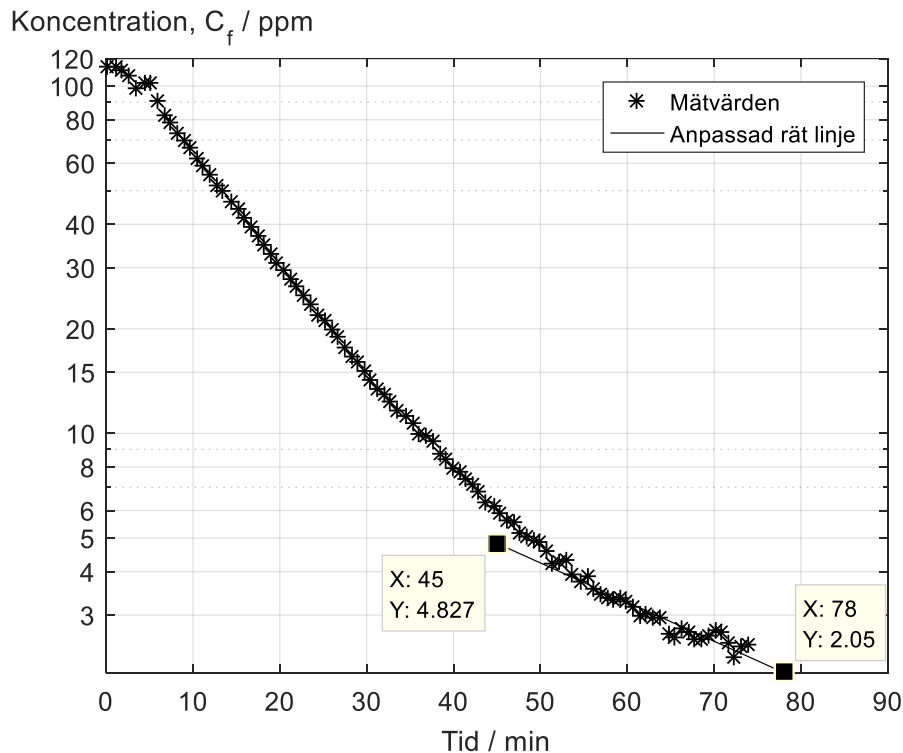
$$Total \text{ area} = 1819,36 + 95,17 = 1914,53 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 25\,218,18 + 10\,997,16 = 36\,215,34 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$

Omblandande ventilation

Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 80. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,237 ppm och tiden 41,32 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 2,480 ppm vid tiden 74,10 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1846,55 min·ppm och momentet 26 698,80 min²·ppm.



Figur 80: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och omblandande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 80. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 4,827$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 2,050$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 45$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 78$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 2,050 - \ln 4,827}{45 - 78} = 0,0260 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 2,480$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{2,480}{0,0260} = 95,38 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 74,10$ min

$$M_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{2,480}{0,0260} \cdot \left(74,10 + \frac{1}{0,0260} \right) = 10\,736,64 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \quad (11)$$

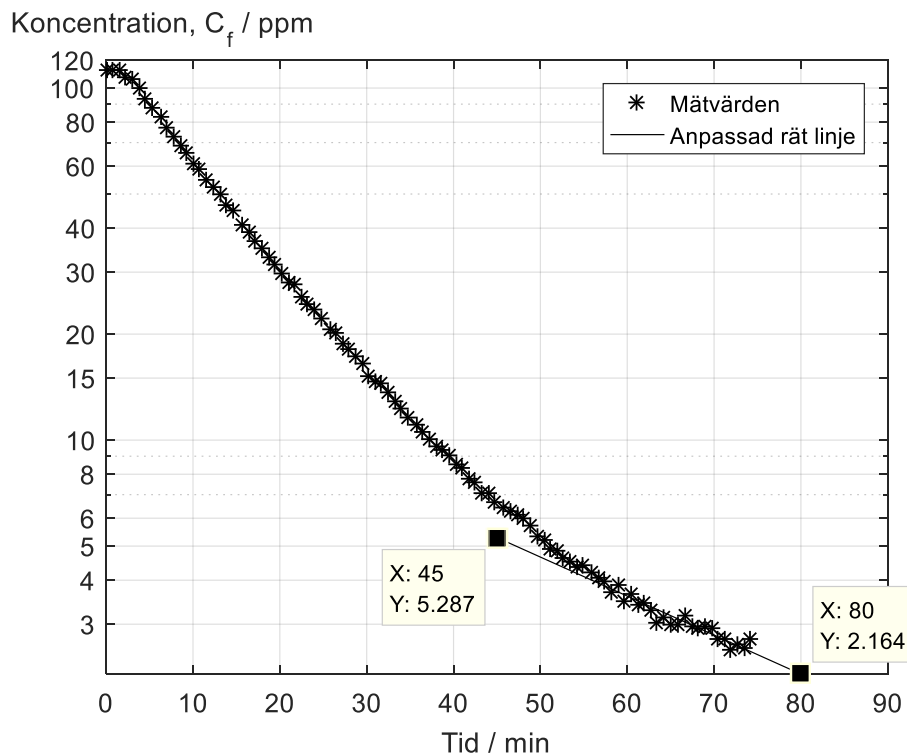
Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

$$Total \text{ area} = 1846,55 + 95,38 = 1941,93 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 26\,698,80 + 10\,736,64 = 37\,435,44 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$

Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 81. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,186 ppm och tiden 55,92 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 2,718 ppm vid tiden 74,23 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1878,56 min·ppm och momentet 28 189,54 min²·ppm.



Figur 81: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och omblandande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 81. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 5,287$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 2,164$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 45$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 80$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 2,164 - \ln 5,287}{45 - 80} = 0,0255 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 2,718$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{2,718}{0,0255} = 106,59 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 74,23$ min

$$\begin{aligned} M_{Rest} &= \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{2,718}{0,0255} \cdot \left(74,23 + \frac{1}{0,0255} \right) = \\ &= 12\,092,00 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \end{aligned} \quad (11)$$

Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

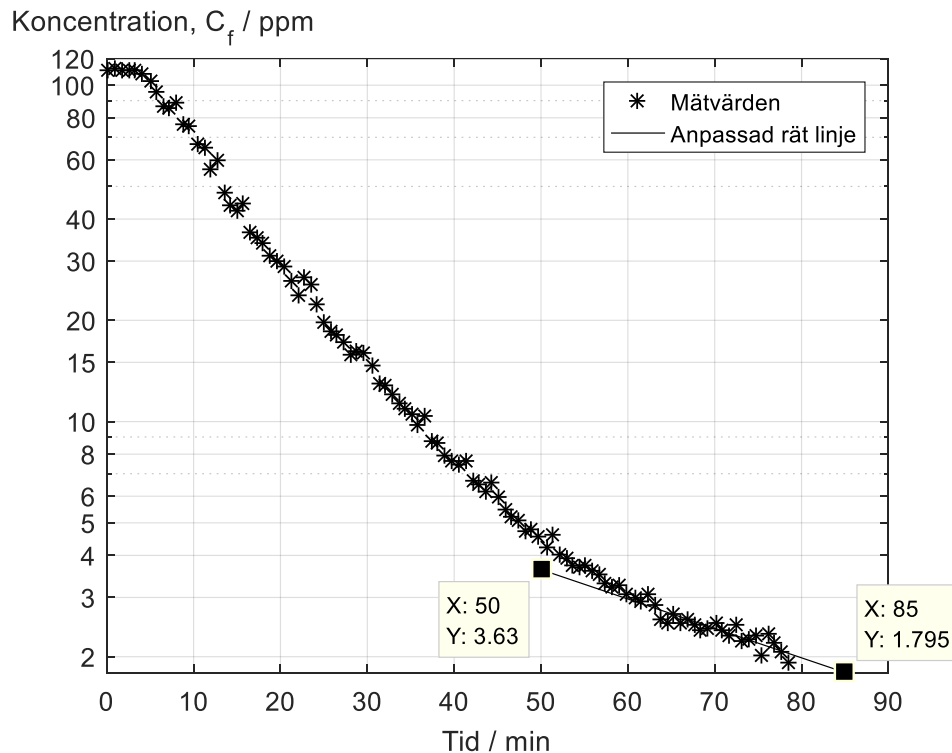
$$Total \text{ area} = 1878,56 + 106,59 = 1985,15 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 28\,189,54 + 12\,092,00 = 40\,281,54 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$

Utjämnande ventilation

Avklingningsmätning med låg värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 82. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,011 ppm och tiden 52,00 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 1,925 ppm vid tiden 78,37 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1913,72 min·ppm och momentet 27 448,11 min²·ppm.



Figur 82: Avklingningskurva lin-log i frånluft med låg värmeeffekt och utjämnande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 82. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 3,630$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 1,795$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 50$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 85$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 1,795 - \ln 3,630}{50 - 85} = 0,0201 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 1,925$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{1,925}{0,0201} = 95,77 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 78,37$ min

$$M_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{1,925}{0,0201} \cdot \left(78,37 + \frac{1}{0,0201} \right) = 12\,270,32 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \quad (11)$$

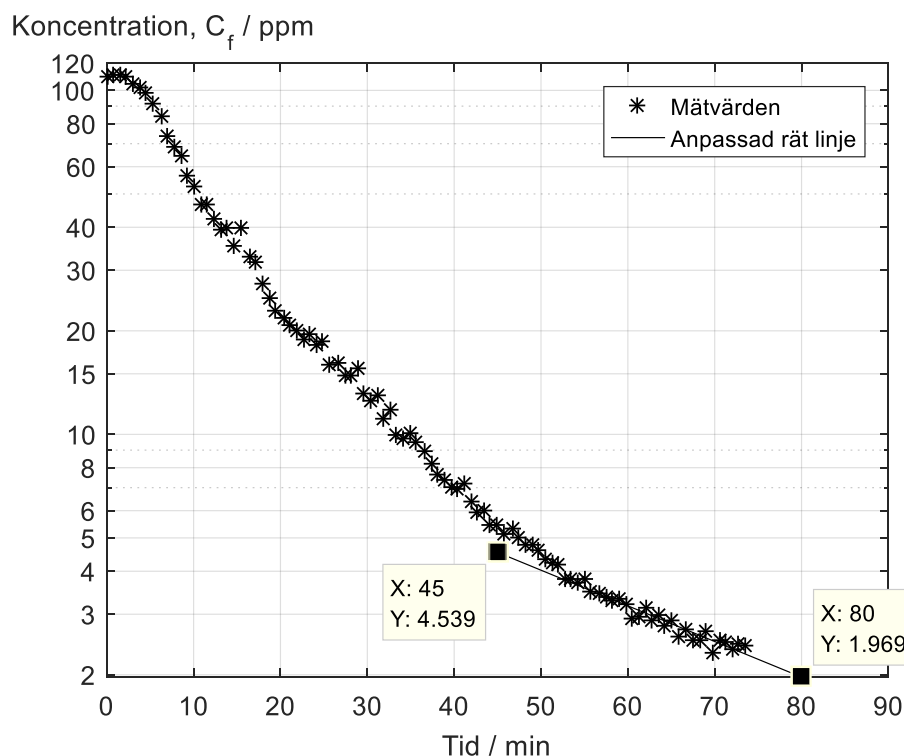
Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

$$Total \text{ area} = 1913,72 + 95,77 = 2009,49 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 27\,448,11 + 12\,270,32 = 39\,718,43 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$

Avklingningsmätning med hög värmeeffekt

För att bestämma resterande area och moment under kurvan plottades kurvan i ett lin-log diagram, se Figur 83. Kurvan planade ut och antogs avta exponentiellt vid koncentrationen 4,539 ppm och tiden 45 minuter. Koncentrationen i frånluften vid det sista mätvärdet var 2,446 ppm vid tiden 73,53 minuter. Genom trapetssummering erhöles den mätta arean 1696,38 min·ppm och momentet 23 800,39 min²·ppm.



Figur 83: Avklingningskurva lin-log i frånluft med hög värmeeffekt och utjämnande ventilation

För beräkning av resterande area samt moment utnyttjades ekvation (10) och (11). För att bestämma linjens lutning, λ_{exp} , approximerades en rät linje till de sista mätvärdena där kurvan avtog exponentiellt, se Figur 81. Linjens lutning beräknades enligt ekvation (9).

Koncentration vid punkten I, $C_I = 4,539$ ppm

Koncentration vid punkten II, $C_{II} = 1,969$ ppm

Tid vid punkten I, $\tau_I = 45$ min

Tid vid punkten II, $\tau_{II} = 80$ min

$$\lambda_{exp} = \frac{\ln C_{II} - \ln C_I}{\tau_I - \tau_{II}} = \frac{\ln 1,969 - \ln 4,539}{45 - 80} = 0,0239 \text{ min}^{-1} \quad (9)$$

Koncentration vid sista mätpunkten, $C_M = 2,446$ ppm

$$A_{Rest} = \frac{C_M}{\lambda_{exp}} = \frac{2,446}{0,0239} = 102,34 \text{ min} \cdot \text{ppm} \quad (10)$$

Tid vid sista mätpunkten, $\tau_M = 73,53$ min

$$\begin{aligned} M_{Rest} &= \frac{C_M}{\lambda_{exp}} \cdot \left(\tau_M + \frac{1}{\lambda_{exp}} \right) = \frac{2,446}{0,0239} \cdot \left(73,53 + \frac{1}{0,0239} \right) = \\ &= 11\,807,43 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm} \end{aligned} \quad (11)$$

Total area samt moment beräknades sedan som summan av den mätta och resterande.

$$Total \text{ area} = 1696,38 + 102,34 = 1798,72 \text{ min} \cdot \text{ppm}$$

$$Totalt \text{ moment} = 23\,800,39 + 11\,807,43 = 35\,607,82 \text{ min}^2 \cdot \text{ppm}$$