

Luftmengders påvirkning på termisk komfort ved behovsstyrt ventilasjon

Martin Bentsen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

EPT-M-2014- 11

MASTEROPPGAVE

for

Student Martin Bentsen

Våren 2014

Luftmengders påvirkning på termisk komfort ved behovsstyrt ventilasjon*Influence of variable airflow rates on thermal comfort using demand controlled ventilation***Bakgrunn**

For å tilfredsstille kravene til passiv- og lavenergibygninger er det som regel nødvendig å bruke en ventilasjonsløsning som reduserer ventilasjonsluftmengden når rom ikke er i bruk eller ikke utnyttes fullt ut. Også i TEK10-bygninger har det blitt vanlig med slik behovsstyring av ventilasjonen. Imidlertid er klager på trekk, i følge bransjens erfaringer, et gjentakende problem i bygninger med behovsstyrt ventilasjon. Dette skjer når anlegget kjøres med mindre luftmengder enn det tilluftsventilene er dimensjonert for.

Våren 2013 ble det gjennomført en masteroppgave hvor deler av denne problemstillingen ble undersøkt for møterom. Oppgaven til Martin Bentsen vil bygge videre på dette arbeidet, men dreies mot kontorlandskap og større variasjoner i luftmengder og interne varmeoverskudd. I tillegg skal flere ventiltyper undersøkes.

Oppgaven tenkes gjennomført som målinger i prøverom i laboratorium.

Masteroppgave bygger videre på arbeid utført i prosjektoppgaven.

Tilknytning: Oppgaven er foreslått av og gjennomføres i samarbeid med Multiconsult. Den inngår også som en del av FME ZEB og forskningsprosjekt Reduced Energy Consumption in Buildings - Impacts on Indoor Air Quality and Health.

Mål

Overordnet mål med oppgaven er å bidra til å sikre godt termisk og atmosfærisk inneklima med minst mulig energibruk i bygninger med behovsstyrt ventilasjon. Det skal vises hvordan ventilasjonseffektivitet og termisk inneklima påvirkes av ulike typer tilluftsventiler ved varierende luftmengder og internlast i rommet.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

1. Oppsummer og supplering av litteraturgjennomgang gjort i prosjektoppgaven. Nyere forskningslitteratur om behovsstyring av ventilasjon i kontorer, særlig inneklime og strømningsforhold i rom.
2. Detaljert plan for måleoppsett målinger inklusive instrumentering utarbeides.
3. Instrumentering og installasjoner i prøverom i lab. Kalibrering av instrumenter.
4. Innledende målinger i laboratorium. Rom konfigurert som møterom eller kontorlandskap og med innblåsing fra tilluftsventiler plassert i tak.
5. Målinger av ventilasjonseffektivitet, temperaturer og lufthastigheter. Karakterisering av ventilasjonens godhet og inneklime for ulike løsninger og belastninger.
6. Analyse og bearbeiding av måledata, sammenligning med teoretiske modeller.
7. Rapportering.

” - ”

Senest 14 dager etter utlevering av oppgaven skal kandidaten levere/sendte instituttet en detaljert fremdrift- og eventuelt forsøksplan for oppgaven til evaluering og eventuelt diskusjon med faglig ansvarlig/veiledere. Detaljer ved eventuell utførelse av dataprogrammer skal avtales nærmere i samråd med faglig ansvarlig.

Besvarelsen redigeres mest mulig som en forskningsrapport med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte, og at de er diskutert utførlig.

Alle benyttede kilder, også muntlige opplysninger, skal oppgis på fullstendig måte. For tidsskrifter og bøker oppgis forfatter, tittel, årgang, sidetall og eventuelt figurnummer.

Det forutsettes at kandidaten tar initiativ til og holder nødvendig kontakt med faglærer og veileder(e). Kandidaten skal rette seg etter de reglementer og retningslinjer som gjelder ved alle (andre) fagmiljøer som kandidaten har kontakt med gjennom sin utførelse av oppgaven, samt etter eventuelle pålegg fra Institutt for energi- og prosessteknikk.

Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del av besvarelsen. Hvis dokumentasjonen på risikovurderingen utgjør veldig mange sider, leveres den fulle versjonen elektronisk til veileder og et utdrag inkluderes i besvarelsen.

I henhold til ”Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet” ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

- Arbeid i laboratorium (vannkraftlaboratoriet, strømningsmekanisk, varmeteknisk)
 Feltarbeid

NTNU, Institutt for energi- og prosesseteknikk, 14. januar 2014



Olav Bolland
Instituttleder



Hans Martin Mathisen
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e):

Forord

Denne rapporten er skrevet våren 2014 ved Institutt for energi- og prosesssteknikk ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU). Rapporten avslutter en 2-årig master i energibruk og energiplanlegging, med hovedprofil innen energibruk i bygninger.

Masteroppgaven er gitt av NTNU og inngår som en del av FME ZEB (Zero Emission Building) og forskningsprosjekt «Reduced Energy Consumption in Buildings – Impacts on Indoor Air Quality and Health». Oppgaven er foreslått av og gjennomføres i samarbeid med Multiconsult.

I løpet av våren har jeg fått muligheten til å anvende teori og studere fenomen i praksis gjennom forsøk i laboratoriet. Dette har gjort arbeidet spennende, utfordrende og svært lærerikt.

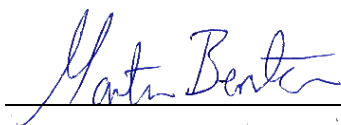
Jeg vil gjerne takke min veileder Hans Martin Mathisen, professor ved EPT, som har bidratt med god faglig støtte og veiledning. Jeg vil takke Kjetil Grung i Multiconsult for god oppfølging og faglig diskusjon, og ikke minst for at han har gitt meg muligheten til å skrive i samarbeid med Multiconsult.

Store deler av arbeidet har foregått i det klimatekniske laboratoriet i forbindelse med montering, oppsett og installering av utstyr. I den sammenheng vil jeg takke Kai Robert Vandsvik fra COWI, Ole Morten Solfeldt fra Swegon og de ansatte ved varmeteknisk laboratorium; Inge Håvard Rekstad, Lars Konrad Sørensen, Kim-Remi Andreassen, Odin Hoff Gardå, Aleksander Mosand og Erik Evjen Høyvik. Tilslutt vil jeg takke min kjære forlovede for god støtte og oppmuntring gjennom masterstudiet.

Ved gjennomlesning av denne rapporten, inviterer jeg leseren til å reflektere over følgende sitat av W.H. Carrier, en av grunnleggerne av ventilasjonssystemer:

” No air condition is better than its air distribution”

Trondheim, 20.juni 2014



Martin Bentsen,

Institutt for energi- og prosesssteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet

Sammendrag

For å imøtekomme nåværende og fremtidige krav til termisk komfort, luftkvalitet og energibruk i næringsbygg, er det nødvendig å anvende en ventilasjonsløsning som har til hensikt å redusere luftmengden til det aktuelle behov i hvert enkelt rom. Når riktig luftmengde tilføres direkte dit til den del av et rom hvor det er behov for den, vil nødvendig luftmengde og energiforbruk bli vesentlig mindre, samtidig som krav til inneklimatekstiler ivaretas. Dette prinsippet utnyttes ved behovsstyrt ventilasjon.

Behovsstyrte ventilasjonsanlegg er blitt vanlig i TEK10-bygninger, og blir en forutsetning for å tilfredsstille kravene til passiv- og lavenergibygging, samt såkalte "Zero Emission Buildings". Selv om det finnes gode eksempler på velfungerende behovsstyrte ventilasjonsanlegg i kontorbygninger, er det ifølge bransjen et gjentakende problem med trekk.

Systemer som baserer seg på omrøringsventilasjon, krever at luften tilføres rommet med en viss impuls, slik at kastelengder står i forhold til rommets geometri. Imidlertid vil varierte ventilasjonsluftmengder endre de strømningsmekaniske egenskapene til tilluftsventilen, og følgelig vil luftstrømningen i rommet forandres. Dette kan medføre problemer med trekk.

Hensikten med denne rapporten er å vurdere termisk og atmosfærisk inneklimatekstiler ved behovsstyrt ventilasjon. Studiet tar for seg behovsstyrt ventilasjon ved bruk av enten aktive ventiler eller passive ventiler i kombinasjon med VAV-spjeld. Målinger er foretatt i laboratorium satt opp som et møterom med innblåsing fra tilluftsventiler plassert i tak. For å kvantifisere ulike klimaparametere, ble lufthastighet, lufttemperatur og luftkvalitet (CO₂-innhold) målt på forskjellige steder i rommet, hovedsakelig i oppholdssonen. Ved å analysere måledataene, har ytelsen til ventilasjonsanlegget for varierende luftmengder blitt dokumentert ved hjelp av ulike tilluftsventiler.

I tillegg er flere beregninger og forsøk foretatt for å studere temperatur- og hastighetsfordelingen langs en luftstråle, og for å fastlegge hvor avløsning fra tak skjer.

Resultater fra dette studiet bekrefter at lufthastigheter, lufttemperaturer og konsentrasjonen av CO₂ i prøverommet varierer ved behovsstyrt ventilasjon. Ulike tilførte luftmengder gir ulikt strømningsbilde i prøverommet både for passive og aktive ventiler.

Resultatene viser at det er åpenbart mulig å få til et velfungerende system i samsvar med de studerte tilluftsventilene. Krav til inneklimatekstiler og termisk komfort ble i de fleste tilfeller tilfredsstilt.

Ved reduserte luftmengder, oppnår den aktive tilluftsventilen bedre ventilasjonseffektivitet. Dette er mest sannsynlig på grunn av høyere utløpshastigheter fra den aktive tilluftsventilen, og dermed bedre omrøringssevne.

Abstract

To accommodate present and future requirements for thermal comfort, air quality and energy use in commercial buildings, it is necessary to use a ventilation strategy that will reduce the airflow to the specific requirements in each individual room. Reduced airflow and thus significantly reduced energy consumption is achieved by supplying a correct level of air where it is needed and for the actual occupancy, while at the same time maintaining indoor climate requirements. This principle is utilized by a concept called Demand-Controlled Ventilation.

Demand-Controlled Ventilation systems are common in TEK10 buildings and are essential to accommodate requirements of passive- and low-energy buildings, as well as so-called "Zero Emission Buildings". Although there are good examples of well-functioning buildings with Demand-Controlled Ventilation, a commonly reported problem according to the business sector is cold drafts.

Ventilation systems based on mixing requires a certain impulse in order to achieve throw relative to the room's geometry. However, variation in the airflow supply changes the flow characteristics of the diffuser unit and hence affects the airflow in the room. This may cause cold drafts.

The purpose of this report is to assess the thermal and atmospheric indoor climate when utilizing Demand-Controlled Ventilation. The study addresses Demand-Controlled Ventilation systems that use active diffusers and passive diffusers combined with a damper. Measurements have carried out in a laboratory set up as a meeting room with air supply diffusers located in the ceiling. In order to quantify various climate parameters, air velocity, air temperature and air quality (CO₂-content) were measured at different locations in the room, mainly in the occupied zone. By analysing the measured data, the performance of the ventilation system for varying airflows has been documented using different diffuser units.

In addition, several calculations and experiments are carried out for the purpose of studying temperature and velocity distribution in a jet entering the room, and finally determining where the jet detachment occurs.

Results from this study confirms that air velocities, air temperature and the concentration of CO₂ in the room varies by Demand-Controlled Ventilation. Variable airflow results in different flow patterns from both passive and active diffusers.

The results indicate that it is clearly possible to obtain a well-functioning system in accordance with the studied diffusers. Indoor climate and thermal comfort demands were in most cases essentially fulfilled.

At reduced airflows, the active diffuser obtained better ventilation efficiency. This is most likely due to higher discharge velocities from the outlet of the active diffuser, thereby improving the mixing ability.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	iii
Abstract	v
Symbolliste og terminologi	x
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mål.....	2
1.3 Metode.....	3
1.4 Begrensninger	3
2 Behovsstyrt ventilasjon	4
2.1 Introduksjon	4
2.2 Dagens forskriftskrav	4
2.2 Fremtidens forskriftskrav	4
2.3 Trykkstyring som reguleringsprinsipp.....	5
3 Betydning av ventilasjon for innemiljø	7
3.1 Atmosfærisk miljø	7
3.2 Termisk inneklimate	7
3.2.1 Klimafaktorer	8
3.2.2 Personfaktorer	11
3.3 Krav til luftmengder.....	11
4 Termisk komfort	14
4.1 Introduksjon	14
4.2 Termisk komfort i næringsbygg.....	14
4.2.1 Vertikal temperaturforskjell.....	14
4.2.2 Asymmetrisk temperaturstråling	15
4.3 Menneskers oppfatning av termisk komfort	15
4.4 Komfortindeksene PMV og PPD	16
5 Luftstrømning i rom	20

5.1	Introduksjon	20
5.2	Ventilasjonsprinsipper	20
5.1.1	Omrøringsventilasjon.....	20
5.1.2	Fortrengningsventilasjon	22
5.3	Ventilasjonseffektivitet	22
5.3.1	Introduksjon.....	22
5.3.2	Ventilasjonseffektivitet	23
5.3.3	Luftvekslingseffektiviteten	23
6	Luftstråler	25
6.1	Introduksjon	25
6.2	Horisontale luftstråler.....	25
6.3	Radielle stråler	26
6.3.1	Veggstråler.....	27
6.4	Plane stråler	28
6.5	Runde aksielle stråler.....	29
6.4	Termisk oppdrift i horisontale stråler.....	30
7	Termisk belastning i et ventilert rom.....	31
7.1	Termiske konveksjonsstrømmer.....	31
7.1.1	Frie konveksjonsstrømmer.....	31
8	Behovsstyring og tilluftsventiler	33
8.1	Passive ventiler	33
8.2	Aktive ventiler.....	34
9	Eksperimentelle forsøk.....	36
9.1	Prøverommet.....	36
9.1.1	Simulering av mennesker	36
9.2	Ventilasjonssystemet	38
9.3	Ventilasjonskomponenter	39
9.4	Måleutstyr, målemetoder og måleusikkerhet	40
9.4.1	Lufthastighetsfølere.....	41
9.4.2	Termoelementer	44

9.5	Fremgangsmåte ved forsøk.....	46
10	Resultat fra beregninger.....	49
10.1	Eksempelberegninger	49
10.2	Ventiltest	54
11	Resultat fra eksperimentelle forsøk.....	57
11.1	CO ₂ -konsentrasjoner	57
11.2	Lufttemperatur og lufthastighet i oppholdssonen	64
11.3	Diskusjon og oppsummering.....	72
12	Konklusjon og videre studier	75
12.1	Konklusjon	75
12.2	Videre studier	76
13	Referanser.....	i
14	Vedlegg.....	iii
	Vedlegg A - Eksempelberegning.....	iv
	Vedlegg B - Resterende resultater fra forsøk.....	v
	Vedlegg C - Måling av luftmengde.....	viii
	Vedlegg D - Varmetapsberegninger	ix
	Vedlegg E - Varmetapsberegning for yttervegg	x
	Vedlegg F - Risikorapport	xi

Symbolliste og terminologi

Beskrivelse	Symbol	Enhet
Arkimedestallet	A_r	-
Turbulenskonstant	C_b	-
Gravitasjonskrefter	g	m/s ²
Spaltehøyde	h	m
Impulsfaktor	i	-
Donkonstant for radiell innblåsning	K_3	-
Prosent misfornøyd	PD	%
Relativ fuktighet	RH	%
Sentertemperatur	T_m	°C
Temperaturforskjell	ΔT	K / °C
Turbulensintensitet	T_u	%
Tilluftstemperatur	T_0	
Romtemperatur	T_r	°C
Effektiv utløpshastighet	U_k	m/s
Senterhastighet	U_m	m/s
Termisk ekspansjonskoeffisient	β	K ⁻¹
Kontraksjonssiffer	ε	-
Tilluftens densitet	ρ_o	kg/m ³
Romluftens densitet	ρ_r	kg/m ³

Navn	Beskrivelse
CFD	Computational Fluid Dynamics
PMV	Predicted mean vote
PPD	Predicted percentage dissatisfied
VAV	Variable air volume
ZEB	Zero emission building

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

For å tilfredsstille nåværende krav til energibruk i bygg, og fremtidige krav om passiv- og lavenergibygninger, er det som regel nødvendig å bruke en ventilasjonsløsning som reduserer ventilasjonsmengden når rom ikke er i bruk eller ikke utnyttes fullt ut. Nye ventilasjonssystemer og ventilasjonsstrategier, deriblant behovsstyrt ventilasjon, er blitt innført for å skape et tilfredsstillende inneklima med lavest mulig energiforbruk. Behovsstyrt ventilasjon er blitt vanlig i TEK10-bygninger. Selv om det finnes gode eksempler på velfungerende behovsstyrte ventilasjonsanlegg i kontorbygninger, er klager relatert til inneklima fortsatt vanlig.

Inneklima er svært viktig for menneskers generelle velvære, og de fleste mennesker oppholder seg i snitt 90 % av tiden innendørs. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007) Studier viser at menneskers komfort, helse og produktivitet blir påvirket av inneklimaet. (Nilsson and Commtech Group 2003) Inneklima har lenge vært et tema for debattering. Problemet med dårlig inneklima ble særlig framtrædende i den velkjente 1970-energikrisen, da besparelse av energi fikk høyere prioritet foran andre krav. I etterkant av energikrisen har bygningsfasader gradvis blitt bedre isolert og tettet for å hindre luftlekkasjer. Slike tiltak ble innført for å begrense varmetap og henholdsvis redusere energibehov til oppvarming. Et ytterligere tiltak for å redusere energibruk i bygg har vært å redusere luftmengdene. (Spengler, McCarthy et al. 2001)

Før energikrisen var den dominerende ventilasjonsmetoden styrt med konstant luftmengde, såkalte CAV-system. I de mest grunnleggende CAV-baserte ventilasjonssystemer kreves det at all luft skal kjøles for å tilfredsstille kravene i soner med høyest varmebelastning. Denne ventilasjonsmetoden gir imidlertid mange ulemper. Ulemper, blant annet at ventilasjonssystemet opererer kontinuerlig, uavhengig av tilstedeværelsen av mennesker. Temperaturreguleringen fører ofte til at den samme luften først kjøles og deretter varmes opp. (Spengler, McCarthy et al. 2001)

Som følger av strengere krav til energibruk i bygg, gikk en over til å benytte seg av ventilasjonsmetoder styrt med variable luftmengder, såkalte VAV-system. Overgang til VAV og variable luftmengder resulterte imidlertid i en større oppbygging av forurensningsgasser fra bygningsmaterialer, møbler og rengjøringsprodukter. Dette har i enkelte tilfeller medført at luftkvaliteten har blitt så forringet at det har resultert i helseproblemer for mennesker. (Loomans 1998)

Dagens tette bygningskonstruksjoner har sammen med ventilasjon og belysning skapt et inneklima som i stor grad er uavhengig av klimaforhold utendørs. Det forventes et termisk behagelig inneklima, men å oppfylle disse forventningene hindres av det faktum at termiske forhold innenfor en bygning, for en enkelt person, er begrenset til et lite område som er forskjellig fra person til person. (Loomans 1998)

Behovsstyrt ventilasjon ventilerer og klimatiserer ved behov, gjennom å tilføre mer luft til områder med høy termisk belastning, og mindre luft til områder med mindre termisk belastning. (Spengler, McCarthy et al. 2001) Det er blant annet gjennom denne styringsstrategien at det

oppstår problemer med trekk. Systemer som baserer seg på omrøringsventilasjon, krever at luften tilføres rommet med en viss impuls, slik at kastelengder står i forhold til rommets geometri. Imidlertid vil varierte ventilasjonsluftmengder endre de strømnings tekniske egenskapene til tilluftsventilen, og følgelig vil luftstrømningen i rommet forandres. Dette kan medføre problemer med trekk.(Byggforsk 2005)

Rapportens oppbygging

I kapittel 2 gis det en kort innføring i behovsstyrt ventilasjon i dagens næringsbygg, med spesielt fokus på hvordan luftmengder behovstilpasses de enkelte soner i bygningen.

I kapittel 3 gis en introduksjon til termisk inneklime, termisk komfort og ventilasjon i dagens næringsbygg. Her beskrives betydningen av god ventilasjon med særlig vekt på sammenhengen mellom inneklime og menneskers helse, produktivitet og trivsel. Dette er en viktig del å ha godt kjennskap til, med den hensikt å forstå hvilke konsekvenser reduserte luftmengder har på inneklimate. Teorien knyttes i tillegg tett opp mot dagens forskrifter for frisklufttilførsel i næringsbygg.

Kapittel 4 om termisk komfort danner rammene for denne rapporten.

Kapittel 5 omhandler luftstrømning i rom.

I kapittel 6 beskrives horisontale luftstrålers oppførsel ved tilførsel i et ventilert rom. Det vil bli gitt en kort innføring av de ulike luftstrålene, og følgelig de fenomen og ulike innvirkninger som forekommer i innblåsningsområdet.

Kapittel 7 omhandler termisk belastning i rom.

I kapittel 8 presenteres to ulike tilluftsventiler som brukes ved behovsstyrt ventilasjon.

Kapittel 9 presenteres en forklaring på det eksperimentelle oppsettet, måleutstyr og målemetode.

I kapittel 10 presenteres beregninger på luftstråler i rom, og resultatene diskuteres og blir presentert i form av modeller.

I kapittel 11 vil resultater fra forsøk vises ved hjelp av modeller og grafer, og følgelig diskuteres.

Rapporten avsluttes med en generell diskusjons- og konklusjonsdel i kapittel 12, hvor det trekkes slutninger og sammenhenger om de nevnte tema. Forslag til videre arbeid er tilegnet siste del i rapporten.

1.2 Mål

Overordnet mål for denne rapporten er å bidra til å sikre godt termisk og atmosfærisk inneklime med minst mulig energibruk i bygninger med behovsstyrt ventilasjon. Det skal gjennomføres forsøk i prøverom for å vise hvordan ventilasjonseffektivitet og termisk inneklime påvirkes av ulike typer tilluftsventiler i et møterom med varierende luftmengder og internlast. Nærmere bestemt innebærer dette å få en oversikt over de ulike luftfartigheter og lufttemperaturer, samt luftkvalitet som oppstår i oppholdssonen ved de to måtene å behovsstyre på.

I rapporten er det i tillegg gjennomført beregninger og forsøk for å studere temperatur- og hastighetsfordeling utetter luftstrålen i forsøk med ulike tilluftstemperaturer, luftmengder og interne belastninger i rommet.

1.3 Metode

Rapporten er en videreføring av problemstilling gjennomført i en masteroppgave våren 2013, og bygger videre på prosjektoppgave fra høsten 2013.

Studiet bygger på innledende litteratursøk høsten 2013, samt supplering av litteratursøk våren 2014. Litteraturstudiene omhandler behovsstyring av ventilasjon i kontorbygg, luftstrømning i rom, og tilluftsventiler for bruk ved behovsstyring. Litteratursøket har basert seg på lærebøker og vitenskapelige artikler funnet på webdatabasene Scopus, Science Direct, BIBSYS og Google Scholar.

Tilluftsventilene i prøverommet i climateknisk laboratorium ved NTNU byttes om slik at forsøk med både aktive og passive ventiler i kombinasjon med spjeld kan gjennomføres. Prøverommet er bygget opp som et møterom i et konvensjonelt kontorbygg, med tilhørende varmebelastning tilsvarende opp til 24 personer, samt simulering av solinnstråling. Det benyttes omrøringsventilasjon med radielle tilluftsventiler montert i tak. Forsøk vil bli kjørt med ulike tilluftstemperaturer og interne belastninger for å studere og dokumentere hvordan luft- og temperaturfordelingen i rommet påvirkes og endres.

1.4 Begrensninger

Behovsstyrt ventilasjon i næringsbygg kan gjennomføres på flere måter. Denne rapporten tar kun for seg regulering ved bruk av CO₂-sensorer. Forsøk er begrenset til å omhandle næringsbygg, med møterom som én bestemt behovsstyrt sone.

Rapporten tar videre kun for seg tilluftsventiler med radielt spredningsbilde. Resultatene ved bruk av tilluftsventiler med radielt spredningsbilde er tilstrekkelig for å vurdere behovsstyrt ventilasjon og besvare vesentlige punkter av oppgaven. Ideelt sett var det opprinnelig ønskelig å utføre tester med andre tilluftsventiler, men grunnet manglende utstyr og driftsproblemer i laboratoriet i en kritisk fase av prosjektet ble man tvunget til å begrense antall tilluftsventiler.

De ulike forsøkene er gjennomført for en tenkt sommerdag med høy utetemperatur og solinnstråling. I forsøk er utetemperaturen konstant 30°C, og det er brukt undertemperaturer på 8°C, 10°C og 12°C på tilluften.

2 Behovsstyrt ventilasjon

2.1 Introduksjon

Energien som behøves til å ventilere et bygg består i klimatisering av ventilasjonsluften, drift av ventilasjonsvifter og drift av luftbehandlingsanlegget. Den energien står for ca. 40 % av det totale netto energibehovet for et kontorbygg utført etter TEK07. Ved bruk av behovsstyrt ventilasjon har det vært beregnet at denne andelen kan reduseres med 25 %. (Grini, Wigenstad et al. 2011)

Forutsetningen bak behovsstyrt ventilasjon bygger på prinsippet at behovet for ventilasjon er ikke alltid den samme. Dette omfatter i teori alle styringsprinsipper der den tilførte ventilasjonsluftmengden gjennom ventilasjonsanlegget varierer over tid. Dette betyr at behovsstyrt ventilasjon kan oppnås med både CAV- (Constant Air Volume) og VAV-systemer (Variable Air Volume). I et CAV-system vil urregulering tas i bruk, mens for et VAV-system vil det finnes mengder av mulige reguleringsparametere (tilstedeværelse, ur, CO₂-konsentrasjon, trykkforskjeller osv.) som er relevante for bruk i kontorbygg. (Grini, Wigenstad et al. 2011)

I dette kapittelet vil behovsstyrt ventilasjon i kontorbygg nærmere utdypes.

2.2 Dagens forskriftskrav

Kontorbygninger utført i samsvar med krav til energieffektivitet i TEK07 og TEK10 skal ikke ha behov for lokal kjøling. Dette kravet bygger på den forutsetning om at dersom bygningen har et kjølebehov, skal dette behovet kunne dekkes av ventilasjonsluften. Denne forutsetningen kan komme i konflikt med ønske om behovstilpasset ventilasjon fordi behovet for frisklufttilførsel og kjøling ikke nødvendigvis alltid oppstår på samme tidspunkt. (Grini, Wigenstad et al. 2011)

2.2 Fremtidens forskriftskrav

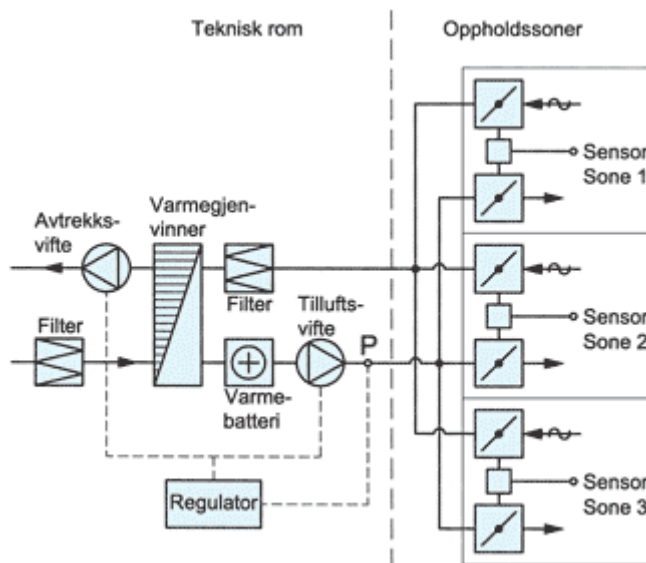
Det er gjennom myndighetene varslet om trinnvis innskjerping av energikravene i retning av passivhusstandard. Et passivhus er definert som en bygning med komfortabelt inn klima, som er mulig å oppnå kun med ettervarming eller etterkjøling av uansett nødvendige ventilasjonsluftmengder. Prosjektrapport 42 fra SINTEF Byggforsk definerer kriterier for passivhus- og lavenergibygger for yrkesbygg og begrunner bruk av begrepet «passivhus» ved at «... i mange av byggekategoriene vil det være mulig å dekke oppvarmingsbehovet (og eventuelt kjølebehov) med luftbåren oppvarming (kjøling) via ventilasjonsanlegget». Denne forutsetningen, i likhet med dagens krav, kan komme i konflikt med ønske om behovsstyrt ventilasjon. (Grini, Wigenstad et al. 2011)

Frisklufttilførsel er den primære funksjonen til et ventilasjonsanlegg. Et grunnleggende prinsipp ved behovsregulering, er at romklimatisering kan være en ønsket sekundær funksjon, men vil aldri komme foran frisklufttilførsel. (Grini, Wigenstad et al. 2011)

2.3 Trykkstyring som reguleringsprinsipp

Siden ventilasjonsanlegget brukt i studiet benytter trykkstyring, vil følgelig dette styringsprinsippet nærmere forklares.

Ved hjelp av turtallsstyrte vifter sørger regulatoren for konstant trykk (P) i tilluftskanalen. Hver sone er utstyrt med spjeld som kan åpne og lukke for lufttilførsel. Åpning og lukking av spjeld kan skje manuelt eller være sensorstyrt. Når en sone kobles inn, faller trykket i tilluftskanalen. Regulatorens oppgave er da å øke luftmengden inntil referansetrykket i tilluftskanalen igjen er nådd. Prinsippet for soneinndeling og trykkstyring av ventilasjon er vist i Figur 1.(Byggforsk 2005)



Figur 1 - Prinsipp for sonestyrt ventilasjon som regulerer mot konstant trykk i tilluftskanalen. Illustrasjonen er gjengitt fra Byggforsk datablad som omhandler behovsstyrt ventilasjon (Byggforsk 2005)

Behovstilpasset ventilasjon som reguleres etter trykkstyringsprinsippet, er i dag den mest vanlige metoden for å regulere luftmengder. Trykksensoren er vanligvis plassert i tilluftskanalen på hovedlufttilførselen. (Herrmann 2011)

Trykksensoren registrerer statiske trykkendringer eller trykkdifferanse som oppstår på bakgrunn av endringer i rom- og grenspjeldposisjoner. Trykksensoren sender så et signal videre til en regulator, og regulatoren beregner korrekt luftmengde for å opprettholde konstant statisk trykk, et såkalt referansetrykk. Når trykksensoren registrerer avvik fra dette trykket, omformer regulatoren dette signalet videre til en frekvensomformer, som igjen regulerer effektpådraget til viften. (Herrmann 2011)

For å opprettholde konstant statisk trykk endres effektpådraget til viften i takt med trykkfallet eller trykkøkningen. Det valgte statiske trykket er basert på hvilket trykk som er nødvendig for å levere prosjektert luftmengde til det rommet som har størst strømningsmotstand ved full drift. (Herrmann 2011)

CO₂- og temperaturregulering

Behovsstyrt ventilasjon

Frisklufttilførselen fra ventilasjonsanlegget benyttet i dette studiet styres ved å måle og regulere etter CO₂-innholdet og temperaturen i prøverommet. CO₂-nivået benyttes som en indikator på den samlede forurensningsbelastningen fra mennesker. CO₂-føleren gir et signal til regulatoren, som igjen styrer spjeldet for friskluft og omluft slik at karbondioksidinnholdet i romluften ikke overstiger den innstilte verdien. (Stensaas and Hovland 2001)

3 Betydning av ventilasjon for innemiljø

En bygning skal i hovedsak gi ly for vær og vind, men også tilpasses de aktivitetene det er bygget for og sørge for å ha et sunt og behagelig inneklima som bidrar til god helse, trivsel og prestasjonsevne. (Loomans 1998)

I tillegg skal inneklimaet sikre at mennesker ikke rammes av ubehag, uheldig helsepåvirkning eller generelt diskomfort. De individuelle behov bør derfor i rimelig grad oppfylles for at bygningen skal oppfattes som god. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)

Begrepet inneklima er definert til å omfatte termisk-, akustisk-, atmosfærisk-, aktinisk- og mekanisk miljø. Et videre begrep enn inneklima er begrepet innemiljø. Innemiljø omfatter i tillegg til de fem hovedfaktorene nevnt ovenfor, estetiske og psykososiale faktorer. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)

Selv om tilførsel av ventilasjonsluft ikke kan påvirke personfaktorer (bekledning og aktivtetsnivå), vil de fysiske parametrene bli påvirket, og derfor må tas til beretning ved vurdering om behovsstyrt ventilasjon kan være et levedyktig og godt konsept i næringsbygg. Det vil i følgende og neste kapittel utdypes mer om de atmosfæriske- og termiske forhold i rom.

3.1 Atmosfærisk miljø

Hovedhensikten med ventilasjon er å begrense innendørs eksponering av forurensninger for dem som oppholder seg i en bygning. Det atmosfæriske miljø betegner forurensninger fra gasser, damper, partikler og mikroorganismer. Luftforurensninger kan tilføres rommene utenfra med ventilasjonsluften eller gjennom utettheter i bygningskonstruksjonen, men er som oftest skapt og generert av kilder inne i lokalene. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996)

De generelle krav til ventilasjon som er å finne i teknisk byggeforskrift omhandler kun krav til det atmosfæriske miljøet. (Norges standardiseringsforbund 2007) Ifølge arbeidstilsynets veiledning og byggeforskriftene, vil luktkriteriet ligge til grunn for dimensjonering av luftmengdene i yrkesbygg.

Denne rapporten begrenser seg til møterom i yrkesbygg. Det atmosfæriske miljøet har normalt i slike rom ingen forurensninger fra prosesser, men kun lukstoffer fra mennesker, og emisjoner fra omhyllende flater og inventar. I denne rapporten legges dette til grunn ved bestemmelse av luftmengder i møterom. (Sørensen)

3.2 Termisk inneklima

Det termiske inneklimaet omfatter de parametre som har innflytelse på menneskets varmebalanse. De fire klimaparametrene; lufttemperatur, midlere strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet er av betydning for vår generelle termiske tilstand. Foruten disse vil termisk komfort også være påvirket av personfaktorene; aktivtetsnivå, bekledning og oppholdstid. (arbejdstilsynet , Sørensen) I følgende del vil de termiske klimaparametere forklares nærmere.

3.2.1 Klimafaktorer

Lufttemperatur

Lufttemperatur sammen med middelstrålingstemperaturen og lufthastigheten er ansett som de faktorene med mest innflytelse på menneskekroppens varmebalanse og opplevelse av trekk. (Helsetilsynet) Lufttemperaturen er definert som målt temperatur uten påvirkning av varmestråling. (Byggforsk 1999)

Midlere strålingstemperatur

Med midlere strålingstemperatur menes den strålingsutveksling som er mellom en person og rommets omgivende flater. Denne strålingsutvekslingen utgjør en del av varmetapet fra kroppen, og det er overflatetemperaturen på omgivende flater som bestemmer dette varmetapet. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)

Luffuktighet

Sett i forhold til temperatur og lufthastighet, har luftfuktigheten mindre innflytelse på varme- og kuldefølelse, og kan normalt utelukkes når komfortverdiene skal bestemmes.

Det er likevel verdt å nevne luftfuktighetens innflytelse på det termiske inneklimate. Luftfuktighet er et mål på hvor mye vanndamp luften inneholder, og er enten uttrykket som absolutt eller relativ fuktighet. Luftfuktigheten påvirkes blant annet av temperatur, uteklimate, fuktilder innendørs og ventilasjon. (Leksikon)

Luftfuktighet får større betydning for menneskers termiske nøytralisering ved høye og lave temperaturer. Ved stigende temperaturer, hvor en stor del av varmen avgis fra perspirasjon (svetting), stiger fuktigheten i rommet. Blir luftfuktigheten i rommet for høy vil fordampningsevnen til svetten fra huden minke, og kroppen må streve mer for å holde kroppstemperaturen nede. (Leksikon)

Anbefalinger med hensyn til nivået av luftfuktighet i en bygning er listet opp i Tabell 1.

Kategori	Sommer	Vinter
1	RH < 60	20 < RH < 40
2	RH < 70	RH < 40
3	RH < 70	RH < 40

Tabell 1 - Anbefalte verdier av relativ luftfuktighet for ulike innemiljøkvaliteter. (Byggforsk 2000)

Lufthastighet

Ved fjerning av varme fra rom kan luftmengdene økes, noe som følgelig også normalt vil føre til høyere lufthastigheter i rommet. Luftbevegelser påvirker konvektiv varmeutveksling mellom en person og omgivelsene. (Helsetilsynet)

For store lufthastigheter kan gi sjenerende lokal avkjøling og oppleves da som trekk. Mennesker er mest følsomme mot trekk på bar hud, og ubehaget er derfor normalt konsentrert til områder som ansikt, nakke og hender. Typiske årsaker til trekk skyldes kald trekk på grunn av konveksjonskjøling fra kalde flater, luftlekkasjer i bygningskroppen eller at ventilasjonssystemet skaper for store luftbevegelser i rommet.(Byggforsk 1999)

Kjølevirkningen fra luftbevegelse øker med økende lufthastighet. Lufthastighet under 0,2 m/s gir vanligvis ikke trekkfølelse når temperaturen ligger innenfor 19-26 °C, ved aktivitetsnivå lett arbeid. Luftstrømmer kaldere enn romluften kan imidlertid gi trekk selv ved lavere hastighet enn 0,2 m/s.

Bygningstype	Kategori	Maksimal lufthastighet [m/s]	
		Sommer	Vinter
Kontorbygg	1	0.18	0.15
	2	0.22	0.18
	3	0.25	0.21

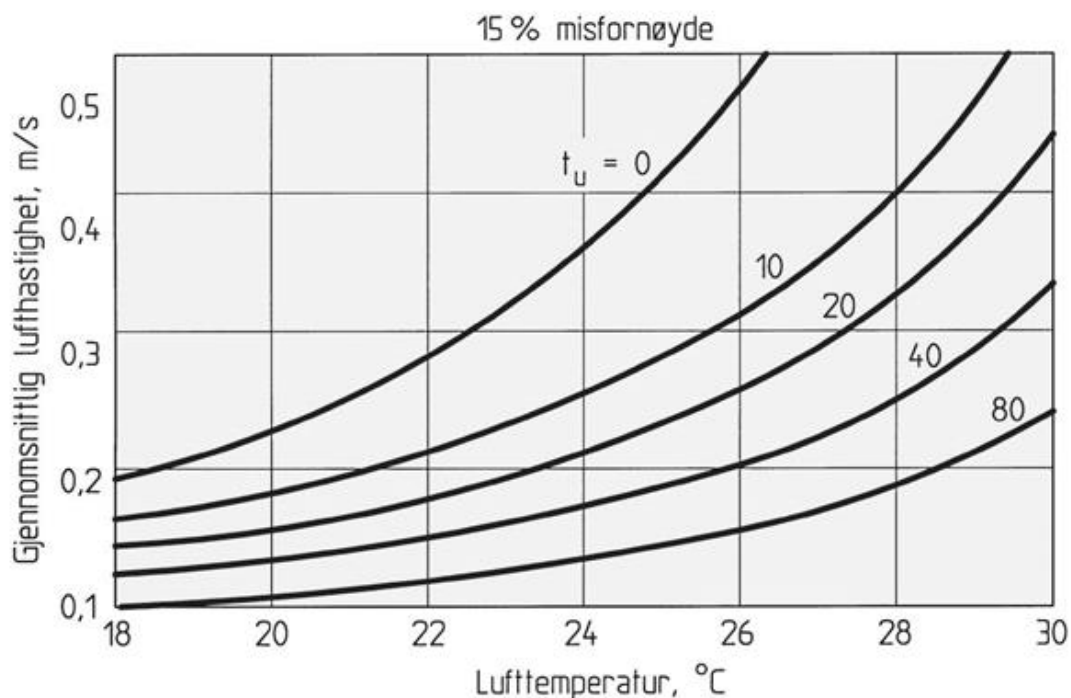
Tabell 2 - Anbefalte lufthastigheter i kontorbygg.(Byggforsk 2000)

Ubehag på grunn av trekk er ikke utelukkende bare knyttet til varmetap forårsaket av lokal kjøling. Stadig skiftende hudtemperatur på grunn av svingninger i lufthastigheten er også av betydning. Disse svingninger er forårsaket av luftturbulens. Høy luftturbulens er mer ubehagelig enn lav luftturbulens, selv om det totale varmetapet er det samme.(Byggforsk 1999) Luftturbulens er bestemt av turbulensintensiteten. Turbulensintensitet er definert som standardavviket for lufthastighet dividert med den gjennomsnittlige lufthastighet.

I et forskningsprosjekt utført av Fanger er det vist at det er stor forskjell på ved hvilke lufthastigheter det klages på trekk.(Fanger 1988) Fanger har undersøkt sammenhengen mellom påvirkning av turbulensintensiteten og risiko for trekk, for å anslå misnøye på grunn av trekk for personer i termisk nøytralitet. Resultatene viste at ikke bare lufthastigheten, men også dens turbulensintensitet er avgjørende for hvordan personer oppfatter trekk. En modell basert på disse undersøkelsene ble opprettet for å se andelen misfornøyde med inneklimate på grunn av trekk. Andelen misfornøyde (PD) er gitt av ligningen nedenfor, der faktorene gjennomsnittlig lufthastighet [$\bar{v} = 0,05 - 0,4 \frac{m}{s}$], lufttemperatur [$t_a = 20-26 \text{ °C}$] og turbulensintensitet [$T_u = 0-70 \%$] inngår.

$$PD = (34 - t_a)(\bar{v} - 0,05)^{0,62}(0,37 * \bar{v} * T_u + 3,14) \quad [\%]$$

Figur 2 viser en kombinasjon av lufttemperatur, turbulensintensitet og lufthastighet som resulterer i oppfattelsen av trekk, og gir 15 % utilfredse.(Byggforsk 1999) Økt turbulensintensitet resulterer i en senkning av lufthastigheter for å holde på et tilfredsstillende nivå under 15 %.



Figur 2 – Kombinasjon av lufttemperatur, turbulensintensiteten og gjennomsnittlig lufthastighet resulterer i at oppfattelsen av trekk gir en PPD verdi under 15 %. Grafen er gjengitt fra Byggforsk datablad 421.501. (Byggforsk 1999)

Det er gitt anbefalinger for lufthastigheter. Det norske arbeidstilsynet (Arbeidstilsynet 2012) gir en anbefaling om at lufthastigheter ikke bør overstige 0,15 m/s for å hindre trekk på arbeidsplasser med fysisk lett arbeid. Anbefalinger fra Sintef Byggforsk datablad 421.505 (Byggforsk 2000) gir mer konkrete verdier for kontorbygg om sommeren og vinteren, og under ulike kategorier. Disse verdiene er oppført i Tabell 3. Kategoriene 1, 2 og 3 refererer til tre ulike innemiljøkvaliteter, med henholdsvis 15, 20 og 30 % misfornøyde. Kategori 2 er tilsvarende som for de tekniske krav i TEK10.

Bygningstype	Kategori	Maksimal lufthastighet [m/s]	
		Sommer	Vinter
Kontorbygg	1	0.18	0.15
	2	0.22	0.18
	3	0.25	0.21

Tabell 3 -Anbefalte verdier for maksimal lufthastighet i løpet av sommeren og vinteren for et kontorbygg. Gjengitt fra Byggforsk Byggdetaljer 421,505. (Byggforsk 2000)

Økt lufthastighet benyttes for å redusere varmefølelsen på grunn av høy (Standard 2006) lufttemperatur. I varme perioder kan høye lufthastigheter øke frekvensen av fordampning fra huden som resulterer i en forbedret kjølefølelse. Ved dette prinsippet kan høyere lufthastigheter endre grensen for termisk komfort til det av høyere temperatur. Ved utnyttelse av dette, kan en person oppnå god termisk komfort, selv ved høye temperaturer. Dette fastslås i NS ISO 7730 (Standard 2006); "under sommerforhold kan temperaturen økes over det nivået som tillattes for komfort, hvis en innretning er anordnet til også å øke lufthastighet".

3.2.2 Personfaktorer

Det er bekleddingen og aktivitetsnivået i arbeidet som avgjør hvilken temperatur som føles mest behagelig. (Indeklimaportalen 2013)

Aktivitetsnivå

Aktivitetsnivået har stor betydning for den termiske komfort. Ved høyere aktivitetsnivå økes kroppens varmeproduksjon. Kroppens varmeproduksjon er i tillegg avhengig av personen helse, alder og kjønn. (Helsetilsynet)

Bekledning

Bekledningen er en faktor som gir den enkelte muligheten til å regulere for å tilpasse seg temperaturen innendørs. Variasjon fra vanlig innendørs vinterklær til lette sommerklær gir en tilpasningsmulighet på omtrent 4-5°C. (Helsetilsynet)

3.3 Krav til luftmengder

For å kunne diskutere hvordan luftmengder påvirker inneklimate ved behovsstyrt ventilasjon, er det viktig å få innsikt i hvilke grunner som ligger til rette for at blant annet næringsbygg ventileres.

Ventilasjon i yrkesbygg kan ha flere ulike hensikter. I helse- og komfortsammenheng har ventilasjon som hensikt å tilføre frisk luft, og isolere, fjerne eller tynne ut lukter og forurensninger, samt bidra til fuktighets- og temperaturkontroll i de ulike rommene i bygningen. (Stensaas and Hovland 2001) For å oppnå god luftkvalitet kreves det hyppig luftskifte, slik at overflødig varme, forurensninger, lukt og fukt fjernes fra byggets oppholdssoner. (Sørensen 2008) Mengden av ventilasjonsluft som tilføres de enkelte rom i en bygning har vesentlig betydning for hvor godt inneklimate blir. (Eggert 1993)

Avhengig av varmelaster i bygningen og kjøle-/oppvarmingssystem, kan luftbehovet for kjøling/oppvarming bli dimensjonerende for valg av luftmengder. (Byggforsk 1999) For ventilasjon i yrkesbygg stiller lovgivninger klare krav om luftskifte og luftkvalitet inne. (Arbeidstilsynet 2012) Når det gjelder bestemmelse av minimum luftmengde til et rom, er dette normalt gitt som summen av bidragene fra personbelastning, forurensning fra bygningsmaterialer og inventar, og forurensning fra arbeidsaktivitet og prosesser. I TEK10 er krav til minimum ventilasjon, i byggverk for publikum og arbeidsbygning, begrenset til minimumsluftmengder i forhold til person- og materialbelastning (Byggforsk 2005)(TEK 10, § 13-3):

- *I byggverk for publikum og arbeidsbygning skal frisklufttilførsel på grunn av forurensninger fra personer med lett aktivitet være minimum 26 m³ pr. time pr. person. Ved høyere aktivitet skal frisklufttilførsel økes slik at luftkvaliteten blir tilfredsstillende.*
- *Friskluft på grunn av lukt og irritasjonseffekter fra stoffer som avgis fra bygningsmaterialer og inventar, skal minimum være 2,5 m³ pr. time pr. m² gulvareal når bygningen eller rommene er i bruk. Frisklufttilførsel når bygningen eller rommene ikke er i bruk skal være minimum 0,7 m³ pr. time pr. m² gulvareal.*

Krav til minimum luftmengder, i henhold til TEK10 krav, i ulike typer lokaler i kontorbygg er oppsummert i Tabell 5. Tabellen forutsetter et bevisst valg av lavemitterende materialer, der materialfaktoren er 1 l/s pr. m². Kravene i tabellen er fastsatt ut fra hensyn til luftkvalitet. Det tas utgangspunkt i netto areal for rommet.

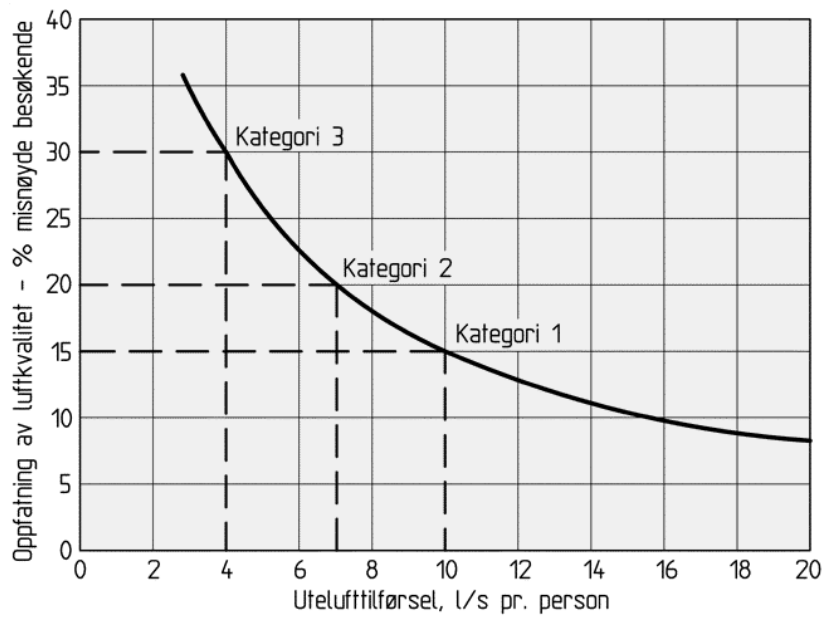
Bygningstype	Personfaktor l/s pr.	Person- belastning m ² /person	Luftmengde l/s pr. m ²
Cellekontor	7	12	1,5
Kontorlandskap	7	15	1,5
Konferanserom	7	2	4,5
Auditorium	7	0,7	11

Tabell 4 - Anbefalte luftmengder baser på personbelastning i de ulike rom

	Personbelastning person/m ²	Kategori	Operativ temperatur °C		Maksimal lufthastighet m/s		Tilført luftmengde l/s pr. m ²
			Sommer	Vinter	Sommer	Vinter	Lav-emitterende materialer
Cellekontor	0,1	1	24,5 ± 1,0	22,0 ± 1,0	0,18	0,15	2,0
		2	24,5 ± 1,0	22,0 ± 2,0	0,22	0,18	1,4
		3	24,5 ± 1,0	22,0 ± 3,0	0,25	0,21	0,8
Kontor-landskap	0,07	1	Som cellekontor		Som cellekontor		1,7
		2	Som cellekontor		Som cellekontor		1,2
		3	Som cellekontor		Som cellekontor		0,7
Konferanserom	0,5	1	Som cellekontor		Som cellekontor		6,0
		2	Som cellekontor		Som cellekontor		4,2
		3	Som cellekontor		Som cellekontor		2,4
Auditorium	1,5	1	Som cellekontor		Som cellekontor		16,0
		2	Som cellekontor		Som cellekontor		11,2
		3	Som cellekontor		Som cellekontor		6,4

Tabell 5 - Krav til minimum ventilasjon for ulike rom i et kontorbygg. (Byggforsk 1999)

Figur 3 viser at større lufttilførsel i ventilasjonsanlegg gir større andel tilfredse.



Figur 3 - Sammenhengen mellom tilførsel av uteluft pr. person og prosentandel misnøyde besøkende. grafen er gjengitt fra Byggforsk datablad 421.505. (Byggforsk 2000)

I grafen er det tatt utgangspunkt i hvordan folk som kommer utenfra og inn i et rom opplever luftkvaliteten.

4 Termisk komfort

4.1 Introduksjon

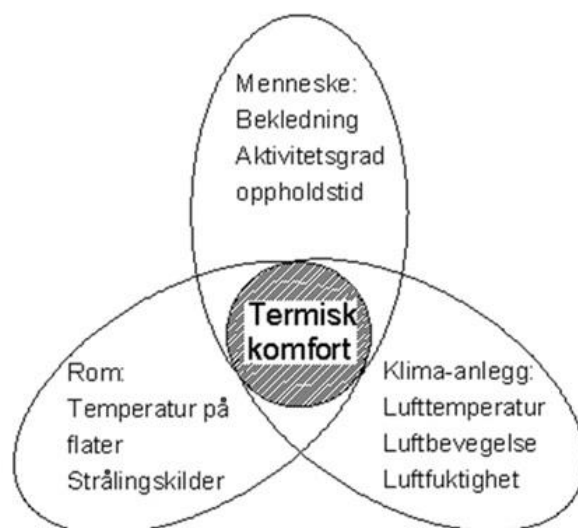
Mennesker oppfatter først og fremst inneklimate av luftkvaliteten og de termiske forhold. Termisk komfort anvendes for å kunne vurdere det termiske inneklimate. Det følgende kapitlet om termisk komfort bidrar til å danne rammen for denne rapporten.

4.2 Termisk komfort i næringsbygg

For et ventilasjonsanlegg er det ikke bare tilstrekkelig å fjerne varme og forurenset luft, da det også er nødvendig å fordele og kontrollere luftbevegelsene i rommet på en slik måte at termisk komfort blir oppnådd i oppholdssonen.

Termisk komfort defineres som en sinnstilstand der mennesker uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelser. Det er i denne forbindelse viktig å påpeke at det skilles mellom det som påvirker termisk komfort, og det som bestemmer komfort. Det er kroppens reaksjoner som bestemmer komfortopplevelsen, og ikke de romklimatiske faktorene i seg selv. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)

Termisk komfort påvirkes av;	
Luftens tørrkuletemperatur	Luftens vanndampinnhold
Termisk stråling i rommet	Personen aktivitetsnivå
Luftens hastighet og turbulens	Personen bekleddningsnivå
Oppholdstid	Alder
Termiske egenskaper; bord, stol, golv etc	Kjønn
Kroppens stilling; stå, sitte, ligge etc	Sinnstilstand
	Tretthet
	Psykisk legning
	Sult, metthet, fordøyelse
Termisk komfort bestemmes av;	
Hudtemperatur, 32-34 °C	
Kjernetemperatur, 37-38 °C	
Svettesekresjon, hudvåthetsgrad < 0,25	



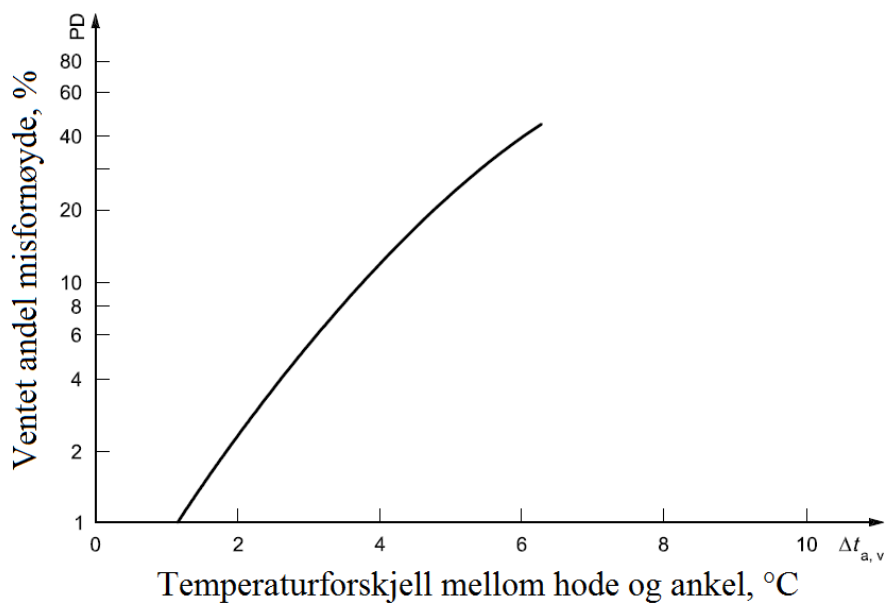
Tabell 6 - Bestemmelse og påvirkning av termisk komfort. På figur til høyre kan en se at termisk komfort er et samspill mellom bygning, tekniske installasjoner og mennesker. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)

Romsystemets funksjon består av luftbevegelser, temperaturforhold, luftfordeling og strømningsmønster, og er et samspill mellom måten luften tilføres i et rom, aktiviteten i rommet, klimaskjermen og uteklimate. Verdt å merke seg er det uønsket lokal oppvarming eller nedkjøling av enkelte kroppsdeler kan føre til lokal termisk diskomfort. Dette til tross for at kroppen som helhet er termisk nøytral, og kan være forårsaket av de 2 neste følgende faktorene.

4.2.1 Vertikal temperaturforskjell

Et begrep som er av særlig betydning for termisk komfort er den vertikale temperaturgradienten, altså temperaturforskjellen i de ulike deler av rommet. Dette kan for eksempel være

temperaturforskjellen mellom hode- og ankelhøyde. Det må ikke oppstå for store temperaturforskjeller i oppholdssonen, for det kan gi følelser av trekk selv når luften blir tilført med moderat fart. Dersom lufttemperaturforskjellen mellom hode og ankelhøyde blir for stor, er det forventet at personer opplever lokalt ubehag. Figur 4 viser antall stillesittende mennesker i prosent som forventes å oppleve lokalt ubehag som funksjon av lufttemperaturforskjellen mellom hode og ankelhøyde. Hvis det aksepteres 5 % misfornøyde, tilsvarer dette en temperaturforskjell mellom hode og ankelhøyde på 3°C. (Krog and Gundersen Per 2003) (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007)



Figur 4 - Prosent misfornøyde som funksjon av forskjellen mellom lufttemperaturene i hode- og ankelhøyde. (Standard 2006)

4.2.2 Asymmetrisk temperaturstråling

Når personer utsettes for asymmetrisk temperaturstråling kan enkelte få ubehag fordi deler av kroppen føles kald, mens andre deler føles varm. Asymmetrisk eller ensidig stråling kan f.eks. skyldes et stort kaldt vindu eller strålingsvarme fra taket. (Espejord 2002)

4.3 Menneskers oppfatning av termisk komfort

Termisk komfort spiller en viktig rolle i hvordan innemiljøet oppfattes av en person. Som med komfort parametere generelt, er termisk komfort og opplevelsen av innemiljøet svært subjektivt. (SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet 2007) Mennesker reagerer forskjellig på innemiljøfaktorer. Noen er følsomme f.eks. for temperaturvariasjoner og er vanskelige å tilfredsstille, andre er mindre følsomme.

En persons oppfatning av termisk komfort er definert av følgende parametre; aktivitetsnivå, bekledding og termisk inneklime. Aktivitetsnivå og bekledding betraktes som eksterne parametere, mens det termiske inneklime består av fysiske parametere som temperatur, luftfuktighet og lufthastighet. (Byggforsk 1999)

Til tross for dagens omfattende styringssystemer og strenge krav til termisk komfort, klages det fortsatt på inneklimaet. Klager på ventilasjon og klager på temperatur kan trygt ses i sammenheng. Det viser seg nemlig i praksis at de fleste klager på dårlig ventilasjon særlig fremkommer ved for høye temperaturer. Dette får folk til å tro at luftvekslingen er for lav når det klages over for dårlig ventilasjon. Imidlertid viser det seg at luftvekslingen er et dårlig mål for å bedømme et ventilert roms «friskhet». Faktorer som lufthastighet og romtemperatur influerer langt sterkere på folks bedømmelse av romluftens «friskhet» enn tilførselen av ventilasjonsluft. (Røstad 1973)

En vesentlig årsak til menneskers opplevelse av inneklimaet og eventuelle klager, skyldes også de individuelle forskjeller som eksisterer mellom de krav mennesker stiller til et komfortabelt inneklima. Kravet til romluften vil variere fra person til person, avhengig av påkledning, arbeid, fysiske tilstand, alder, kjønn osv. Den samme person vil også stille forskjellige krav til bl.a. romtemperaturen, avhengig av tid på dagen, årstid, helsetilstand osv. Derfor er det svært krevende å sette opp normer for romluftens tilstand som vil bli akseptert av alle. En må prøve å ligge innenfor et område hvor de fleste blir fornøyd. Økonomiske og energimessig hensyn setter i tillegg grenser for et inneklima som er akseptabelt for alle. (Sørensen 2008)

4.4 Komfortindeksene PMV og PPD

En nødvendig, men ikke tilstrekkelig betingelse for termisk komfort, er at omgivelsene gir termisk nøytralitet for kroppen som helhet. Dette innebærer at mennesker ikke har noe generelt ønske om høyere eller lavere omgivelsestemperatur. Den samlede påvirkningen av parametrene for termisk inneklima kan beskrives ved hjelp av komfortindeksene PMV og PPD. Disse indeksene baserer seg på Fangers empiriske undersøkelser på hvordan personer reagerer på ulike innemiljøer.

PMV

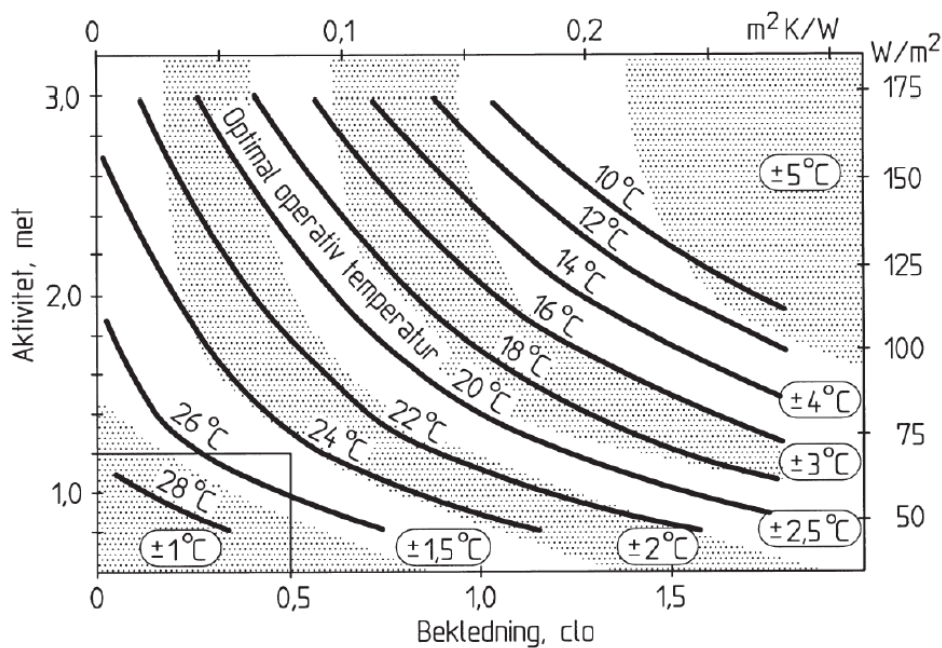
PMV-indekset (Predicted Mean Vote) forutsier gjennomsnittet av de vurderinger som en større gruppe vil gi, når de utsettes for det samme termiske miljøet. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996) Indeksen benytter en 7-trinns psyko-fysisk skala for å angi menneskers termiske tilstand i termiske omgivelser.

Operativ temperatur

Operativ temperatur er gjennomsnittet av lufttemperatur og overflatens temperatur (middelstrålingstemperatur), og er et godt mål for opplevd temperatur. I de fleste normale tilfeller er det ikke vesentlig forskjell på lufttemperatur og den operative temperatur. Dette gjelder så lenge forskjellen mellom middelstrålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4°C, lufthastigheter er mindre enn 0,2 m/s, og det ikke er svært høy luftfuktighet. Operativ temperatur brukes som et samlet mål på termisk klima i forhold til varmekomfort i kroppen som helhet. (Arbejdsilsynet) (Espejord 2002)

Figur 5 viser et diagram for optimal operativ temperatur ved ulik beklledning [clo] og aktivitet [met]. De skraverte og hvite feltene markerer temperaturintervaller rundt optimal operativ temperatur der ventet gjennomsnittlig vurdering, PMV, tilsvarer mindre enn 10 %

misfornøyde.(Byggforsk 1999)



Figur 5 - Optimal operativ temperatur, avhengig av ulike nivåer av temperatur og bekledding, gir forutsetning for PPD < 10 %. (Byggforsk 1999)

Optimal temperatur gir en forventet gjennomsnittlig PMV lik 0 (PPD = 5 %). Som markert i Figur 5, vil bekledding på 0,5 clo og aktivitetsnivå på 1,2 met resultere i en operativ temperatur på omtrent 24,5 °C. I tillegg vil en PPD-verdi under 10 % tillatte avvik fra den optimale temperatur på ± 1,5 °C. (Byggforsk 1999)

Når det gjelder operative temperaturer er det gitt retningslinjer og anbefalinger for temperaturkrav for TEK10-bygninger, basert på aktivitetsnivå. Disse anbefalingene er vist i Tabell 7. Anbefalinger fra Byggforsk Byggdetaljer 421.505 (Byggforsk 2000) er listet opp i Tabell 7.

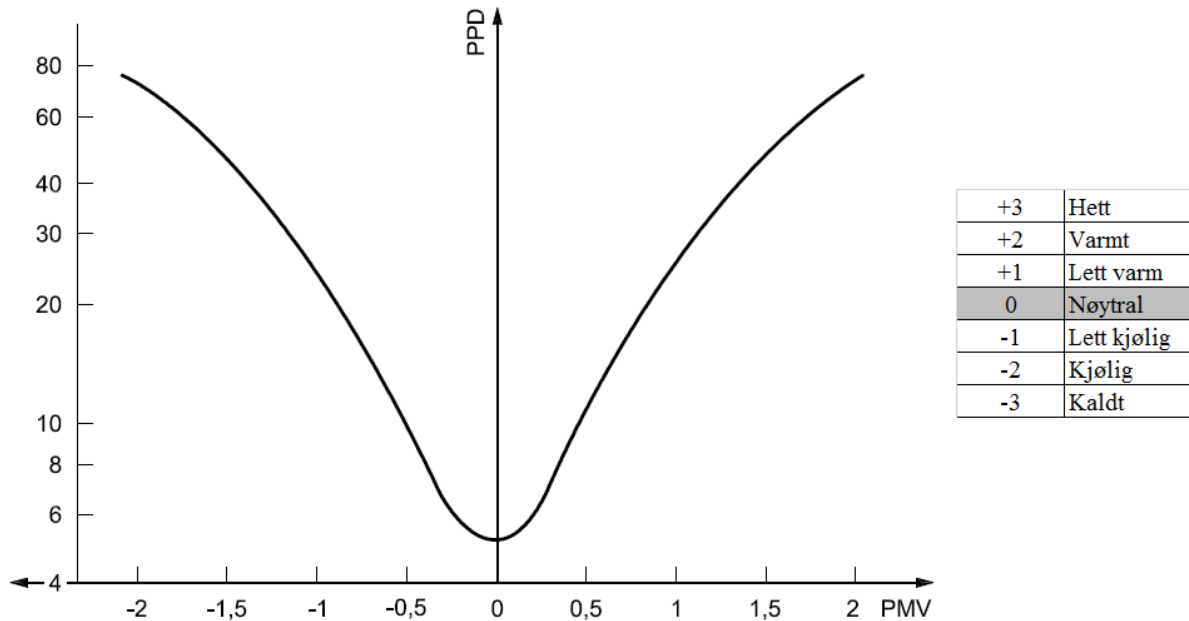
Bygningstype	Kategori	Operativ temperatur [°C]	
		Sommer	Vinter
Kontorbygg	1	24.5 ± 1.0	22.0 ± 1.0
	2	24.5 ± 1.5	22.0 ± 2.0
	3	24.5 ± 2.5	22.0 ± 3.0

Tabell 7 - Anbefalte verdier for operativ temperatur om sommeren og vinteren i et kontorbygg. Tabellen er gjengitt fra Byggforsk Byggdetaljer 421.505.(Byggforsk 2000)

Forskning på adaptiv termisk komfort antyder at temperaturen som oppfattes som mest komfortabel inne i en bygning er en funksjon av utetemperaturen. Dette betyr at med høye utetemperaturer er høyere temperatur inne både akseptert og foretrukket. (Dokka and Vik 2001) Dette er vist ved anbefalingene i tabellen ovenfor, hvor anbefalte temperaturer er høyere om sommeren enn om vinteren.

PPD

PPD-indeksen forutsier den prosentvise andelen av en gruppe personer som vil være misfornøyd med et gitt termisk inneklima med gitt bekleddning og aktivitet. Etter beregnet PMV-indeks kan PPD-indeksen beregnes. (Norges standardiseringsforbund 1995) Figur 6 illustrerer sammenhengen mellom PMV og PPD. En PMV verdi på 0 resulterer i en PPD verdi på 5%, noe som tyder på at det ikke finnes et bestemt inneklima som kan tilfredsstille alle. Anbefalinger i NS-EN ISO 7730 (Standard 2006) er PMV verdier i området -0,5 til 0,5, noe som resulterer i en PPD verdi under 10%.

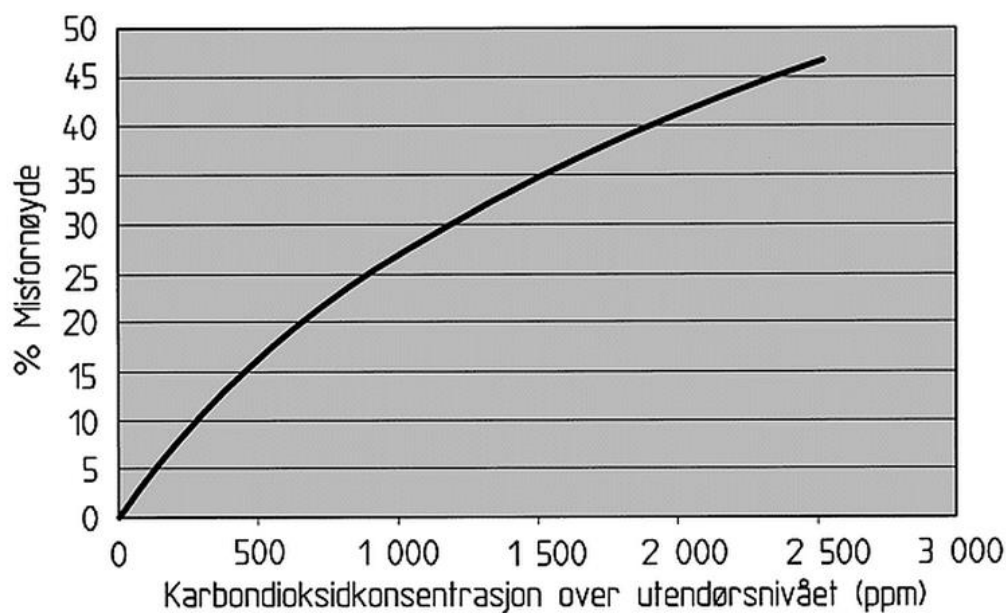


Figur 6 -- Illustrasjon av forholdet mellom PMV og PPD. Fra Byggforsk Byggdetaljer 421,501. (Byggforsk 1999)

Vurdering 0 angir termisk nøytralitet, altså en tilstand der en person ikke ønsker omgivelsene varmere eller kaldere. PMV verdier på 2 eller mer (-3,-2,+2,+3) anses å representere misnøye. (Nilsson and Commtech Group 2003) Tabellen til høyre i figuren er basert på personfaktorer, bekleddningens isolasjon [clo] og aktivitetsnivå [met], i tillegg til gjennomsnittlig strålingstemperatur, lufthastighet og luftfuktighet. (Olesen 2000)

Sammenhengen mellom ventet antall misfornøyde og konsentrasjonen av karbondioksid over utendørsnivået er vist i Figur 7. Kurven forutsetter at det ikke er andre forurensningskilder

enn mennesker i lokalet. (Byggforsk 1999)



Figur 7- Sammenhengen mellom ventet antall misfornøyde og konsentrasjonen av karbondioksid over utendørsnivået.(Byggforsk 1999)

		Enhet	Kategori		
			1	2	3
Operativ temperatur	Vinter	°C	21 - 23	20 - 24	19 - 25
	Sommer	°C	23,5 - 25,5	23 - 26	22 - 27
Lufthastighet	Vinter	m/s	< 0,15	< 0,18	< 0,21
	Sommer	m/s	< 0,18	< 0,22	< 0,25
Vertikal temperaturforskjell		K	< 2	< 3	< 4
Strålingsasymmetri	Varmt tak	K	< 5	< 5	< 7
	Kaldt tak	K	< 14	< 14	< 18
	Kaldt vegg	K	< 10	< 10	< 13
	Varm vegg	K	< 23	< 23	< 35
Golvtemperatur		°C	19 - 29	19 - 29	17 - 31

Figur 8 -Termisk innemiljø. Eksempel på krav til ulike faktorer. Gjelder for stillesittende, rolig aktivitet.(Byggforsk 2000)

5 Luftstrømning i rom

5.1 Introduksjon

For at et ventilasjonsanlegg skal lykkes i å tilfredsstille krav til inneklime, må blant annet de termiske og atmosfæriske forholdene i oppholdssonen opprettholdes. Lufttilførselen og følgelig luftstrømningen i rom har stor betydning for hvor effektivt et rom blir ventilert og klimatisert. (Awbi 1989) For utformingen av et ventilasjonssystem vil det være nødvendig å kjenne til grunnleggende fluiddynamiske relasjoner ved interaksjon mellom tilluft, romluft, varmekilder og kjølelegemer. (Reinartz 1983)

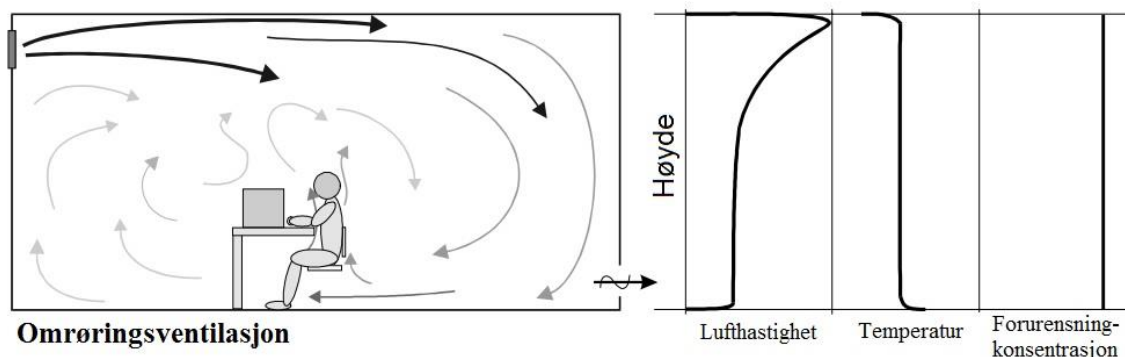
5.2 Ventilasjonsprinsipper

Det vil alltid være luftbevegelser i rom på grunn av temperaturforskjeller. Luftstrømningen i rom er først og fremst hvordan luften tilføres rommet, altså type ventilasjonsprinsipp. Valg av ventilasjonsprinsipp er avhengig av mange faktorer, da spesielt med tanke på rommets funksjon i bygget. Ventilasjonsluft kan tilføres rom på ulike måter, og det er i denne rapporten valgt å nevne de to mest anvendte ventilasjonsprinsippene i kontorbygg med mekanisk balansert ventilasjon, nemlig omrøringsventilasjon og fortrengningsventilasjon. Siden det i denne rapporten er benyttet omrøringsventilasjon, vil dette prinsippet bli mer vektlagt og mer omfattende utdypet i denne delen. (Toftum)

5.1.1 Omrøringsventilasjon

Ved omrøringsventilasjon tilføres luften først i en sone utenfor oppholdssonen, som reduserer hastighet og temperaturdifferanser til et komfortabelt nivå før luften strømmer inn i oppholdssonen. Tilluften river med seg store mengder romluft og spres så inn i rommet slik at de termiske forhold og eventuelle forureningskonsentrasjoner er ensartet i hele rommet eller i en spesifikk sone av rommet (oppholdssonen). (Stensaas and Hovland 2001) Temperaturen vil jevne seg mye ut i strålen, og ikke langt fra utløpet vil luftstråletemperaturen ha nærmet seg den gjennomsnittlige romtemperaturen. (Stensaas and Hovland 2001)

Karakteristisk ved omrøringsventilasjon er jevn temperatur og forurensning i hele rommet.



Figur 9 -Skjematisk fremstilling av omrøringsprinsippet. Til venstre er strømningsmønster og til høyre er lufthastighet, temperatur og forurensning som funksjon av høyde.

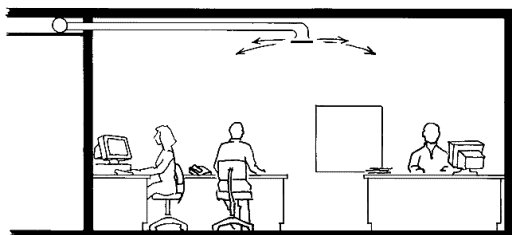
Tilførselsdon for omrøringsventilasjon

Tilførselsdon utføres med ulike utforminger, men med flere felles karakteristiske egenskaper. I omrøringsystemer skiller det mellom tre hovedgrupper for tilførselsdon. Disse tre hovedgruppene er avhengig av egenskapene til luftstrålene som dannes. I denne rapporten er det med hensyn på tilluftsanordningen i prøverommet, lagt mest fokus på å utdype omrøring med diffusorer. (Skåret 2000)

Omrøring med diffusorer

Den vanligste formen for omrøringsventilasjon i yrkesbygg er tilførsel med diffusorer fra tak. Det finnes ulike diffusorer for hvert ønsket formål. Diffusorene kan tilføre luft med under- eller overtemperatur (temperaturforskjell på 10-12 °C i forhold til romluft) i lokaler med normale takhøyder. Blandeprosessen ved omrøring forårsaker at volumstrømmen øker, temperaturen i strålen utjevnes og lufthastigheten avtar med avstanden fra donet. For at lufthastigheten ikke skal skape trekk i oppholdssonen, er det viktig med et visst luftvolum utenfor oppholdssonen, og en viss avstand til oppholdssonen (Skåret 2000)

I det luftstrålen treffer oppholdssonen skal den ha tilnærmet lik temperatur som romluften, og lufthastigheten skal vanligvis være redusert til 0,15 – 0,2 m/s. (Saracevic 2007)

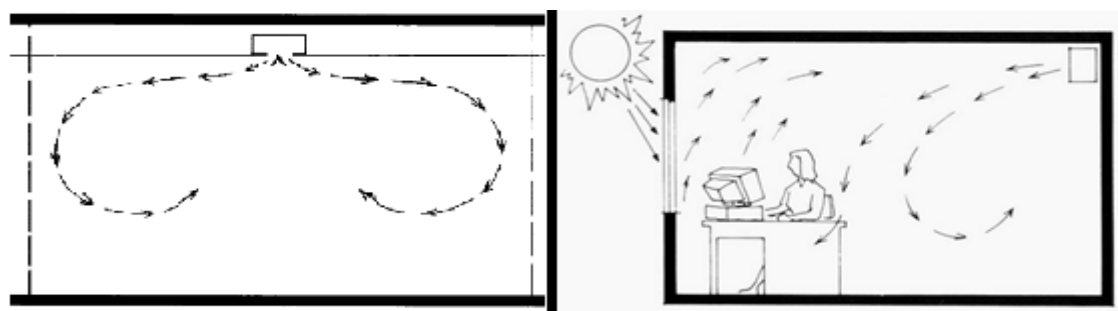


Figur 10 - Omrøringsventilasjon med radielle don i himling. (Byggforsk 1996)

Ved å tilføre luft i større avstand fra oppholdssonen, kan man tilføre luft med lavere temperatur enn romluften, typisk 8-10°C lavere. Dette medfører at ventilasjonsluften har større kjølekapasitet, og mulighet for å minke temperaturen i oppholdssonen, uten at det påfører termiske ubehag.

Andre tilluftsanordninger for omrøring

Strømningsbildet for lange spalter i himlingen og omrøring med tilførsel fra bakkant er andre måter for tilførsel av luft med omrøringsprinsippet. De ulike anordningene er vist i Figur 11. (Byggforsk 1996)



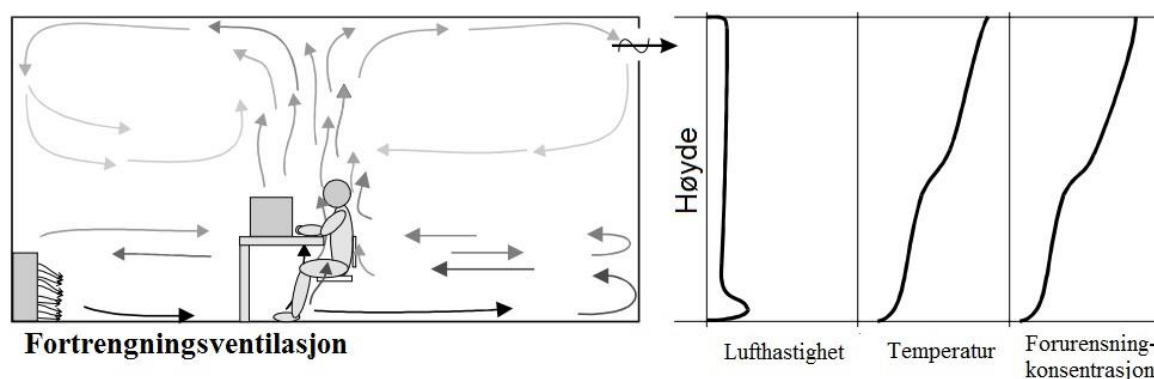
Figur 11 – Til venstre er det vist lange spalter i himling eller under himling, til høyre er det vist omrøringsventilasjon med tilluftsdon i bakkant av rommet. (Byggforsk 1996)

5.1.2 Fortrengningsventilasjon

I motsetning til omrøring er diffus ventilasjon, eller såkalt fortrengningsventilasjon, basert på at luften tilføres ved gulvet uten impuls. I dette prinsippet blir det ikke like stor temperaturutjevning i strålen som ved omrøringsventilasjon, noe som setter begrensninger på bruk av enten over- eller undertemperatur i forhold til romluften. (Loomans 1998)

Tilførsel av luft skjer gjennom at luft med en undertemperatur på normalt 1-2 °C i forhold til romluftstemperaturen siver inn nær gulvet og med lav hastighet (omtrent 0,2 m/s i yrkesbygg). Luften stiger så opp, som følge av konveksjonsstrømmer fra varmekilder i rommet, og tar med seg eventuelle forurensninger til avtrekket som er plassert i taket. Virkemåten er at den nye luften fortrenger bruktlufta og ikke blander seg med den. Fortrengningsprinsippet gjør det i tillegg mulig å tilføre større luftmengder enn ved konsentrert lufttilførsel. (Skåret 2000)

Karakteristisk ved fortrengningsventilasjon er den vertikale temperaturen og konsentrasjonsgradienten av forurensning, der det er forholdsvis ren og frisk luft i nedre del av rommet, mens i det øvre laget ligger relativt varm og forurenset luft. Disse karakteristiske trekkene er vist i Figur 12. (Loomans 1998)



Figur 12 - Skjematisk fremstilling av fortrengningsprinsippet; strømningsmønster (til venstre) og variable gradienter av høyden (til høyre). (Loomans 1998)

5.3 Ventilasjonseffektivitet

5.3.1 Introduksjon

Ventilasjon utgjør en betydelig andel av energikostnadene til drift av moderne bygg. Før luften kan tilføres rom må den behandles (oppvarmes eller kjøles, filtreres mm), og dette krever mye energi. Ventilasjon som prosess består i å tilføre et rom frisk luft og føre bort brukt luft på en slik måte at målsettingen med ventilasjon oppnås mest mulig effektivt. For ventilasjon med henblikk på helse og termisk komfort er det spesielt viktig å se til at menneskene som oppholder seg i rommet får størst mulig nytte av ventilasjonsluften. (Eggert 1993) (Skåret 2000)

For å kunne vurdere et ventilasjonsprinsippets effektivitet, er det innført uttrykk, med det formålet å gi et mål for ventilasjonsprinsippets ytelse relatert til den ventilasjonstekniske innsats. Ventilasjonseffektivitet og luftvekslingseffektivitet er de vanligste størrelser for klassifisering

av hvor effektiv ventilasjonsluften som tilføres rommet er. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996)

5.3.2 Ventilasjonseffektivitet

Ventilasjonseffektivitet er et mål for hvor hurtig en forurensning transporteres bort fra rommet. Den angir konsentrasjonen i avtrekkskanalen i forhold til middelkonsentrasjonen i rommet. Ventilasjonseffektiviteten kan uttrykkes ved (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996):

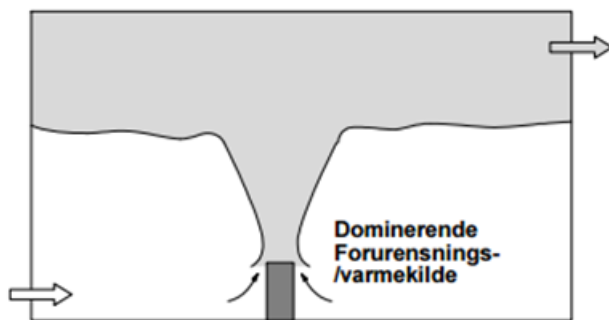
$$\varepsilon_v = \frac{c_u}{c_{op}}$$

ε_v = ventilasjonseffektiviteten

c_u = forurensningskonsentrasjonen i avtrekksluften [kg/m^3]

c_{op} = forurensningskonsentrasjonen i oppholdssonen [kg/m^3]

Ventilasjonseffektiviteten er nyttig når man skal se hvor effektiv ventilasjonen er i et rom med én eller få forurensningskilder, slik som vist i Figur 13.



Figur 13 - Ventilasjonseffektiviteten er nyttig når man skal se hvor effektiv ventilasjonen er i et rom med én eller få forurensningskilder. (Sørensen 2008)

5.3.3 Luftvekslingseffektiviteten

Luftvekslingseffektiviteten er et kvantitativt tall som beregnes og er et mål på hvor effektivt luften blir skiftet ut i rommet. Definisjonsligning for luftvekslingseffektivitet er gitt ved (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996):

$$\Omega_a = \frac{\tau_n}{2\tau}$$

Ω_a = luftvekslingseffektivitet,

τ_n = ventilasjonssystemets nominelle tidskonstant

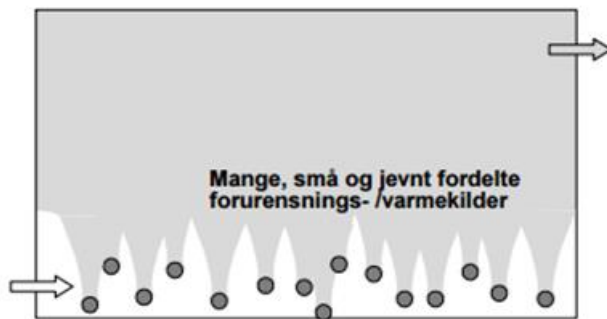
τ = luftens gjennomsnittsalder i rommet

Luftutvekslingseffektiviteten er for henholdsvis fullstendig omrøring og fortregning vist i Tabell 8.

Ventilasjonsprinsipp	Utskiftningstid (τ_r) for luften i rommet	Luftvekslingseffektivitet (Ω_a)
Omrøring	$\tau_r = 2\tau_n$	$\Omega_a = 50 \%$
Fortrengning	$\tau_n < \tau_r < 2\tau_n$	$50 < \Omega_a < 100 \%$

Tabell 8 - Utskiftningstiden for luften i rommet ved ulike ventilasjonsprinsipp. Tabellen er gjengitt fra STÅBI. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996)

Luftvekslingseffektiviteten er et tilsvarende måltall som brukes i rom med flere forurensninger jevnt fordelt, slik som vist i Figur 14. Dette tilfellet gjengir godt hvordan forurensningsbildet kan se ut i et møterom med mange personer.



Figur 14 - Luftvekslingseffektiviteten er et tilsvarende måltall som brukes i rom med flere forurensninger jevnt fordelt. (Sørensen 2008)

Oppsummering av luftstrømning i rom

Komfortopplevelsen i et rom blant annet tett knyttet opp mot luftbevegelsene i oppholdssonen. Luftstrømning i rom er i stor grad avhengig av valgt ventilasjonsprinsipp (strømningsbilde) og de resulterende egenskapene til luftstråler, men de blir i tillegg påvirket av termiske strømninger fra for eksempel personer, kaldras fra vinduer og utettheter i bygningskonstruksjonen. Andre faktorer som påvirker luftbevegelsene i et rom kan for eksempel være rommets utforming, møblering og innredning. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996) I tillegg vil det i et ventilert rom være et bredt spenn av lufthastigheter og lagdelinger innen temperatur. Denne blandingen av ulike atferder og fenomen gjør at luftstrømning i rom er krevende å forutsi.

Ved å simulere luftstrøm ved hjelp av CFD-verktøy kan man derimot oppnå resultater som eller er vanskelig å oppnå med andre metoder. Bruk av CFD for å forutsi konvektiv varmeoverføring, væske- eller gasstrømning har revolusjonert mange fagfelt, blant annet luftfart, kjernekraft og miljøteknologi. CFD er relativt nytt innen analyser og predikasjon av luftbevegelser i rom. I motsetning til de fleste problemer i fluiddynamikk, består luftbevegelser av mange ulike fenomen som f.eks. laminær og turbulent strømning, konveksjonsstrømmer og tilfeldig bevegelse i varmegenererende objekter. (Spengler, McCarthy et al. 2001)

6 Luftstråler

6.1 Introduksjon

I dette kapittelet beskrives horisontale luftstrålers oppførsel ved tilførsel i et ventilert rom. Det vil bli gitt en kort innføring av de ulike luftstrålene, og følgelig de fenomen og ulike innvirkninger som forekommer i innblåsningsområdet.

Som et resultat av at luftstrømmen i rom er karakterisert som ikke-isoterm, turbulent, tre-dimensjonal og ikke-stabil(non-steady), er det krevende å forutsi luftstrømning i rom, og mye av forskningen på dette området er eksperimentelt og empirisk.

Beregninger av luftstråler og luftstrømning i ventilerte rom kan gjennomføres på ulike måter. Den ene måten er å løse Navier-Stokes ligninger og energi-ligningen sammen med relevante turbulensmodeller. Dette kan da bare gjøres numerisk og ved hjelp av CFD (Computational Fluid Dynamics). (Skåret 1976)

Den andre metoden er mer empirisk og grov, og baserer seg på at luften tilføres rommene som frie stråler og veggstråler. Hastighets- temperaturprofiler i slike stråler er forholdsvis godt undersøkt og det er ønskelig å bygge på disse kjente forholdene så langt det er mulig. (Skåret 1976)

Det finnes også en tredje mulighet til å fastlegge strømningsforholdene, nemlig den rent eksperimentelle. Ved å bygge en modell av det ventilerte rommet i en passende skala kan luftstrømningsforholdene kartlegges rent eksperimentelt. (Skåret 1976)

Det er de empiriske metodene som vil bli behandlet i dette kapittelet. De metodene går ut på å beregne elementærproblemer basert på å løse de integrerte bevegelses- og energiligningene i grensesjikt av forskjellige typer stråler, som frie stråler, veggstråler eller konveksjonsstrømmer. De størrelser som interesserer mest i strålen er blant annet sentralhastigheten og sentraltemperaturen. (Skåret 1976)

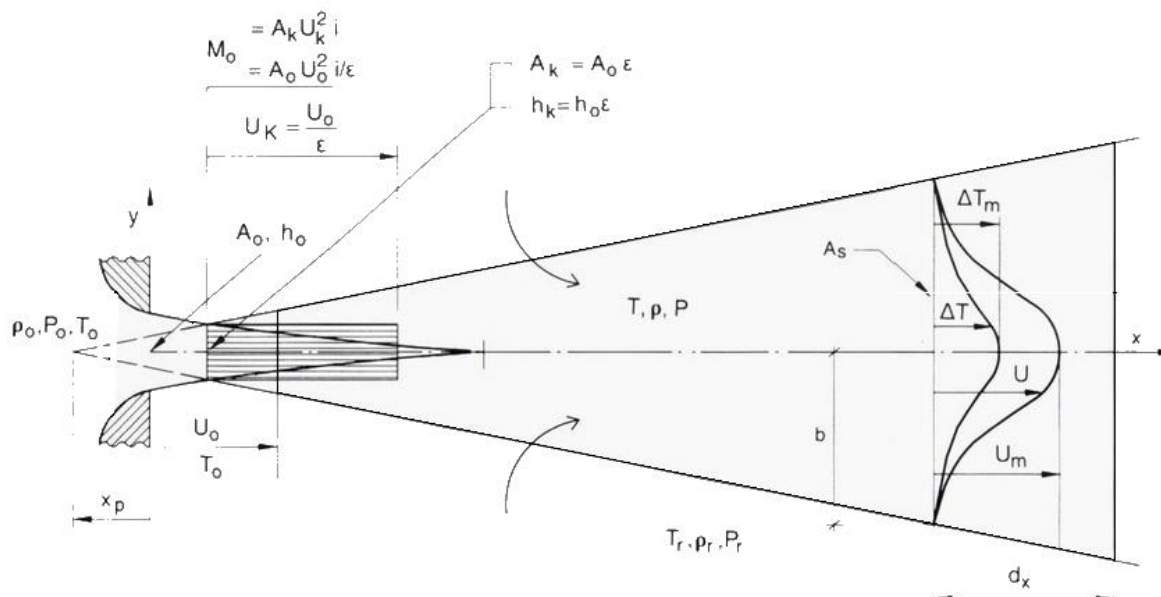
De empiriske metodene gir ikke nøyaktige løsninger for hele strømningsfeltet, men feltene med høye hastigheter og temperaturgradienter kan kartlegges og beregnes med rimelig nøyaktighet. (Skåret 1976)

Problematikken i forbindelse med tilførsel av ventilasjonsluft i ventilerte rom er i store trekk knyttet til jetstrømninger. Grunnleggende teori om luftstråler er derfor av stor betydning for beregning av ventilasjonsforholdene i rommet, og vil derfor bli først behandlet i dette kapittelet. (Skåret 1976)

6.2 Horisontale luftstråler

Luftstråler har selvbevarende karakter, noe som blant annet innebærer at strømningsforholdene er likedannede i forskjellige tverrsnitt av strømmingen. Strømmingen er turbulent, men all lovmessighet knytter seg til middelveidene. Trykket i og utenfor strålen er praktisk talt det samme, noe som medfører at bevegelsesmengden eller impulsen integrert over hele stråletverrsnittet er konstant utetter strålen. Videre har det vist seg at varmetransporten er turbulent slik at varmeinnholdet i strålen også er konstant utetter strålen. (Skåret 1976)

Når luft tilføres gjennom en tilluftsåpning, blir retningen og hastigheten etablert i en avstand fra utløpet, og en luftstråle blir dannet. Luftstrømmen fra en tilluftsventil strømmer inn i stasjonær og ellers stillestående romluft, og det oppstår et grensesjikt mellom strålen og omgivende luft, se Figur 15.



Figur 15 - Skjematisk skisse av jetstrømning med symbolangivelse. (Skåret 1976)

Luftstrømningen vil i grensesjiktet rive med seg luft fra omgivelsene (induksjon), og luftmengden som strømmer i hovedretningen øker med økende avstand fra utgangspunktet. Lufthastigheten i strålen blir redusert som et resultat av medrevet luft, men til gjengjeld har den totale luftmengden økt. (Hørup Sørensen, Stampe et al. 1996)

Strømningen brer seg vinkelrett i hovedretningen, og har liten utbredelsesvinkel. Økningen i y-retningen er liten i forhold til x-retningen, noe som gjør utbredelsen tilnærmet lineær. Strålens utbredelsesvinkel γ er for plane stråler ca. 33° , og for aksesymmetriske stråler ca. 24° . Ved matematisk tilnærming av en luftstråle, er bevegelsesmengden av en fri stråle i stasjonært luft bevart langs den horisontale akse i strålen. I hovedavsnittet, altså avsnittet der strålen er fullt utviklet, er hastighetsprofilene og temperaturprofilene likedannede. (Skåret 2000)

Det skilles mellom tre ulike typer luftstråler basert på denne typen. Disse er aksielle, radielle og plane stråler. I dette kapitlet blir disse stråletypene nærmere tatt i betraktning.

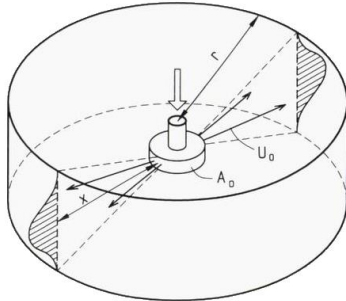
6.3 Radielle stråler

Etttersom det er stor kontaktflate mellom tilluften og romluften rundt, blir det god innblanding med rask nedgang av strålefart og rask temperaturutjevning for radielle stråler. Etttersom temperaturen jevner seg raskt ut i strålen, egner derfor denne innblåsningsformen seg svært godt for å tilføre undertemperert tilluft. (Stensaas and Hovland 2001)

Ventiler av denne typen blir som regel montert i plan med taket, og da blir det etablert en horisontal veggstråle. Ved innblåsning av varmluft og ved avtrekk ved taket kan en risikere mer eller mindre kortslutning mellom tilluft og avtrekk. Det vil derfor være mer hensiktsmessig å

tilføre luft med undertemperatur i forhold til romluft, og for å skape bedre omrøring. Ved innblåsning av kaldluft kan det aksepteres undertemperatur opp mot 10-12°C. (Stensaas and Hovland 2001)

Prinsippet for strømningsformen er vist i Figur 16.



Figur 16 - Radielle stråler (Skåret 2000)

6.3.1 Veggstråler

Når utløpet er plassert nær en plan overflate (≤ 300 mm) gjør dette at strålens mulighet til å innblande luft er begrenset til denne overflaten. Dette resulterer i en halv fri stråle, og blir da kalt veggstråle. Det turbulente blandingsjiktet vil rive med seg luft fra begge sider av dysen, og et lavere trykk på oversiden vil avbøye strålen, og en veggstråle vil oppstå i en viss avstand fra utløpet. I en slik situasjon som beskrevet, oppstår det et undertrykk mellom strålen og begrensingsflaten, slik at strålen kleber seg til overflaten som følge av Coanda-effekten. (Skåret 2000)

Coanda-effekten

Ettersom luft ikke kan strømme til fra taket, blir det et undertrykk som løfter strålen opp til takflaten. Denne klebeffekten kan utnyttes til å få en kaldluftstråle til å henge ved taket et stykke før den kommer ned i oppholdssonen. Luften kan da holde seg over oppholdssonen så lenge at undertemperatur og hastighet blir redusert tilstrekkelig før luften kommer ned i oppholdssonen. (Skåret 2000). Effekten gjør også at kastelengden forlenges i forhold til en fristråle. (Stampe 2000) Ideelt sett bør derfor himlingsflaten være glatt, og fri for hindringer. Støter luftstrålen på f.eks. lysarmaturer får vi avløsning. (Skåret 2000)

I tilfellet med veggstråler, kan veggstråler teoretisk bli beskrevet med et plan gjennom strålens symmetriakse eller symmetriplan. Klebende stråler vil fysisk oppføre seg som halvparten av en fri stråle, der denne er snittet i symmetriplanet.

Symmetribetraktningen fører til at en kan beregne strålen som tilnærmet halvparten av en stråle som har sitt utspring fra en utløpsåpning med dobbelt så størrelse. I praksis betyr dette at for en veggstråle, er den nominelle utløpsåpningen eller den effektive utløpsåpningen i ligning for radielle stråler multiplisert med en på faktor på 2. (Skåret 2000)

Hastighets- og temperaturutvikling i luftstrålen

For en praktisk isoterm, fri radiell stråle, kan utviklingen av lufthastigheten (U_m) langs strålen bli beskrevet ved ligning 1.1. Ligningen er semi-empirisk, noe som betyr at noen av verdiene i ligningen er fastsatt gjennom eksperimenter. (Skåret 2000)

For en praktisk isoterm, fri radiell luftstråle, kan utviklingen av sentralhastigheten (U_m) langs strålen bli beskrevet ved ligning (1.1):

$$\frac{U_m}{U_0} = \sqrt{\frac{\rho_0 i 0,503}{\rho_r \varepsilon \sqrt{C_b}}} \sqrt{\frac{A_0}{r(x + x_p)}}$$

Utviklingen av sentraltemperaturen langs samme stråle kan beskrives med ligning (1.2):

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \sqrt{\frac{\rho_0 \varepsilon 0,43}{\rho_r i \sqrt{C_b}}} \sqrt{\frac{A_0}{r(x + x_p)}}$$

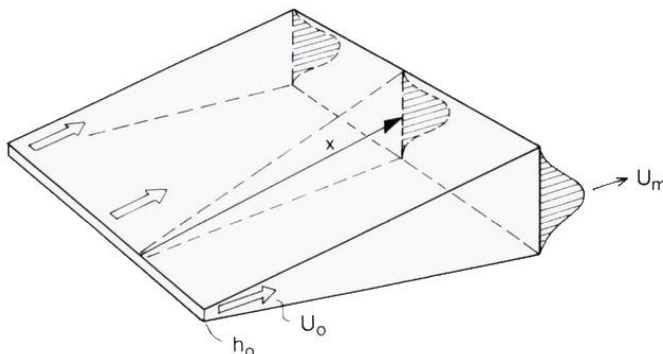
I beregningene inngår visse konstanter som kan bestemmes eksperimentelt. Turbulenskonstanten C_b , impulsfaktoren i , og kontraksjonskoeffisienten ε , er avhengig av utløpsåpningens utforming. C_b vil variere fra 0,235 ved avrundet dyse til 0,3 ved sterkt turbulensskapende gitter. Impulsfaktoren i tar hensyn til impulstapet i utløpsåpningen. Den kan bli fastslått av forholdet mellom gitter og åpning av utløpet (A_0 netto/ A_0 brutto), og er en verdi som er mindre enn 1,0 ($\approx 1,0$ uten gitter). (Skåret 2000)

Dersom ikke åpningen er en strømlinjeformet dyse, vil en sammentrekning eller kontraksjon forekomme rett etter utløpet. Dette er tatt hensyn til ved å innføre kontraksjonskoeffisienten ε , som forøvrig vil variere mellom 0,6 og 1,0 for henholdsvis skarp skarpkantet tilløp og avrundet dyse. (Skåret 1976)

I praksis er det vanskelig å skille ut hver enkelt av faktorene C_b , ε og i . Disse er ofte slått sammen til *en* konstant, K . (Skåret 1976)

6.4 Plane stråler

Prinsippet for strømningsformen for plane stråler er vist i Figur 17.



Figur 17 - Plansymmetriske stråler

For en praktisk isoterm, fri plan luftstråle, kan utviklingen av sentralhastigheten (U_m) langs strålen bli beskrevet ved ligning (1.3):

$$\frac{U_m}{U_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_r} \frac{i}{\varepsilon} \frac{1,26}{\sqrt{C_b}}} \sqrt{\frac{h_0}{x + x_p}}$$

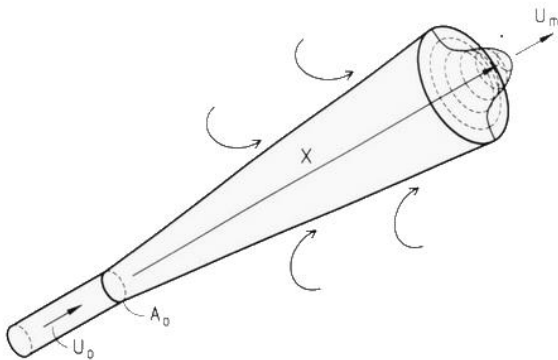
Utviklingen av sentraltemperaturen langs samme stråle kan beskrives med ligning (1.4):

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta T_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_r} \frac{\varepsilon}{i} \frac{1,08}{\sqrt{C_b}}} \sqrt{\frac{h_0}{x + x_p}}$$

6.5 Runde aksielle stråler

For runde stråler er tverrsnittet sirkulært. Ved senere utrekning av konveksjonsstrøm fra en varmekilde i denne rapporten, er det benyttet formel for punktkilder (aksesympetrisk strømning). Stråletverrsnittet i strømning fra punktkilder kan fastsettes på samme måte som for stråletverrsnittet til runde stråler. Formler som er benyttet for beregning av hastighetsforløpet til strålen i konveksjonsstrømmer er nærmere utdypet i kapittel 7.

Verdt å merke seg er at hastighetsreduksjonen vil være større for rotasjonssymmetriske stråler (runde stråler) enn for plansymmetriske stråler (lange spalter, radielle stråler). Prinsippet for strømningsormen er vist i Figur 18. (Skåret 2000)



Figur 18 – Aksielle (koniske stråler). (Skåret 2000)

6.4 Termisk oppdrift i horisontale stråler

Når luftstrålen har en annen temperatur enn omgivende romluft, vil den bli påvirket av oppdrifts- eller gravitasjonskrefter, som igjen påvirker strålebanen, avløsning fra tak og strålens rekkevidde. Forholdet mellom treghet- og gravitasjonskrefter er avgjørende for hvor sterk strålen rammes. Det dimensjonsløse Arkimedestallet, Ar , karakteriserer dette forholdet, og er definert som følger (Skåret 2000):

$$Ar = \frac{gl\beta\Delta T}{U^2}$$

g = tyngdens akselerasjon, β = volumetrisk temperaturutvidelseskoeffisient

ΔT = karakteristisk temperaturdifferanse, U = karakteristisk hastighet

l = karakteristisk lengde for strømmingen

Arkimedestallet øker med økende avstand fra utløpet, fordi oppdriftskrefter øker i forhold til treghetskreftene, selv om medrevet romluft blandes inn i strålen og jevner ut temperaturforskjellen. Selv små avvik fra isoterme forhold vil være av stor betydning for luftstrømningsmønsteret i et rom. Oppdriftskreftene- eller gravitasjonskreftene påvirker en horisontal ikke-isotermisk stråle med avbøyning nedover om stråletemperaturen er lavere enn romtemperaturen, og motsatt med avbøyning rettet oppover når strålen er varmere. (Skåret 2000)

Som tidligere nevnt, benyttes klebeeffekten (Coanda-effekten) ved omrøringsventilasjon, nettopp for å overvinne tyngdekraften i en undertemperert stråle. Dette anvendes slik at strålen kan klebe seg lenge nok til at lufthastigheten og temperaturforskjellen reduseres i tilstrekkelig grad, før luftstrålen kommer inn i oppholdssonen. (Skåret 2000)

7 Termisk belastning i et ventilert rom

Lufttemperaturen i oppholdssonen påvirkes av varmetapet gjennom fasader og tak, samt av ventilasjonen som kan tilføre eller fjerne varme. I tillegg vil sol og høy utetemperatur tilføre bygget varme, og innendørs kommer varmen fra elektrisk utstyr og personer. (arbejdsilsynet)

Oppvarming av forsamlingslokaler skyldes særlig varmeavgivelsen fra mennesker. I forsamlingslokaler som for eksempel møterom, vil det da være snakk om betydelige varmemengder som må fjernes. (Røstad 1973)

7.1 Termiske konveksjonsstrømmer

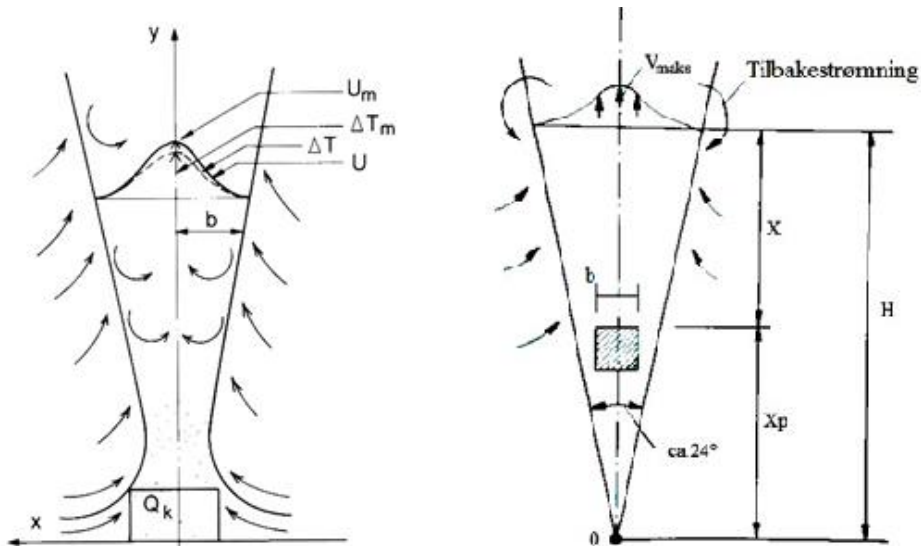
Blant oppdriftsinfluerte strømminger er rene oppdriftsgenererte strømminger å finne. Det er naturlig å behandle disse i tilknytning til stråler med oppdrift. Dersom en ser bort fra impulser fra tilluftsorgan eller fra bevegelige kilder (personer), blir luftstrømmingene i et rom bestemt av diverse varme- eller kuldekildene. Disse kildene er personer, lys, radiatorer, vegg- og vindusflater og diverse elektrisk utstyr. (Stensaas and Hovland 2001)

Siden det i denne rapporten er sett på et møterom, vil mennesker være en av de store varmekildene i rommet. Den termiske varmestrålingen som genereres av dem vil derfor påvirke luftfordelingen i rommet og dermed ha innvirkning på inneklimate. Bygningsmessig kan problemstillingen dekomponeres til helt frie konveksjonsstrømmer generert av punktformede eller linjeformede varmekilder, samt halvt fire konveksjonsstrømmer generert av varme eller kalde vertikale flater. (Skåret 2000)

7.1.1 Frie konveksjonsstrømmer

En varmekilde er opphav til luftbevegelse på grunn av at varmen som avgis, varmer opp luften nær kilden. Den oppvarmede luften vil strømme vertikalt. Den konvektive effektavgivelsen er utslagsgivende for volumstrøm og hastighet. All varme som avgis konvektivt fra en varmekilde, konserveres i konveksjonsstrømmen. Strømningsmønsteret som oppstår, er av typen grensesjikt og kan beskrives med integrerte bevegelses- og energiligninger for grensesjikt.

På grunn av konveksjonsvarmen blir det etablert en luftstråle som river meg seg romluft, og luftmengden i den kjegleformete stråle øker med høyden. Bevegelsesmengdefluksen er ikke konstant, men øker pga. oppdriftskraften. Figur 19 viser en fri konveksjonsstrøm. (Skåret 2000)



Figur 19 - Fri konveksjonsstrøm. Figuren til høyre viser en punktkilde. (Skåret 2000)

For å kunne simulere konveksjonsstrømmen som oppstår over en sittende person, er det i denne rapporten valgt å benytte seg av formel for punktvarmekilder (aksesymertrisk stråling).

Konveksjonsstrømmen har en slik form at den ser ut til å komme fra et punkt 0 i polen til strålen. For å se hvordan hastighet videre avhenger av avstand over kilden, er det gitt et uttrykk for strømningstverrsnittet (Skåret 2000):

$$U_m = \frac{1,63}{C_b^{2/3}} * \left(\frac{g\beta}{\rho * c_p} \right)^{1/3} * \left(\frac{\dot{Q}_k}{y + y_p} \right)^{1/3} [m/s]$$

\dot{Q}_k = den konvektive effekten [w] til varmekilden

y = avstand over kilden, y_p = polavstand [m]

Formlene utvikles videre ved å sette inn C_b med 0,235. Dette fordi litteraturen gir støtte for at grenselinjene for konveksjonsstrømmer er rette linjer som for vanlige stråler, og utbredelsesvinkelen er omtrent den samme. For “vanlige” temperaturer settes:

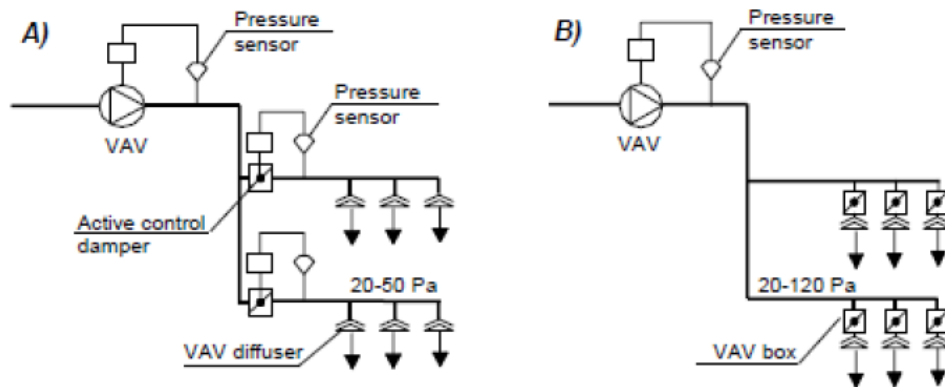
$$\rho = 1,2 \frac{kg}{m^3}, \beta = \frac{1}{300} \frac{1}{K}, c_p = 1 \frac{kJ}{kg} ^\circ K$$

For sentralhastigheten fås da følgende formel (Skåret 2000):

$$U_m = 4,27 \left(\frac{g\beta}{\rho * c_p} \right)^{1/3} * \left(\frac{\dot{Q}_k}{y + y_p} \right)^{1/3} [m/s]$$

8 Behovsstyring og tilluftsventiler

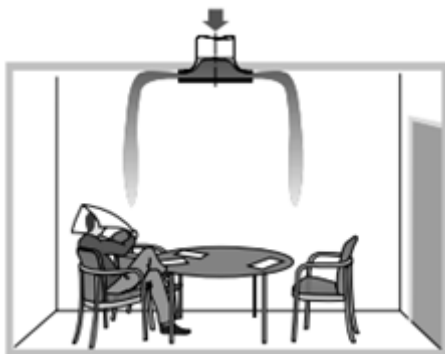
Regulering av et VAV-system kan styres via lokale regulatorer og spjeld i kanalen, eller ved aktive spjeld i tilluftsenheten. Reguleringen vil da skje ved et samspill mellom spjeld og vifte. Figur 20 viser to ulike VAV-systemer. I følgende kapittel vil aktive og passive tilluftsventiler nærmere utdypes.



Figur 20 - A) Aktive ventiler B) Passive ventiler i kombinasjon med kanalspjeld. (Maripuu 2006)

8.1 Passive ventiler

Tilluftshastigheten vil for anlegg med konstant ventilåpning variere ved varierte luftmengder, og med dette endres sirkulasjonsforholdene i rommene. Kastelengden avtar altså ved avtagende luftmengde. Passive ventiler har fast spalteåpning, altså innblåsningsarealet er konstant. I Figur 21 oppstår tidlig avløsning av luftstrålen for et tilfelle der luftmengden er redusert. (Swegon 2006)

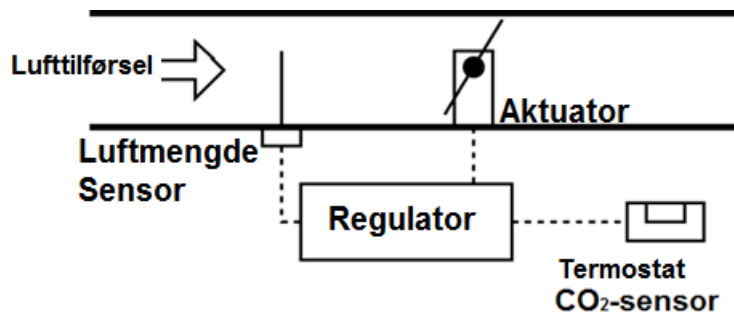


Figur 21 - Ved reduksjon av luftmengde vil utløpshastigheten avta og luftstrålen faller ned i oppholdssonen, og kan medføre risiko for trekk. (Swegon 2006)

Regulering av kanalspjeld

Systemet kompenserer for variasjoner i rombelastning ved å regulere spjeldposisjonen til VAV-enheten på bakgrunn av signal fra den aktuelle sensoren i rommet. VAV-spjeld kan reguleres slik at større og tilstrekkelig luftmengde tilføres til et rom med tilstedeværelse, og mindre eller

minimumluftmengde tilføres når rommet er mindre belastet eller ikke er i bruk.(Grini, Wigenstad et al. 2011) (Drangsholt 2004) I et VAV-system vil struping ved VAV-spjeld bli meldt tilbake til viften og føre til en reduksjon av turtallet ved viftemotoren, og følgelig reduksjon av energibruk til viftedrift.(Grini, Wigenstad et al. 2011)

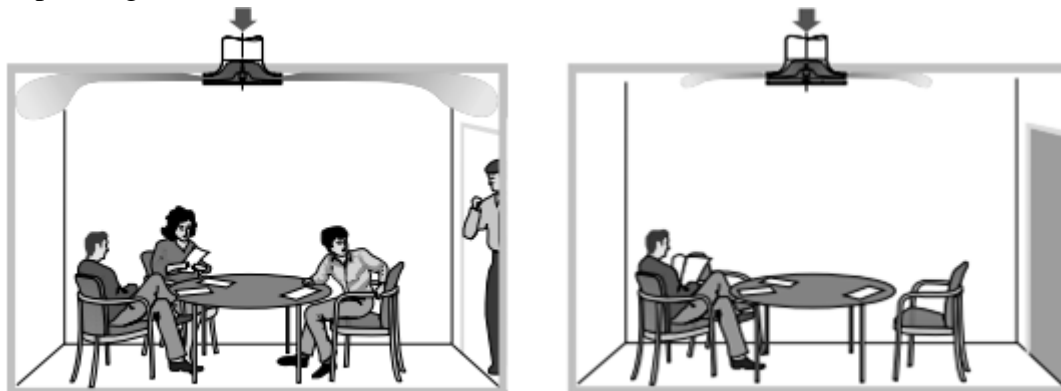


Figur 22 - VAV-spjeld. (KMC-Controls 2014)

8.2 Aktive ventiler

Når luftmengden varierer innen et stort område, vil en forutsetning for å opprettholde et ensformet spredningsbilde i et rom, være at tilluftshastigheten holdes konstant når den forlater ventilen. (Swegon 2006)

Hensikten med aktive ventiler at ventilasjonsluften ved nominell luftmengde skal fordele seg på en slik måte, at de ønskede atmosfæriske og termisk klima oppnås i oppholdssonen, og at den ønskede middelvei av lufthastigheten overholdes. For å kompensere for avtagende kastelengde, reguleres tverrsnittet automatisk. Dermed opprettholdes en tilnærmet konstant utløpshastighet.



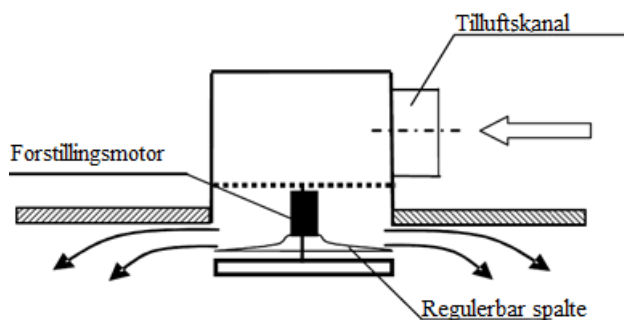
Figur 23 - Til venstre stråleutbredningen med aktiv luftventil illustrert ved nominell luftmengde. I illustrasjonen til høyre minsker den aktive ventilen innblåsningsarealet (spalteåpningen) for å senke luftmengden og opprettholde utløpshastigheten.

Samtlige komponenter som er nødvendig for regulering av luftmengder, er integrert i den aktive tilluftsventilen. Det vil si at i en og samme enhet er det innebygget VAV-spjeld, spjeldmotor, regulator og reguleringsensor. I de fleste slike ventiler måles luftmengden og det statiske

trykket over ventilen. Utløpet variere fra delvis åpning til full åpning ved stor belastning i rommet. (Herrmann 2011)

Arbeidsprinsipp

Avstanden mellom platene varierer i henhold til den nødvendige luftmengden som trengs tilført til rommet og satt statisk trykk før enheten. Platen styres av en forstillingsmotor(aktuator), som får signal fra den kontrollerende sensoren (for eksempel CO₂ eller temperatur). Kontroll- og reguleringsutstyr samt sensorene er innebygget i tilluftsenheten. (Maripuu 2006)



Figur 24 - Skjematisk figur av en aktiv tilluftsventil. Luften føres mellom en regulerende spalte som reguleres i henhold til nødvendig luftmengde. (Maripuu 2006)

Aktive tilluftsventiler markedsføres blant dagens leverandører som en løsning som gir svært god behovsstyring ved varierende interne laster. Til nå består derimot de fleste systemløsningene ved behovsstyring av aktive VAV-spjeld i kanalnettet og passive tilluftsventiler. (Maripuu 2006)

9 Eksperimentelle forsøk

9.1 Prøverommet

Alle forsøk ble gjennomført i prøverommet ved klimateknisk laboratorium på NTNU. Rommet ble innredet som et typisk møterom, med oppsett av bord, og belysning fra fritthengende lysarmaturer. For å simulere sittende personer i møterommet ble det plassert 24 varmeavgivende spirorør rundt bordet.



Prøverommets areal er på 50,8 m². En del av rommet er et eget rom for småskala forsøk. Dette rommet er antatt å ha samme temperatur som prøverommet, og vegger som grenser mot dette rommet er derfor neglisjerbare med tanke på varmetap.

U-verdier for vinduer er beregnet med programmet Pilkington Spectrum, mens U-verdier for dører er hentet fra tidligere varmetapsberegning fra prøverommet. U-verdier for konstruksjoner er beregnet etter NBI-blad 471.008 og 471.010. For vinduer med 2-lags laminerte ruter, karm og ramme i tre, samt 15 mm avstandslist av aluminium, er beregnet U-verdi lik 2,7 W/m²K.

Veggene og taket består av sandwich-elementer med en kjerne av polyuretan (PUR/PIR) og en overflate av metall på begge sider. Tak, golv og 3 vegger grenser til oppvarmet rom med konstant tilnærmet 20°C. For ytterveggen mot det simulerte uterommet er U-verdien beregnet til 0,41 W/m²K. U-verdi for tak og golv er 0,28 W/m²K og henholdsvis 0,3 W/m²K. For resterende mål for prøverommet henvises de til tabell gitt i vedlegg D.

Ved siden av prøverommet er det et rom som simulerer utetemperaturer fra -20°C til +30°C. I rommet er det plassert elektriske ovner for å heve temperaturen til ønskelig nivå. En yttervegg grenser mot dette rommet, og denne veggen er bygget opp av bindingsverk med 100 mm mineralull. Det er også tre 1-lags vinduer med U-verdi på 5,8 W/m²K.

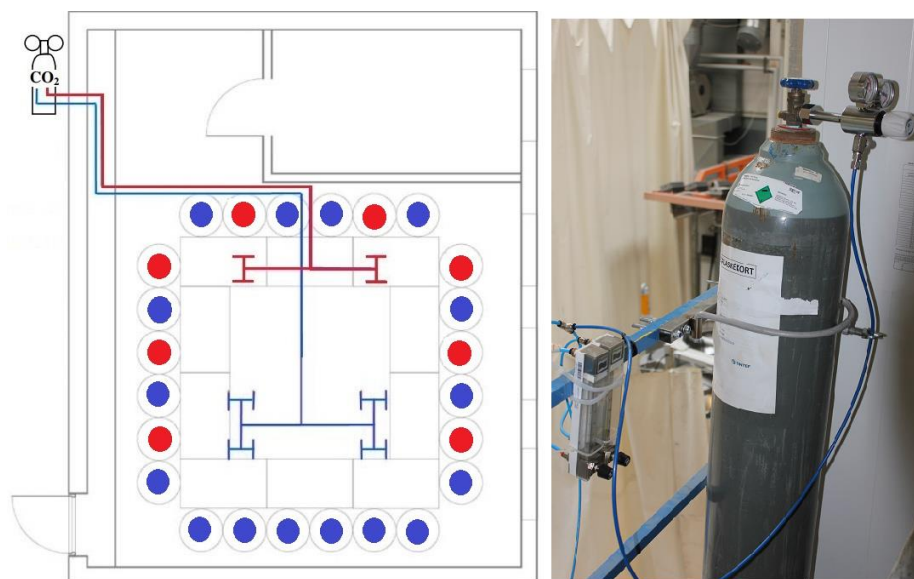
9.1.1 Simulering av mennesker

For å simulere mennesker ble det brukt spirorør. I midten av røret er det plassert en 75 W pære, som skal simulere varmeavgivelsen fra et menneske. Størrelsen på røret er Ø400 mm, og er

montert på føtter slik at total høyde ble 1,3 m. Rørene er plugget i begge ender slik at en har kontroll på konveksjonen gjennom dem.

CO₂

I hvert spirorør er det tilførsel av CO₂-gass. Gassen blir tilført rommet fra en CO₂-flaske plassert utenfor prøverommet. Inne i rommet blir gassen likt fordelt til hvert spirorør via plastslanger. Det ble laget to kurser med plastslanger, slik at man kan veksle mellom forsøk med ulik personbelastning. Den ene kursen fordeler gass til 8 spirorør, og den andre kursen gass til de resterende 16 spirorørene. Ved forsøk med personbelastning på 24 personer ble begge kursene anvendt.



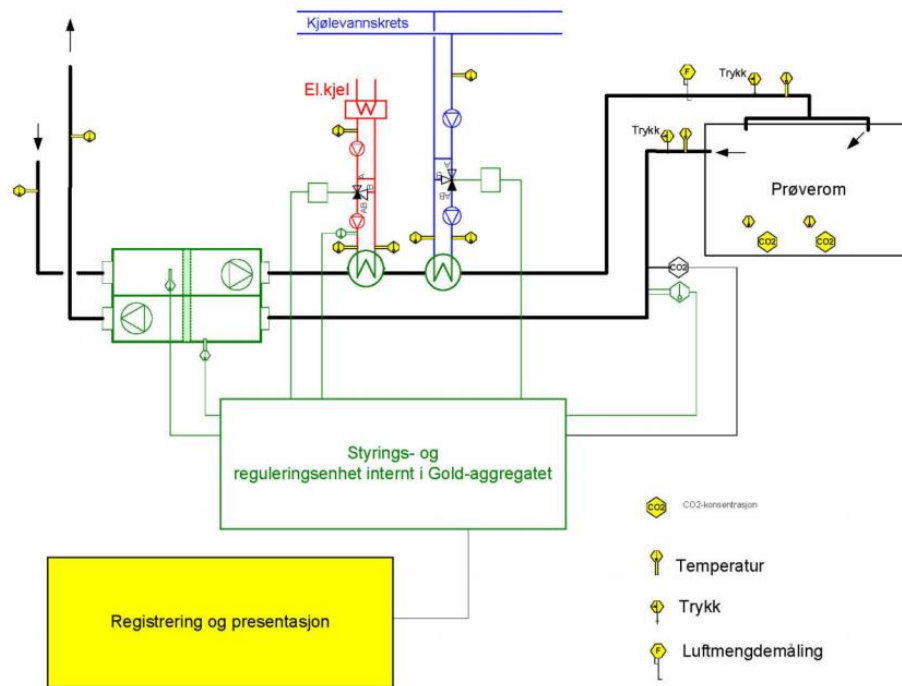
Figur 25 - Fordeling av CO₂ i prøverommet. Til høyre vises CO₂-flasken, samt rotameter til venstre i bildet.

CO₂-avgivelsen fra et menneske er avhengig av den momentane metabolismen. I møterom er det naturlig å anta at metabolismen er på 1,2, siden det hovedsakelig er stillesittende arbeid. For totalproduksjon av CO₂ i rommet ble følgende ligning anvendt (Byggforsk 1999):

$$V_{CO_2} = 0,0043 * M * n \left[\frac{l}{s} \right]$$

Ved full møteromsbelastning (24 personer) tilsvarer dette CO₂-avgivelse på omtrent 450 l/h, og ved delbelastning (8 personer) vil dette bli 150 l/h.

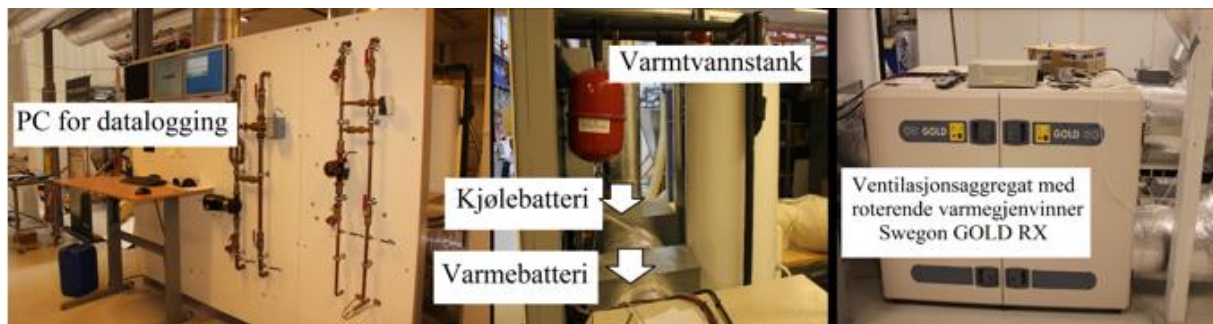
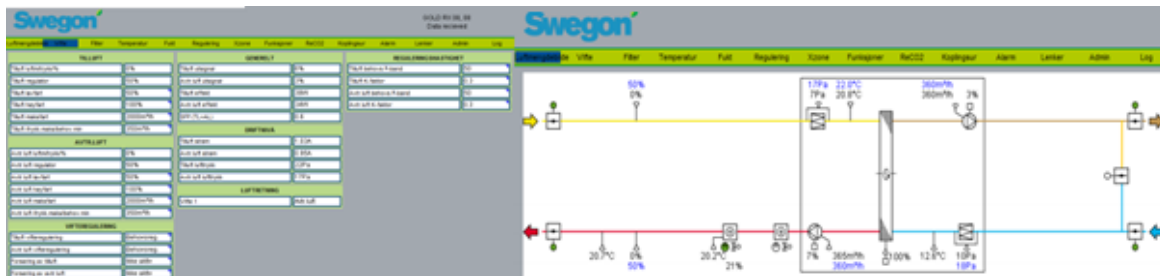
9.2 Ventilasjonssystemet



Figur 26 - Oversiktsbilde over ventilasjonssystemet og tilhørende komponenter.

Styring og overvåking

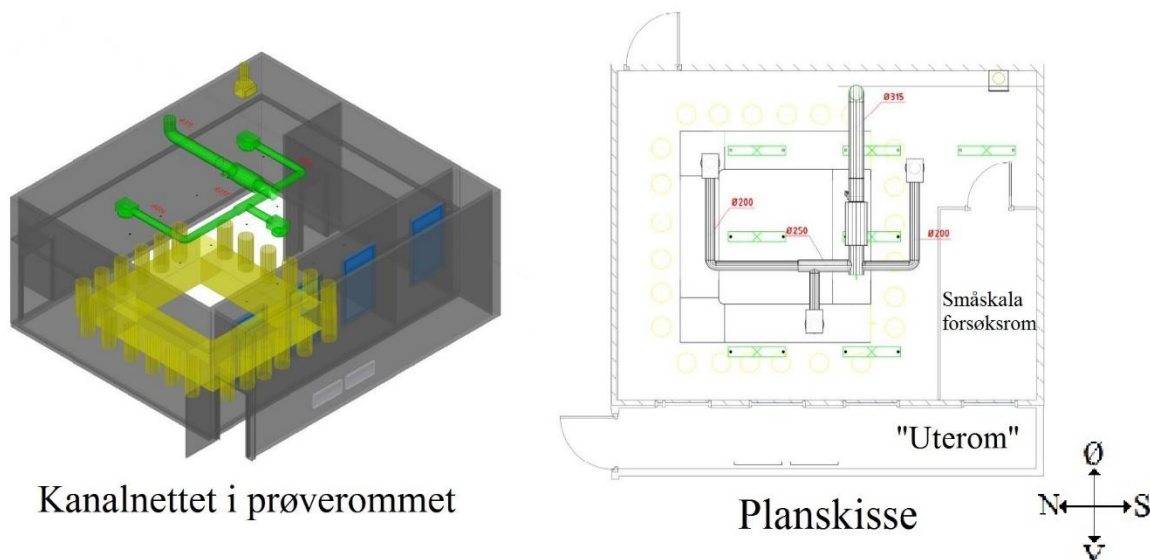
Ved hjelp av Swegon sitt web-grensesnitt kan man overvåke systemet, og har mulighet for å regulere parametere. I tillegg til dette grensesnittet logges data fra forsøk via dataloggingsprogrammet LabView.



Tilluftstemperaturen reguleres ved hjelp av et kjøle- og varmebatteri. Aggregatet er av typen Swegon GOLD RX 08 med roterende varmegjenvinner. Den kan minimum levere luftmengder på minimalt 360 m³/h og maksimalt 3240 m³/h.

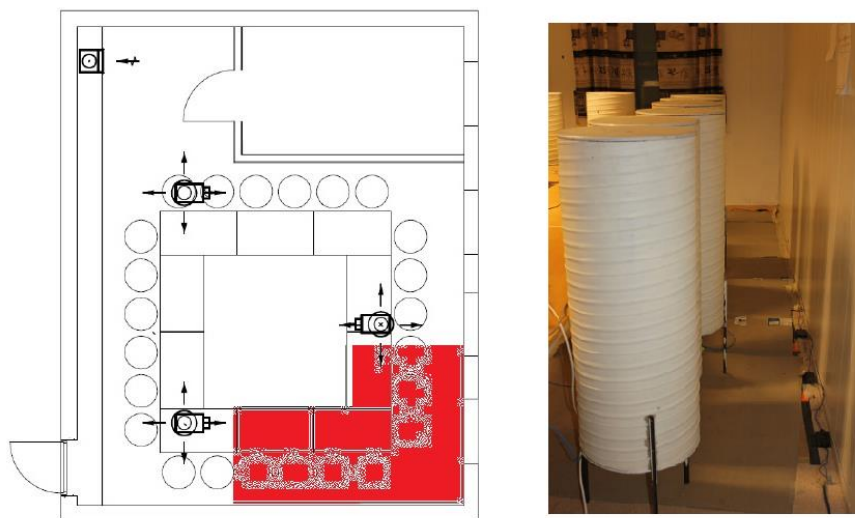
Kanalnett

Luft fra 3 tilluftsventiler klimatiserer og ventilerer rommet. Avtrekksventilen er montert på østre vegg, tett opp under himling. CO₂- og temperatursensorene ble under forsøk plassert 1,5 m over gulvet, ved inngangen til prøverommet. Et skjematisk bilde av testrommet er gitt i Figur 27.



Figur 27 - Prøverommet i klimateknisk laboratorium

Solinnstråling ble simulert med varmemefolie langs gulvet, og solinnstrålingseffekten var totalt 1580 W.



Figur 28 - Varmefoliens plassering i prøverommet.

9.3 Ventilasjonskomponenter

Figur 29 viser tilluftsventilene levert av Swegon. I tilluftsventilene tilføres luften gjennom en sirkelformet spalteåpning. Dette gir en radiell klebende stråle langs takflaten.

Den aktive ventilen var av typen Swegon Adapt Sphere. Luftmengdereguleringen forekommer over selve utløpsåpningen. En spalte justerer seg opp ved signal fra detektor i rommet om lavt CO₂-innhold i romluften. Ved økende CO₂-innhold åpner spalten seg mer for å tilføre mer luft til sonen.

Den passive ventilen var av typen Swegon CKPa. Denne ventilen har fast spalteåpning, det vil si at den nederste spalten ikke kan reguleres automatisk.



Figur 29 - Aktiv ventil til venstre, passiv ventil til høyre. (Swegon.no)

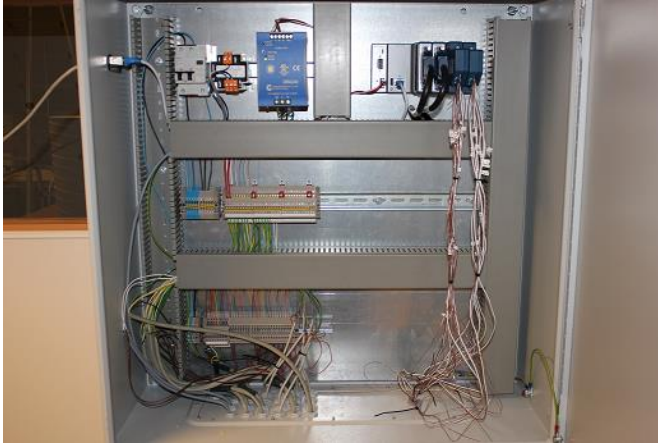
Avtrekksventilen var av typen Swegon GRLc. Dette er en enkel rist med kammer i bakkant med mulighet for justering av trykkfall og luftmengde. I kombinasjon med de passive ventilene ble VAV-spjeldet av typen Swegon Adapt Damper brukt i tilførsel- og avtrekkskanalen.



Figur 30 - Avtrekksventil til venstre og VAV-spjeld til høyre. (Swegon.no)

9.4 Måleutstyr, målemetoder og måleusikkerhet

For å kunne måle kvaliteten på inn klimaet ble parameterne lufttemperatur, lufthastighet og CO₂-konsentrasjon målt og logget. Signal fra lufthastighets- og lufttemperaturmålerne ble tatt imot i et skap med moduler, og fra skapet overføres signalene videre til en stasjonær datamaskin plassert utenfor testlaboratoriet.



Figur 31 - Skap for mottak av signaler fra følere i prøverommet.

9.4.1 Lufthastighetsfølere

Lufthastigheten i ulike punkter i rommet ble målt ved hjelp av to ulike typer lufthastighetsfølere, modell 8465 og 8475 fra TSI, se Figur 32.



Figur 32 - Lufthastighetsfølere av typen 8465 og 8475 fra TSI.

Det ble også anvendt en håndholdt lufthastighetsføler. Denne ble brukt til å måle lufthastighet i kanalen, og ved måling av lufthastighet fra konveksjonsstrømmer.



Figur 33 - Håndholdt lufthastighetsmåler (TSI Velocicalc)

Måleusikkerhet

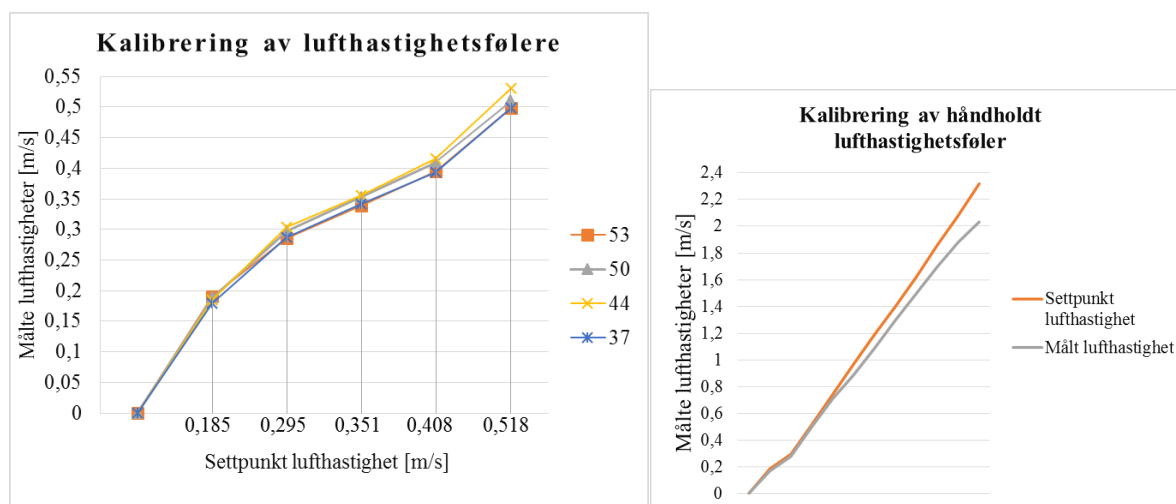
Følerne har en nøyaktighet på $\pm 3\%$ av avlest verdi, og $\pm 1\%$ av fullskala verdi innenfor følerens målområde.

Kalibrering av lufthastighetsfølere

Siden hastighetsfølerne nylig var kalibrert, ble det bestemt å kontrollere noen av følerne ved en funksjons og kalibreringstest. Hastighetsmåleren TSI VelociCalc og TSI 8475 ble plassert i røret i vindgeneratoren for å måle lufthastigheten i senter. Hastighetsverdiene ble avlest manuelt ved stabiliserte verdier. Omdreiningen ble holdt konstant på 675 rpm, mens spjeldåpningen ble regulert. Det var oppgitt diagrammer for avlesning av hastighet ved gitt spjeldåpning og omdreining. Resultatet som gir forholdet mellom hastighet fra vindgenerator og hastighet målt med de ulike følerne er vist i Figur 35.



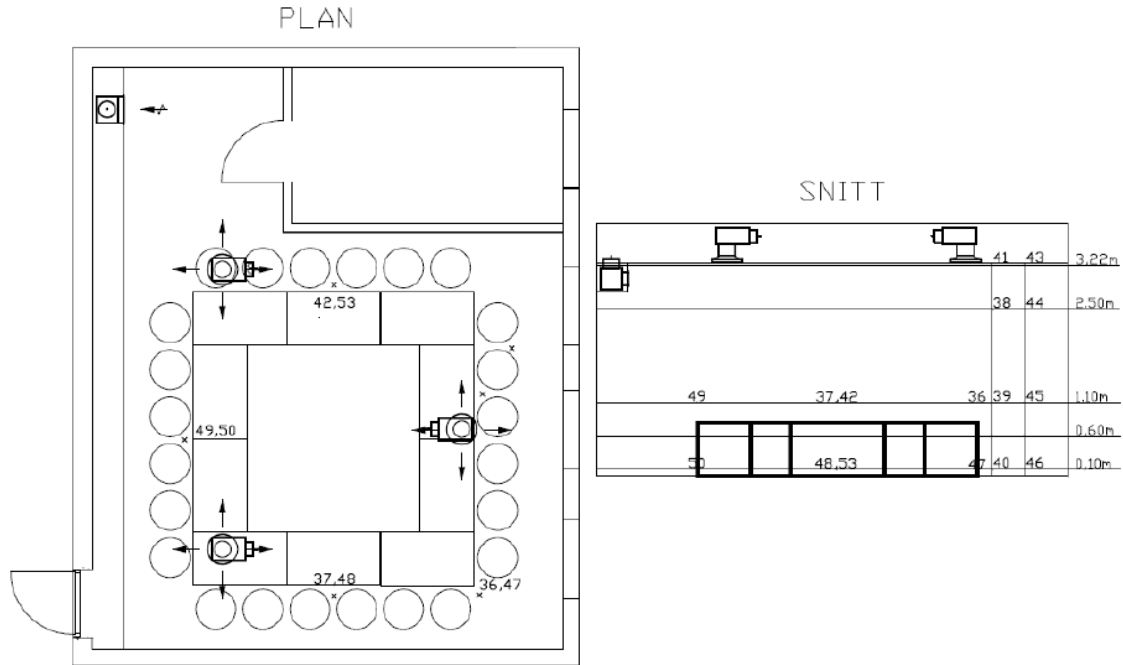
Figur 34 - Illustrasjon av vindgenerator og kalibrering av hastighetsføler



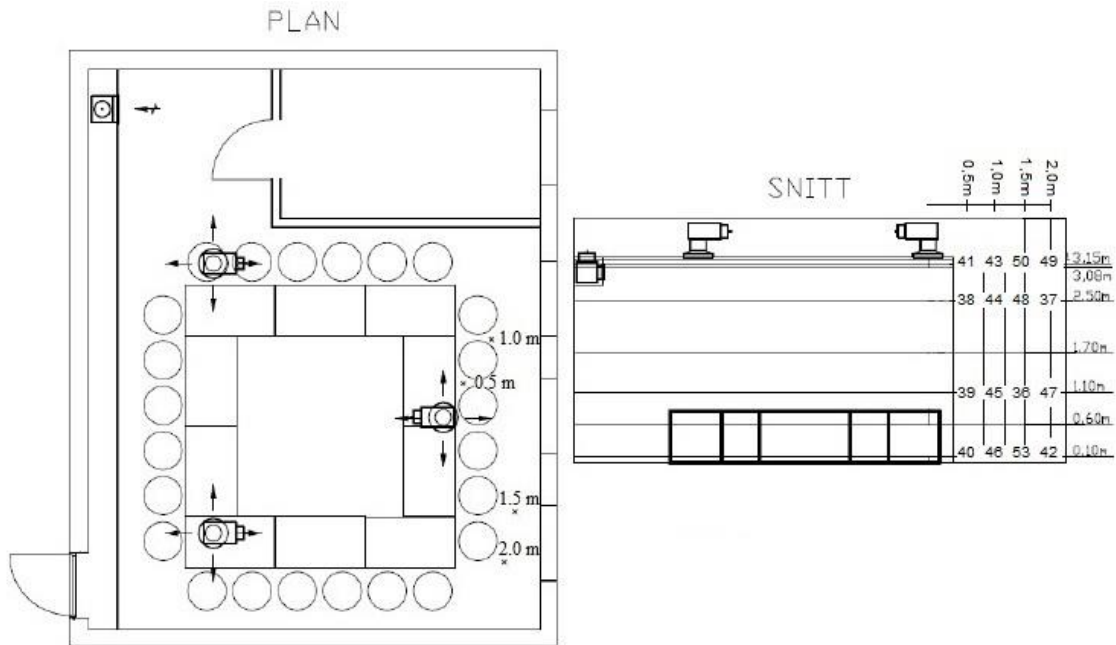
Figur 35 - Kalibrering av lufthastighetsfølerne TSI 8465 og TSI 8475. Lufthastighetsføler nr. 53, 50, 44 og 37 ble testet. Til høyre vises funksjonstest av den håndholdte lufthastighetsføleren, TSI VelociCalc.

Målemetoder

Lufthastigheten er målt primært for å bedømme risikoen for trekk i oppholdssonen. Ved måling av lufthastigheter i oppholdssonen er det målt i de høyder som representerer ankelhøyde og nakkehøyde, dvs. 0,1 m og 1,1 for sittende. I følgende figurer vises de to ulike oppsettene under møteromssimulering og ventiltesting.



Figur 36 - Plan- og snittskisse for oppsett av lufthastighetsfølere ved møteromssimulering. (Vandsvik 2013)



Figur 37 - Plan- og snittskisse for oppsett av lufthastighetsfølere ved ventiltesting

9.4.2 Termoelementer

Termoelementer av typen TT ble brukt.

Måleusikkerhet

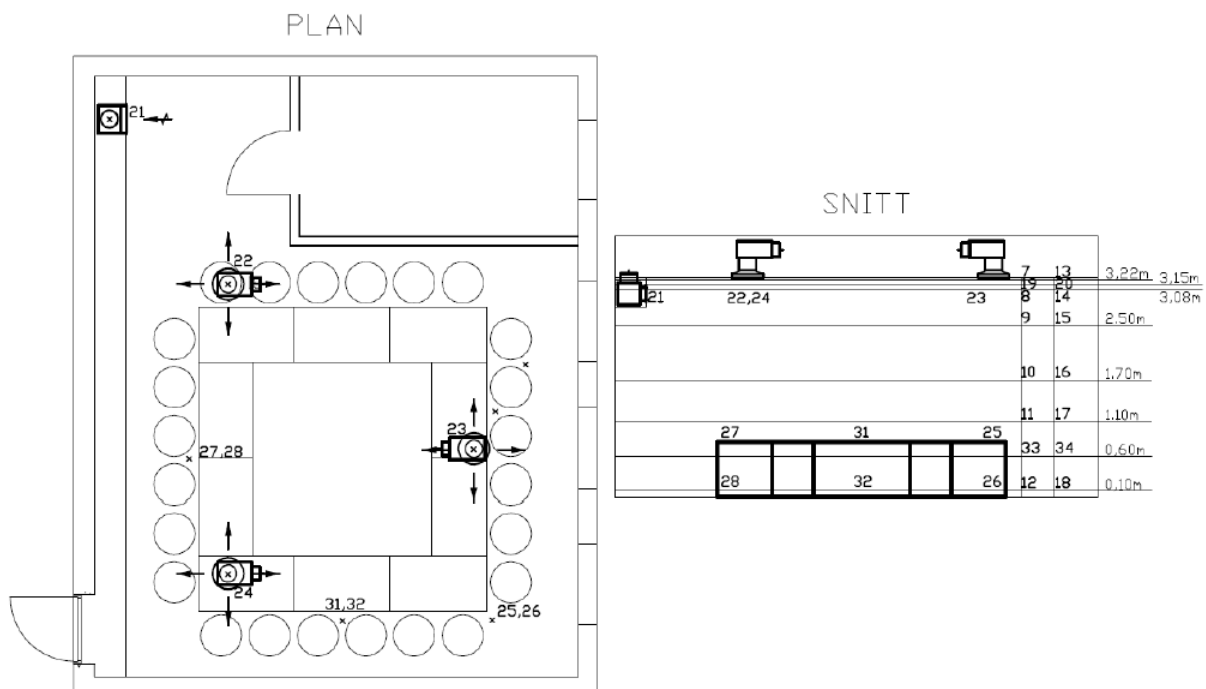
Disse har en oppgitt unøyaktighet på 0,75% av målt verdi. (Vandsvik 2013)

Funksjonstest av termoelementer

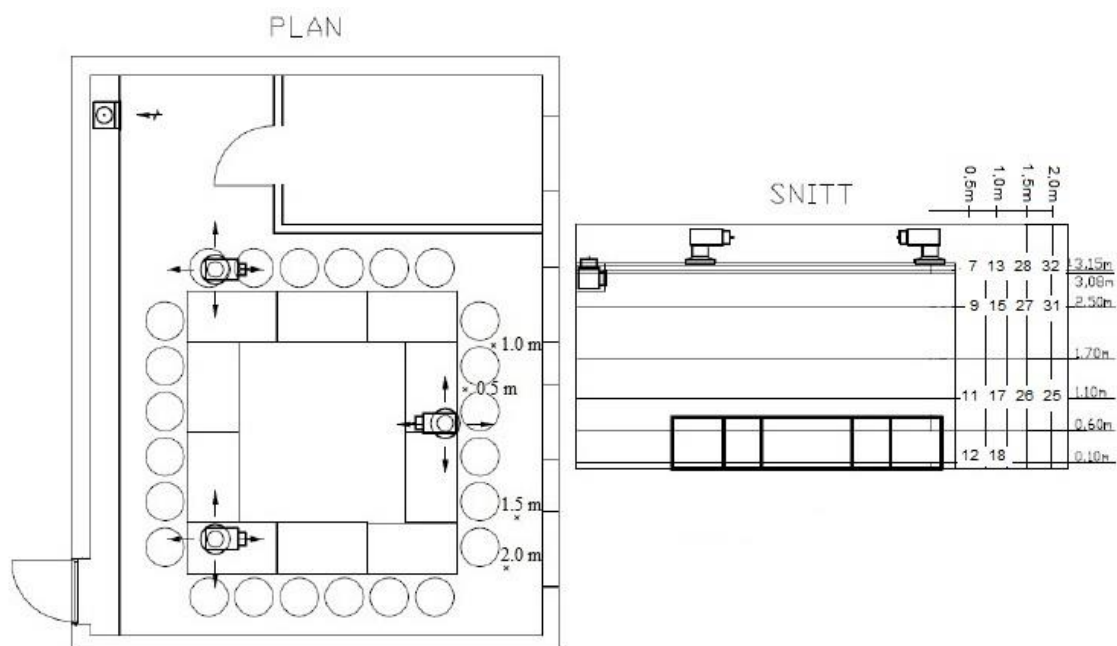
Funksjonstest av termometerne ble utført for å se om noen av termometerne måler feil ved et kjent referansepunkt. Temperaturkontrollen utføres i en termos som inneholder en blanding av knust is og vann som holder temperaturen 0°C, som også blir referansepunktet for de ulike termoelementene. Usikkerhet ved kalibrering er at temperaturen i termosen stiger etter hvert som det blir tilført varme fra omgivelsene.

Målemetoder

Termoelementene, totalt 26 stykker, ble fordelt rundt omkring i rommet, og særlig i oppholdssonen for eventuelt å avdekke lokale ugunstige temperaturer. To ulike oppsett med plasseringer av dem ble brukt ved henholdsvis møteromssimulering og ventiltesting.



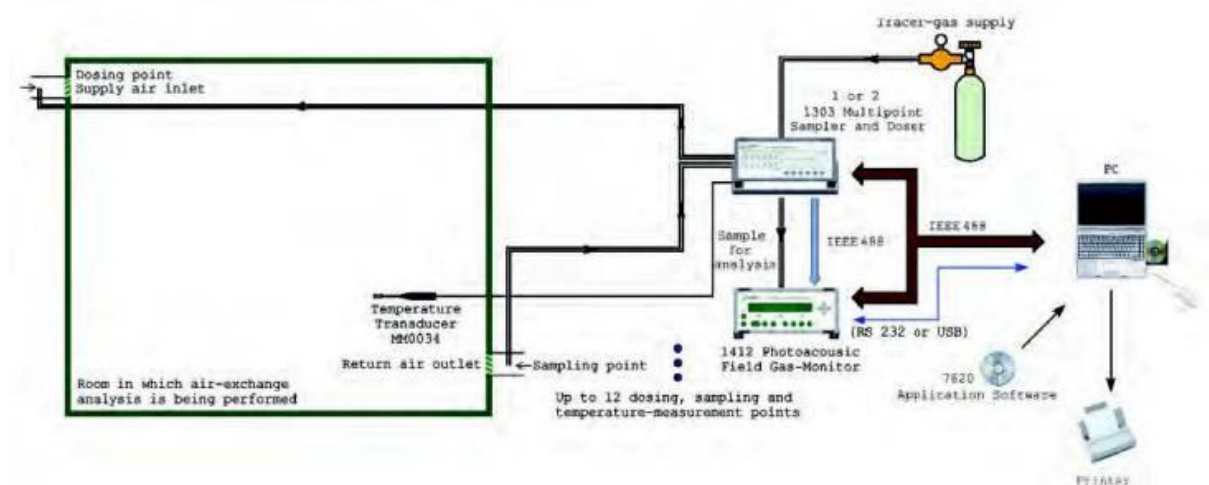
Figur 38 - Plan- og snittskisse for oppsett av termoelementer ved møteromssimulering. (Vandsvik 2013)



Figur 39 - Plan og snittskisse for oppsett av termoelementer ved ventiltesting

CO₂

CO₂-konsentrasjoner ble logget ved hjelp av Lumasense1412 gas monitor og Lumasense 1303 Multipoint Sampler and Doser. Sampleren hentet gassprøver fra rommet, og gassprøvene ble videre analysert i monitoren. Resultatene ble fremstilt grafisk og numerisk samt lagret på en bærbar datamaskin koblet mot apparatet. Figuren under viser tilsvarende oppsett som i denne oppgaven, bortsett fra at CO₂-gassen ble tilført eksternt via eget oppsett.



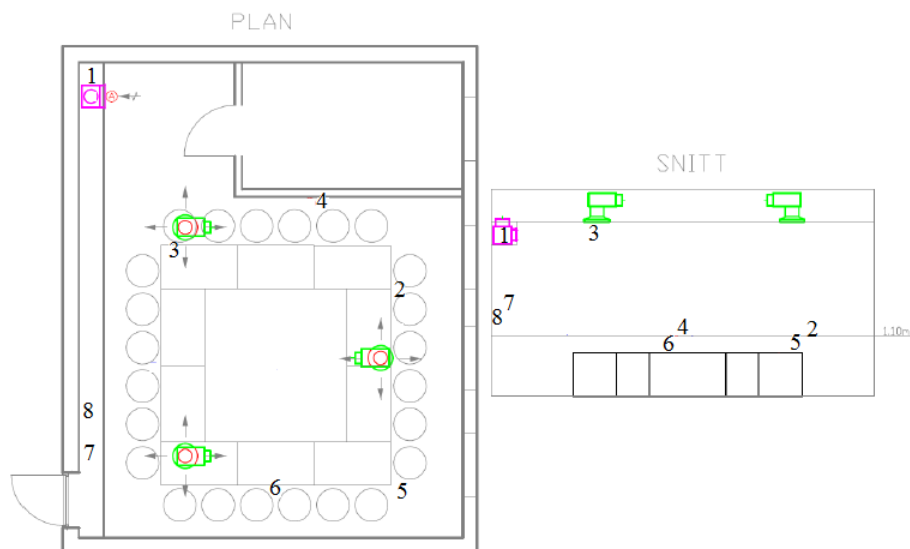
Figur 40 - Illustrasjon av oppsett for monitor og sampler for logging av CO₂.

Måleusikkerhet

I oppsettet kan det være utette slanger eller koblinger. For Lumasense Sampler er det oppgitt at maksimal lekkasje ved på 10 ml/s er på 10 µl/s. For monitoren er det oppgitt repeterbarhet på 1 % av målt verdi, og målområdet avvik er oppgitt til ± 2,5 %. (Vandsvik 2013)

Målemetode

Loggepunktene for CO₂ ble plassert slik som vist i Figur 41. De fleste målepunkter er fordelt i oppholdssonen, og på de steder det allerede var plassert måleutstyr for lufthastighet og temperatur. Et loggepunkt ble plassert i tilluftsventil for å ha kontroll CO₂-verdier i tilluften. I tillegg ble et punkt satt i avtrekksventilens kammer, slik at det til enhver tid skulle være mulighet for utregning av ventilasjonseffektiviteten.



Figur 41 – Plan og snittskisse for plassering av målepunkter for Co₂

9.5 Fremgangsmåte ved forsøk

Luftstrømning i rom for to ulike måter å behovsstyre på blir demonstrert i et møterom med to ulike radielle tilluftsventiler. Prøverommet er satt opp slik at målesituasjonen i størst mulig grad gjenspeiler en reell inneklimasituasjon i et yrkesbygg. Spirorørene som gjenspeiler mennesker, er plassert rundt bord slik som i en typisk møtesituasjon.

Inneklimate og ventilasjonens ytelse kan i stor grad karakteriseres ved å finne lokale lufthastigheter, temperaturer og konsentrasjoner av CO₂. For å kunne beskrive lufthastighets- og temperaturforholdene i rommet, er måleutstyr plassert på de steder i rommet, hvor de største lufthastighetene og temperaturer er forventet. For å karakterisere ventilasjonseffektiviteten er det målt CO₂-innholdet (ppm) for ulike lokale områder av rommet.

I tillegg til målinger, har det blitt foretatt røyksimulering. Ved hjelp av røyk fra røykammer har det vært mulig å studere og kartlegge luftbevegelsene i rommet.

Målinger ble utført for forsøk som varte opp til 2 timer. Hensikten var å måle helt til CO₂-konsentrasjonen hadde stabilisert seg i oppholdssonen. Under forsøkene for aktive og passive ventiler, ble personbelastning og tilluftstemperatur endret. Utetemperaturen ble holdt konstant, mens luftmengden varierte som følge av CO₂-konsentrasjon og temperatur i rommet.

9.5.1 Beregning av kjølebehov

Kjølebehovet gir andre betingelser til ventilasjon for å oppnå et tilfredsstillende inneklimate. Det vil da i tillegg til det grunnleggende luftbehovet på grunn av luktkriteriet, være nødvendig å

tilføre rett luftmengde til et rom bestemt av kjølebehovet. Dette betyr at den nødvendige tilluftsmengden også bestemmes med hensyn til de maksimale termiske belastningsbehov.

Varmetilskudd			
Antall pers	8	24	Benevning
Personer	600	1800	W
Belysning	280	280	W
Solinnstråling	1580	1580	W
Sum	2460	3660	W
Varmetap			
Sum	239	239	W
dim.Kjølebehov			
Sum	2221	3421	W

Tabell 9 – Varmetilskudd, varmetap og dimensjonerende kjølebehov

I Tabell 9 vises varmetilskuddet, varmetapet og det dimensjonerende kjølebehovet i prøverommet. For at ventilasjonen skal kunne dekke kjølebehovet som oppstår, må en gitt luftmengde tilføres. De ulike luftmengdene for de ulike tilluftstemperaturene og personbelastningene er gitt i Tabell 10 nedenfor. Ved personbelastning på 24 og tilluftstemperatur på 18 °C, må det tilføres 428 m³/h. Dette er markert med rødt fordi denne luftmengden overstiger dimensjonerende verdi for tilluftsventilen i prøverommet.

DeltaT	12 °C	10 °C	8 °C
Temp, avtrekk °C	26	26	26
Temo, tilluft °C	14	16	18
Personbelastning	Luftmengde over hver ventil (m³/h)		
8	185	222	278
24	285	342	428

Tabell 10 - Ulike luftmengder over ventil

Halv dim.luftmengde ADAPT SPHERE		
qv 170 m ³ /h		
Personbelastning	8	24
Temp, avtrekk °C	26	26
Temp, tilluft °C	13,7	7,0
Delta T °C	12,3	19,0

Tabell 11 - Tilluftstemperatur ved halvert luftmengde

Ved tilført luftmengde på 170 m³/h og personbelastning på 8, bør det tilføres tilluft med temperatur på 13,7 °C. Ved personbelastning på 24 vil ikke denne luftmengden ut fra tilluftsventilen dekke kjølebehovet ved temperaturer over 7 °C. En så lav tilluftstemperatur kunne forårsaket problemer med kondens i kanalsystemet.

Disse beregninger ligger til grunne for forsøkene gjennomført i prøverommet.

I Tabell 12 er det en oversikt over de ulike forsøkene som har blitt gjennomført i dette studiet.

Personbelastning	ΔT		
	8	10	12
0	OK	For kaldt	For kaldt
8	OK	X	OK
24	For varmt	OK	OK

Tabell 12 - Forsøksoversikt

Ventiltype	Forsøk	Personbelastning	Tilluftstemperatur	Ventilforsøk
Aktiv	1	0 personer	18°C	
Aktiv	2	8 personer	18°C	
Aktiv	3	24 personer	16°C	
Aktiv	4	24 personer	18°C	
Aktiv	5	24 personer	14°C	X
Aktiv	6	8 personer	14°C	X
Passiv	7	0 personer	18°C	
Passiv	8	8 personer	18°C	
Passiv	9	24 personer	16°C	
Passiv	10	24 personer	18°C	
Passiv	11	24 personer	14°C	X
Passiv	12	8 personer	14°C	X

Tabell 13 - Tabell over de ulike forsøkene gjennomført i prøverommet

Det er valgt flere forsøk med personbelastning på 24 personer, fordi det var ønskelig å se hvordan tilluftstemperaturen hadde innvirkning på hvor lufstrålen ville løsne fra taket. I tillegg var det ønskelig å se hvilken kjøleeffekt tilluftstemperaturen har, og om dette påvirker strømningsbildet i oppholdssonen.

I tillegg til de gjennomførte forsøkene i Tabell 13, er det foretatt forsøk for å studere luftstrålen ut fra tilluftsventilen. Ut fra disse forsøkene var det ønskelig å sammenligne resultatet av de ulike luftmengdene over aktive ventiler kontra passive ventiler. Ventilforsøk ble gjennomført etter forsøk 5 og 6 for aktive ventiler, og henholdsvis etter forsøk 11 og 12 for passive ventiler. Forsøkene hensikt var å studere nærmere hvordan luftmengder kan påvirke inneklimaet i de tilfeller med ulik personbelastning og stor temperaturforskjell mellom tilluft og romluft ($\Delta T = 12^\circ\text{C}$).

10 Resultat fra beregninger

Følgende avsnitt tar for seg beregninger som er blitt utført på temperatur- og lufthastighetsfordelingen etter utløpet fra en radiell tilluftsventil. Det er med utgangspunkt i formler fra kapittel 6 beregnet hastighet og temperatur langs luftstråler. I første avsnitt er det gjort beregninger for avstand til strålens avløsning fra tak.

Beregning av Arkimedes' tall for radielle veggstråler

Når en undertemperert luftstråle blåses inn langs en takflate vil den avløses fra flaten når Arkimedestallet blir stort nok. Ar-tallet vokser utetter strålen slik at selv en beskjedne oppdriftskraft kan bli betydelig i relasjon til treghetskreftene langt nok ute i strålen. Ved innblåsning med kald luft vil oppdriftskreftene langt nok ute i strålen overvinne Coanda-effekten, og strålen løsner fra taket når Arkimedestallet, Ar_x , blir stort nok. Å fastlegge hvor dette skjer er av den største betydning, og tilstrekkelig forsøksmateriale foreligger til å fastslå at dette skjer ved en bestemt Ar_x . Avhengig av varmekildenes plassering, ligger Ar_x i området 0,1 – 0,4 for veggstråler. (Skåret 2000)

Avløsning av veggstrålen, formel 1.68 i (Skåret 2000):

$$Ar_x = Ar_0 \sqrt{\frac{\rho r}{\rho_0}} * \frac{0,21}{K_3^3} * \left(\frac{\sqrt{\varepsilon * x}}{\sqrt{A_0}} \right)^2 * \frac{\sqrt{\varepsilon * x}}{r} * \frac{1}{\sqrt{2}}$$

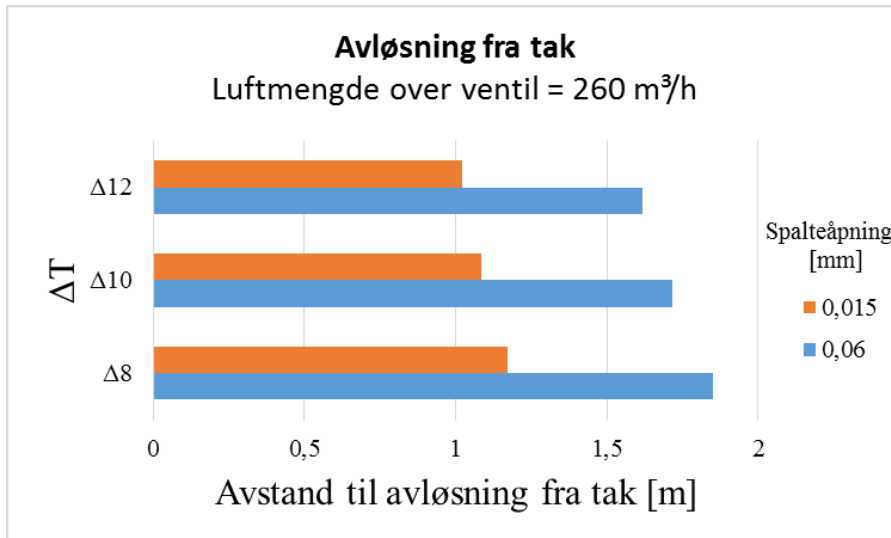
I beregningene er det antatt avløsning ved $Ar_x = 0,15$ (Skåret 2000).

10.1 Eksempelberegninger

Ved å regulere utløpsarealet kan de aktive ventilene justere hastigheten på tilluften. For å illustrere dette er det gjennomført et eksempel med en aktiv tilluftsventil og ulike luftmengder over denne. Ved beregning er det tatt utgangspunkt i radielle horisontal tilførsel av tilluft og slett himling for sammenligning med forsøkene som er utført i prøverommet. I beregningene er ventilens spalteåpning justert mellom tre nivåer; 15 mm, 6 mm og 3 mm. Det er gjennom beregninger laget en modell som viser tilfeller for når avløsning forekommer ved ulike luftmengder, tilluftstemperatur og spalteåpning på ventilen.

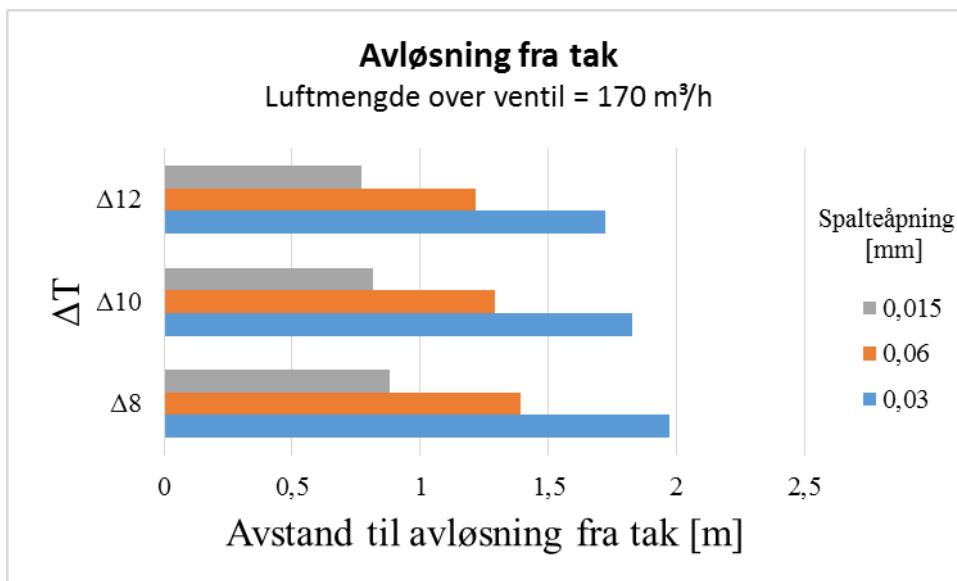
Ulike undertemperaturer på tilluft

Følgende søylediagram viser ulike avstander for luftstrålen fra ventilutløp til avløsning.



Avløsning forekommer tidligere ved lavere tilluftstemperatur. Den aktive ventilen kan halvere innblåsningsarealet og tilnærmet opprettholde utgangshastigheten. For aktive ventiler oppnås da en lengre avstand fra ventilen før avløsning forekommer.

I neste figur er luftmengden redusert over ventilen.

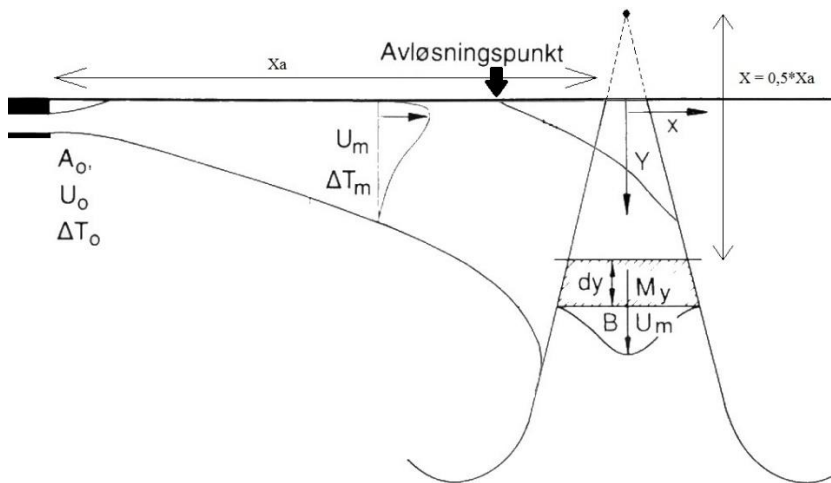


De aktive ventilene kan i teorien justeres helt ned til 3 mm, og da oppnås enda lengre avstand til avløsning, slik som vist i figuren. Redusering av luftmengden gjør at avløsningen forekommer tidligere for passive ventiler. Beregningene viser at aktive ventilers mulighet for å redusere spalteåpningen, i teorien vil redusere risikoen for tidlig avløsning fra tak. Dette gjør da aktive ventiler til en mer ønskelig løsning ved behovsstyring av ventilasjon, og kan bidra til økt termisk komfort ettersom det er mindre sannsynlighet for nedfall av undertemperert luft.

Luftstråle etter avløsning

Etter avløsning vil strålen avbøyes som en fri stråle, med et startpunkt som gir samme stråletverrsnitt og uforandret impulsfluks umiddelbart etter avløsning. De vil da avbøyes 90°

og fortsette som en plan vertikal stråle med oppdrift, fordi den radielle spredningen stopper. (Skåret 2000) En illustrasjon av dette er vist i Figur 42.



Figur 42 - Radiell luftstråle avløses fra tak, og fortsetter som plan stråle i vertikal retning.

Gjennom formler gitt for radielle veggstråler kan senterhastigheten og sentertemperaturen i luftstrålen før avbøyning uttrykkes. Senterhastigheten, U_m , og senterhastighetene, T_m , etter avbøyning uttrykkes gjennom formelen for plane vertikale stråler med oppdrift. Det virtuelle startpunktet for den vertikale strømmingen kan man fra (Skåret 2000) anslå at er $0,5 \cdot X_a$.

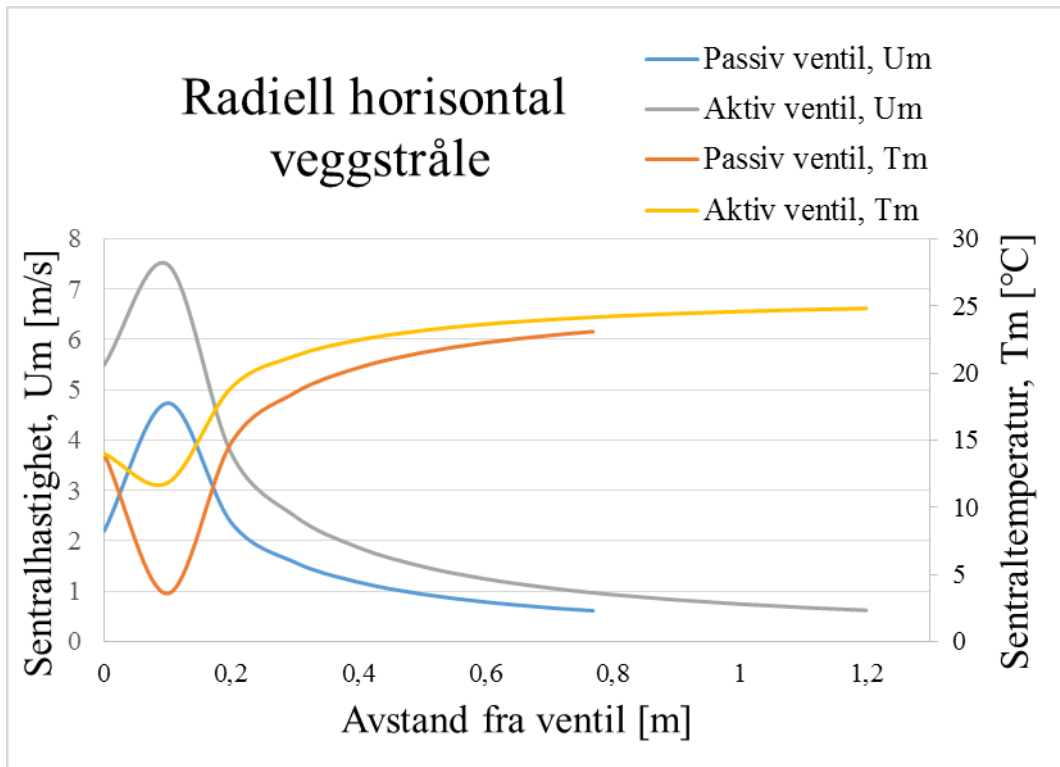
I dette avsnittet er et eksempel på beregninger for en radiell luftstråle undersøkt. Alle beregninger er basert på tidligere gitte ligninger, og verdier beregnet for å generere grafer er gitt i vedlegg A. Verdt å merke seg er at disse og følgende beregninger er basert på grove anslag, og ikke nødvendigvis er representativt for et reelt tilfelle.

I eksempelet er det en gitt en horisontal luftstråle fra en radiell tilluftsventil, ved takhøyde 3,2 over gulv. Tilluftstemperaturen ved utløpet til ventilen er 14°C . Angitte og estimerte verdier er vist i Tabell 14.

Parameter	Passiv ventil	Aktiv ventil
C_b	0,235	0,235
i	1	1
ε	1	1
K_3	1,04	1,04
ΔT_0	12 K	12 K
U_k	2,2 m/s	5,5 m/s
ρ_0	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³
ρ_r	1,2 kg/m ³	1,2 kg/m ³
A_k	0,0215 m ²	0,0086 m ²

Tabell 14 - Tabell over estimerte og angitte verdier for beregning av luftstråler.

Med disse ordnede verdiene ble den midlere senterlufthastighet ut fra ventilen beregnet. Stråler kleber til taket helt til avløsning. Figur 43 viser utviklingen av senterlufthastighet med en økende horisontal avstand fra ventilens senter. Høyden over gulvnivå blir også vist i samme figur. I samme figur vises i tillegg utviklingen av sentertemperaturen med økende avstand fra ventilens senter. I figurene vises tilfellene med aktive og passive ventiler.

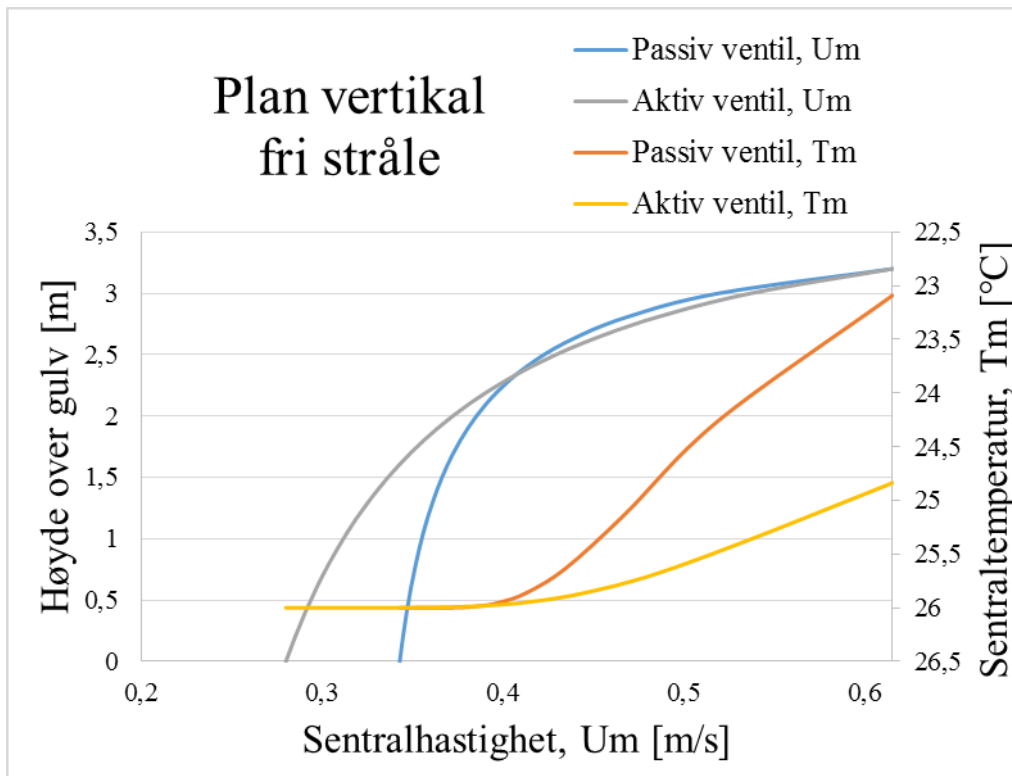


Figur 43 - Radiell luftstråle før avløsning fra tak

Figur 43 viser at strålen vil få en økning i sentrallufthastigheten like etter utløpet som følge av sammentrekning. Lufthastigheten økes raskt for så å avta ettersom termiske krefter påvirker strålen. Sentertemperaturen i luftstrålen øker som følge av induksjon og innblanding av romluft.

Som vist i Figur 43, avløses luftstrålen tidligere ved passiv ventil enn ved aktiv ventil. Dette er fordi utløpshastigheten fra aktive ventiler er høyere, og dermed kleber luftstrålen lenger langs taket. For passiv ventil forekommer dette i en avstand fra ventilen på omtrent 0,8 m, og like over 1,2 m for aktive ventiler.

Etter at luftstrålen har avløst fra taket vil strålen avbøyes som en vertikal plan stråle med oppdrift.

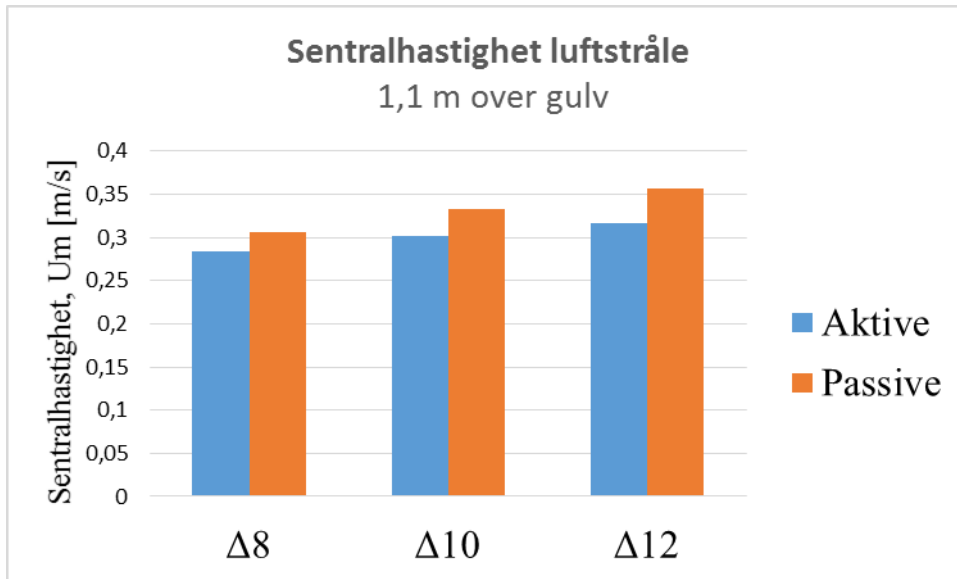


Figur 44 - Plan stråle etter avløsning fra tak

Figur 44 viser at sentrallufthastigheten avtar etter hvert som den faller ned i rommet. Sentraltemperaturen øker jevnt for å så å stabilisere seg til samme temperatur som romtemperatur. Sentralhastigheten er høyere ved bruk av passiv ventil. Dette skyldes at lufstrålen avløses fra tak tidligere, og avløses med høyere hastighet.

I de neste følgende beregninger i dette avsnittet er det tatt hensyn til samme forløpet for luftstrålen, slik som gitt i eksempelet. For stråler med ulik tilluftstemperatur endres kun parameteren ΔT_0 i beregningene.

I neste figur vises beregninger gjort på lufthastigheter på luftstråler etter avløsning fra tak. I figuren er det sammenlignet sentrallufthastigheten ved 1,1 m over gulv, for ulike tilluftstemperaturer ved bruk av passive og aktive ventiler.



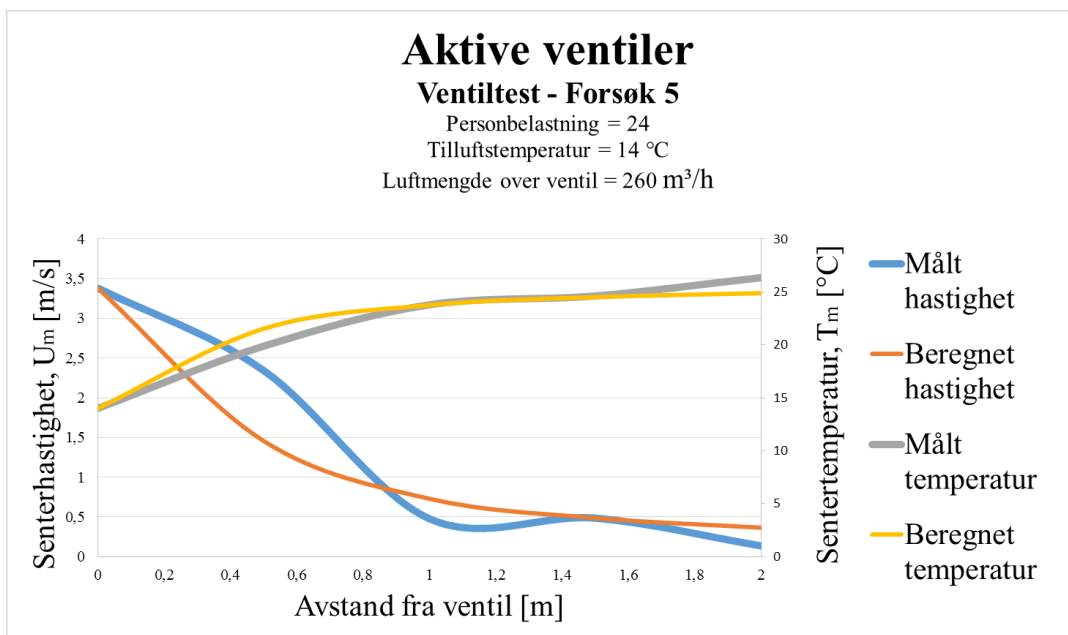
Figur 45 - Sentralhastighet i strålen ved 1,1 m over gulv.

Av diagrammet i Figur 45 økes lufthastigheten ved lavere tilluftstemperatur. Dette skyldes trolig at luftstrålen avløses tidligere fra tak, og dermed oppnår høyere hastighet etter avløsning. Lufthastigheten er følgelig lavere for aktive ventiler, noe som skyldes at luftstrålen avløses senere, og lufthastigheten har avtatt langs takflaten.

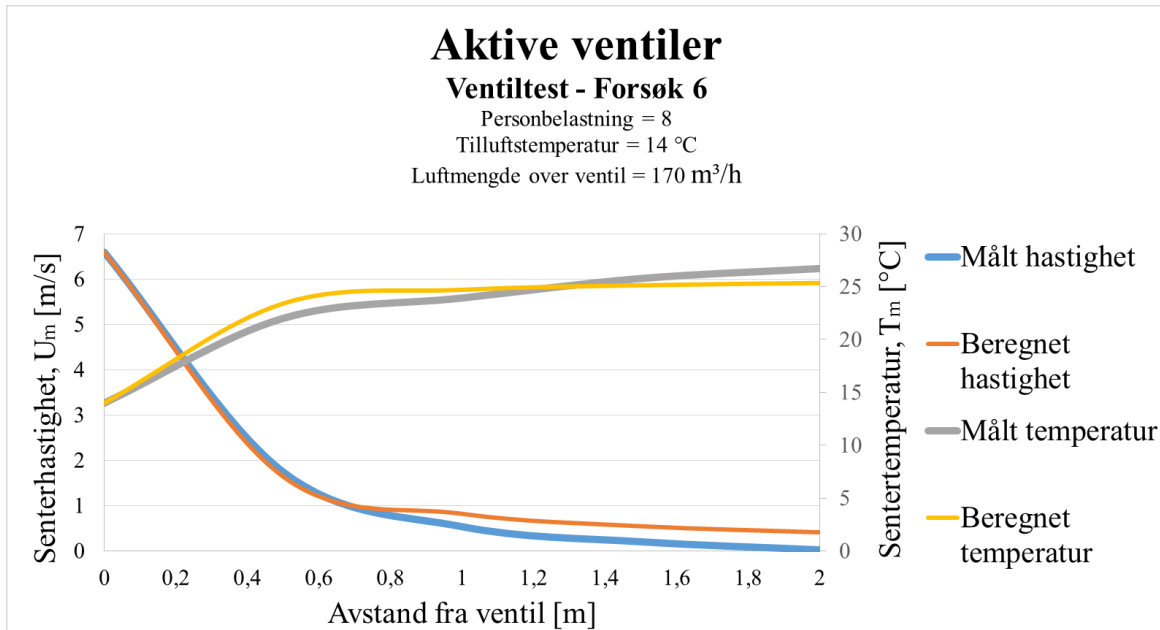
10.2 Ventiltest

I dette avsnittet sammenlignes målte og beregnete verdier for en radiell veggstråle langs tak. Se Figur 37 for oversiktsbilde over måleoppsett for ventiltest.

10.2.1 Aktive ventiler

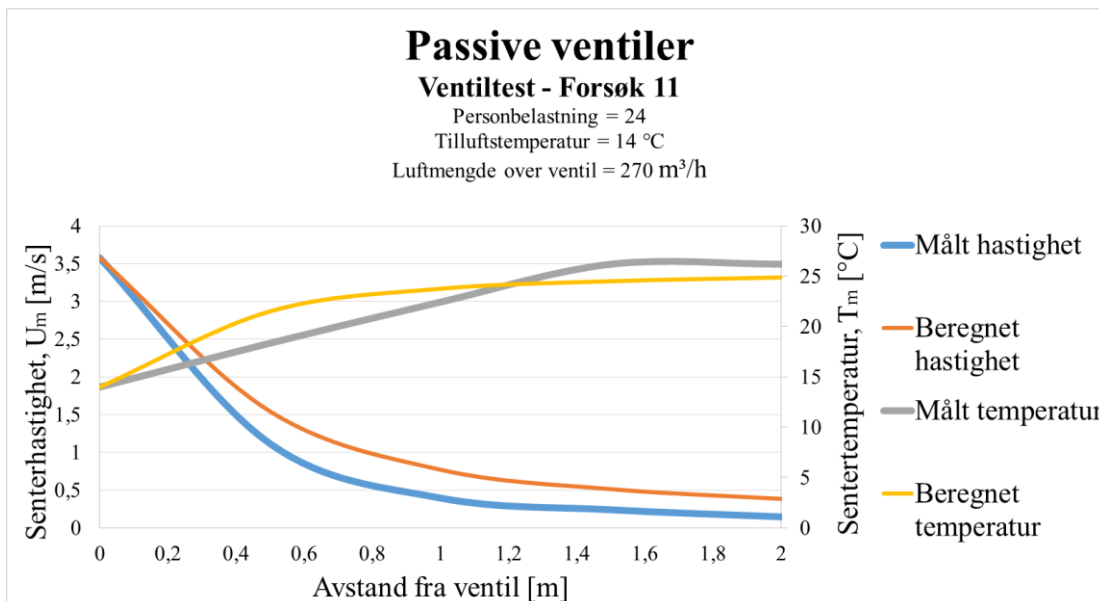


Målte verdier for temperaturen langs strålen ligger tett opp mot beregnete verdier. For lufthastigheten ut fra den aktive ventilen er det målt noe høyere lufthastighet enn beregnet.

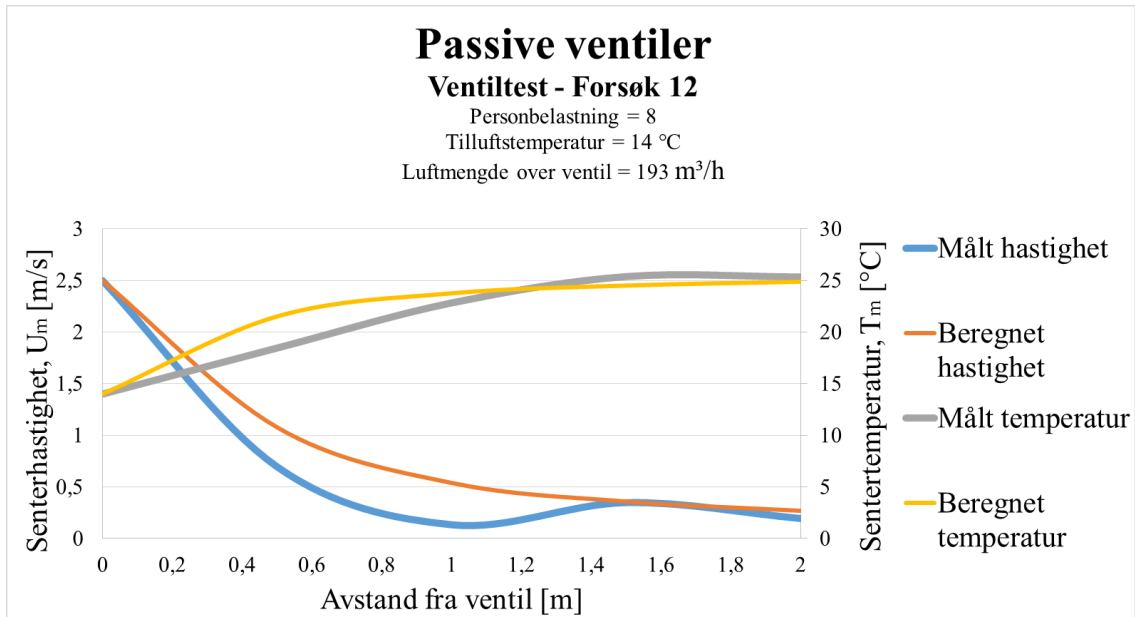


Målte og beregnede verdier samsvarer i store deler av dette forsøket. Sentraltemperaturen øker som følge av god induksjon med romluft. Sentralhastigheten i luftstrålen minker gradvis med økende avstand fra ventil.

10.2.2 Passive ventiler



I dette forsøket med passive ventiler oppnår ikke temperaturen like god innblanding med romluften like etter utløpet, slik som beregnet. Målte hastigheter viser mer avtagende lufthastighet enn beregnet. Dette kan skyldes at luftstrålen ikke oppnår like god klebing til tak, og bremses mer opp av termiske krefter.



Lufthastigheten minker mer for målte verdier enn for beregnede. Etter 1,5 m jevner den seg ut igjen med beregnet. Sentraltemperaturen i strålen nærmer seg beregnete verdier fra 1,5 m og utover.

Oppsummering av beregninger på luftstråler

Beregninger viser at det vil oppstå høye hastigheter i oppholdssonen etter at strålen avløses fra tak. Senterhastigheten på strålen som faller inn i oppholdssonen vil overstige kravet på 0,15 m/s.

Til gjengjeld er det ikke tatt hensyn til konveksjonsstrømmer i rommet som i mange tilfeller vil motarbeide den nedoverrettede luftstrålen fra tak.

11 Resultat fra eksperimentelle forsøk

I dette kapittelet blir resultatene fra måleseriene presentert og diskutert. Målinger og modeller vil i denne rapporten gi en indikasjon på det termiske inn klimaet.

11.1 CO₂-konsentrasjoner

Grafene viser CO₂-konsentrasjonens forløp etter hvert som forsøket pågår. I grafene er CO₂-konsentrasjonene for alle punkter i rommet vist sammen med luftmengden til enhver tid.

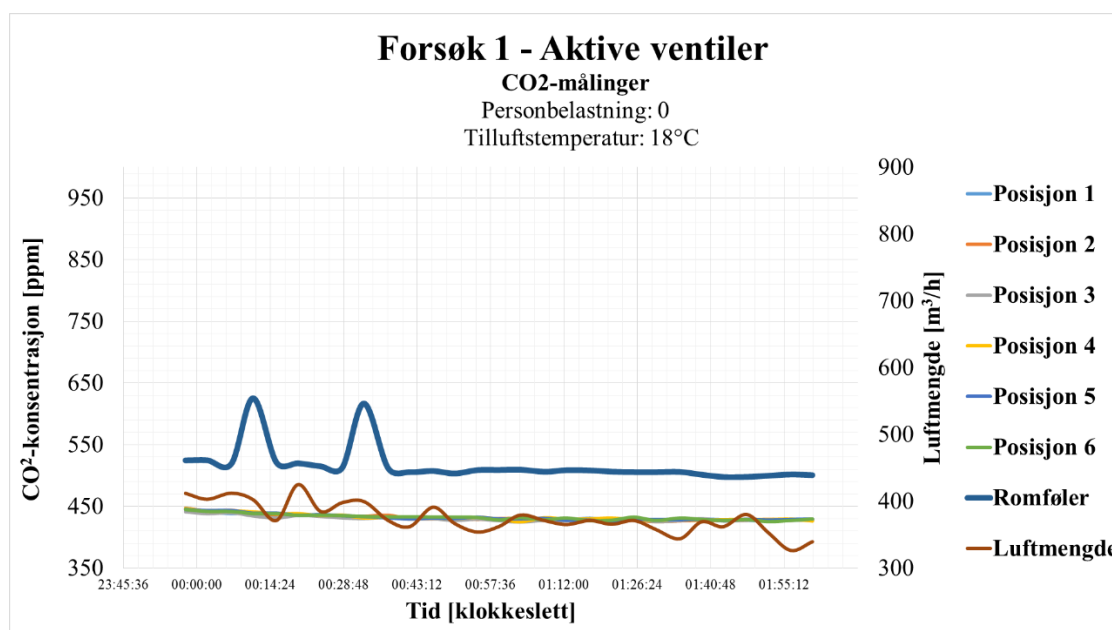
For oversikt over forsøksnummer, er dette gitt i Tabell 13. Figur 41 viser plassering av målepunkter for CO₂. Grafene viser konsentrasjonsvariasjonene for punktene i rommet ved bruk av henholdsvis passiv og aktiv ventil. Hensikten for alle forsøkene er at de skal være helt til CO₂-konsentrasjonene i rommet blir stabilisert. For de fleste forsøk oppnås dette 1,5-2 timer etter start.

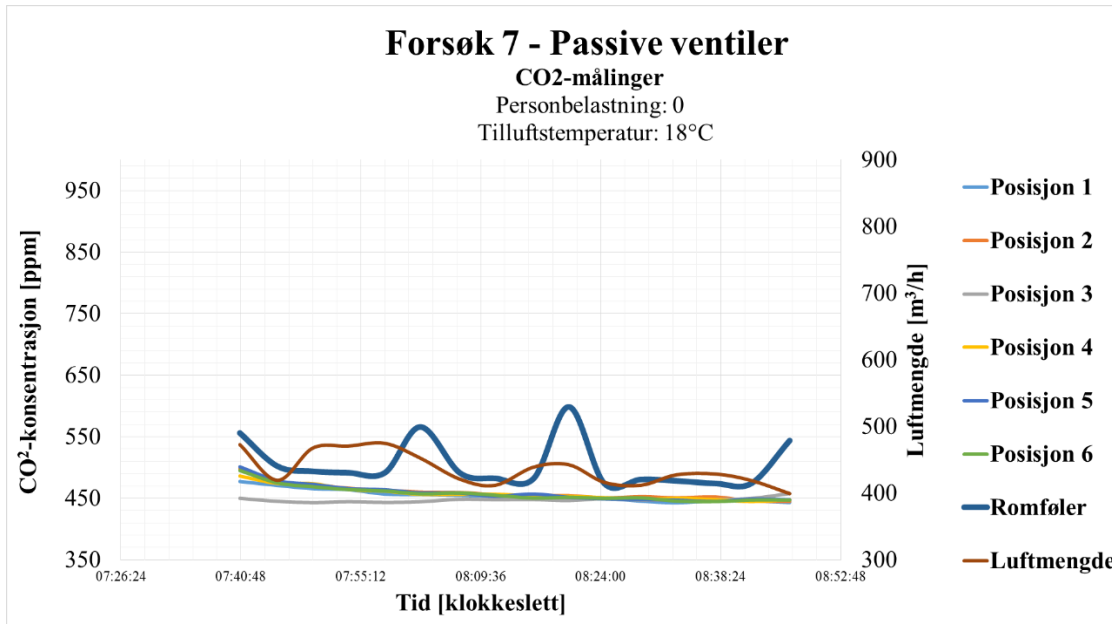
For å kunne sammenligne alle grafene mot hverandre er det valgt å holde lik verdi på y-aksen for de forsøkene som kan sammenlignes. Altså de forsøkene med lik personbelastning. I noen tilfeller vil verdiene overstige maks grensen for y-aksen i grafene. Det vil da bli opplyst i hver del om de toppverdiene for de tilfeller dette gjelder.

Det rettes stor usikkerhet i rett tilført mengde CO₂ til rommet under forsøk. Det var krevende å stille inn nøyaktig CO₂-tilførsel med rotameteret.

FORSØK 1 og 7

Det første forsøket for hver av de ulike ventiltypene ble gjennomført for å se hvordan systemet opererte uten personbelastning.





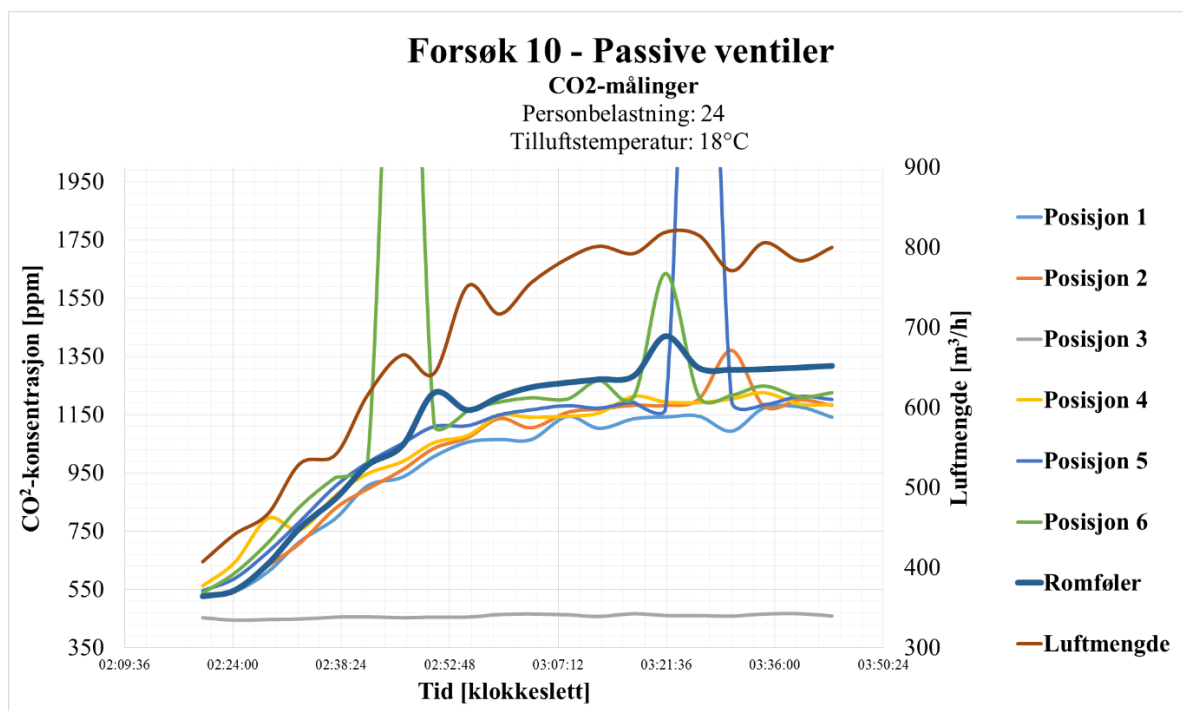
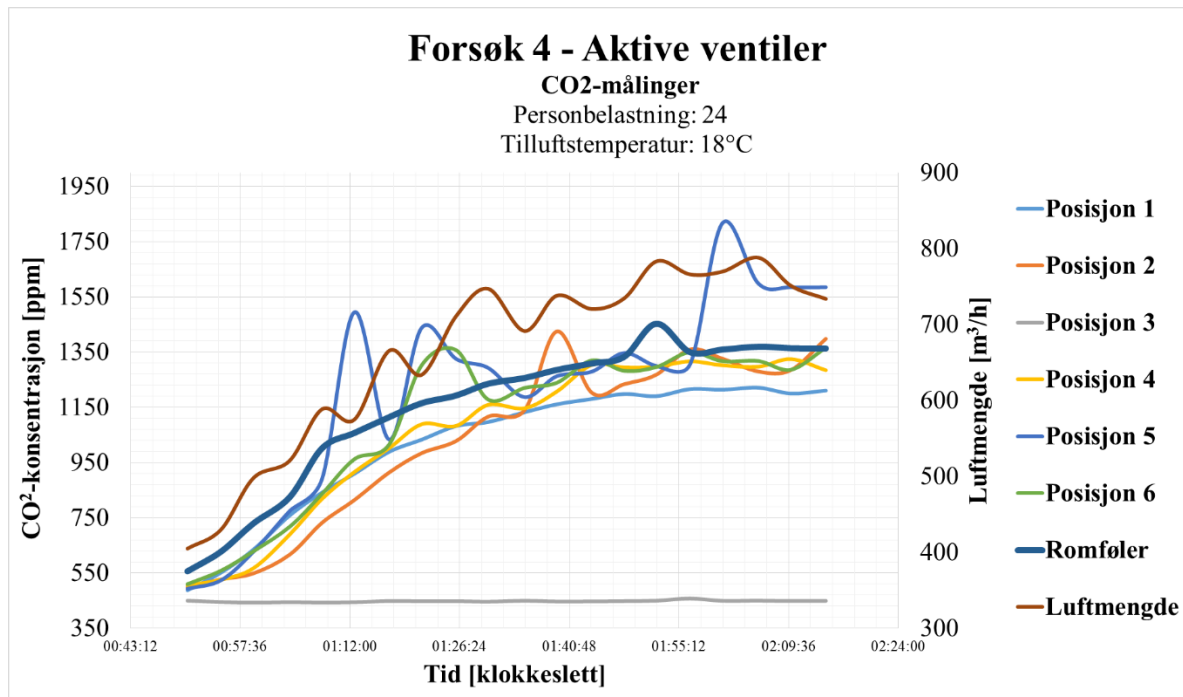
Sammenligningen av resultatene fra forsøk med 0 personbelastning viser at forløpet av CO₂-konsentrasjoner er relativt like for de to ventiltypene, og stabilt på 450 ppm.

Trykket fra aggregatet har under begge forsøkene vært det samme. Som det kommer fram av grafene er luftmengden følgelig større ved passive ventiler enn for aktive. Etter møte med Swegon ble det konkludert med at dette skyldes at aktive ventiler ikke kan levere like store luftmengder ved samme trykk som for passive.

Fordi de aktive ventilene ikke tilfører like mye luft til rommet ved samme trykk som de passive, vil det ikke være en fullstendig sammenligning. Systemet som helhet kan likevel vurderes.

Forsøk 4 og 10

I disse forsøkene ble tilluftstemperaturen holdt konstant på 18°C og personbelastningen var 24 personer.



I disse forsøkene er personbelastningen høyere, og følgelig er CO₂-konsentrasjonen høyere. I begge tilfeller stabiliserer CO₂-konsentrasjonene seg på mellom 1150-1350 ppm.

For forsøk 10 er det tydelig at det i to posisjoner er kraftige sprang over 3000 ppm, før neste verdi er tydelig lavere igjen. Dette kan være grunnet lokale stagnasjoner i det området den tiden målinger ble foretatt. Til opplysning er verdiene for toppunktene i posisjon 6 på 3350 ppm og

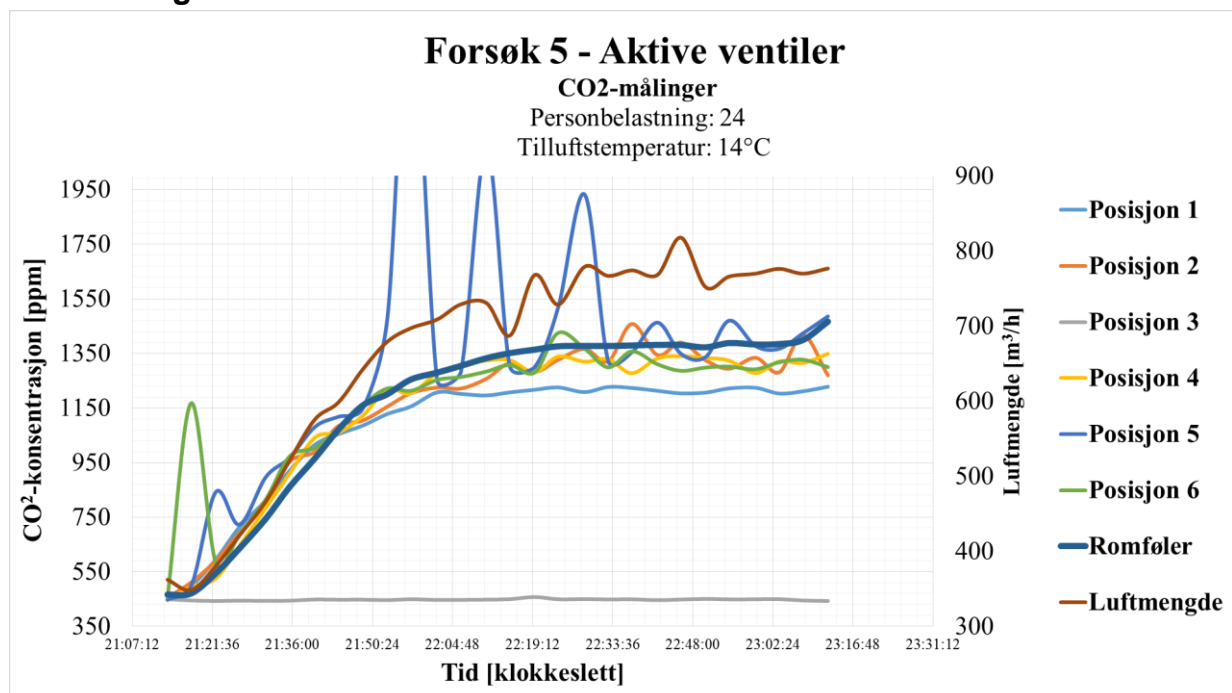
henholdsvis på 3500 for posisjon 5. Spranget er mest markant ved bruk av passive ventiler, men forurensningskonsentrasjonen i punkt 5 og 6 er jevnt høyere ved aktive ventiler. Dette kan være et resultat av to ulike strømningsbilder, pga. ulik hastigheter over ventilen.

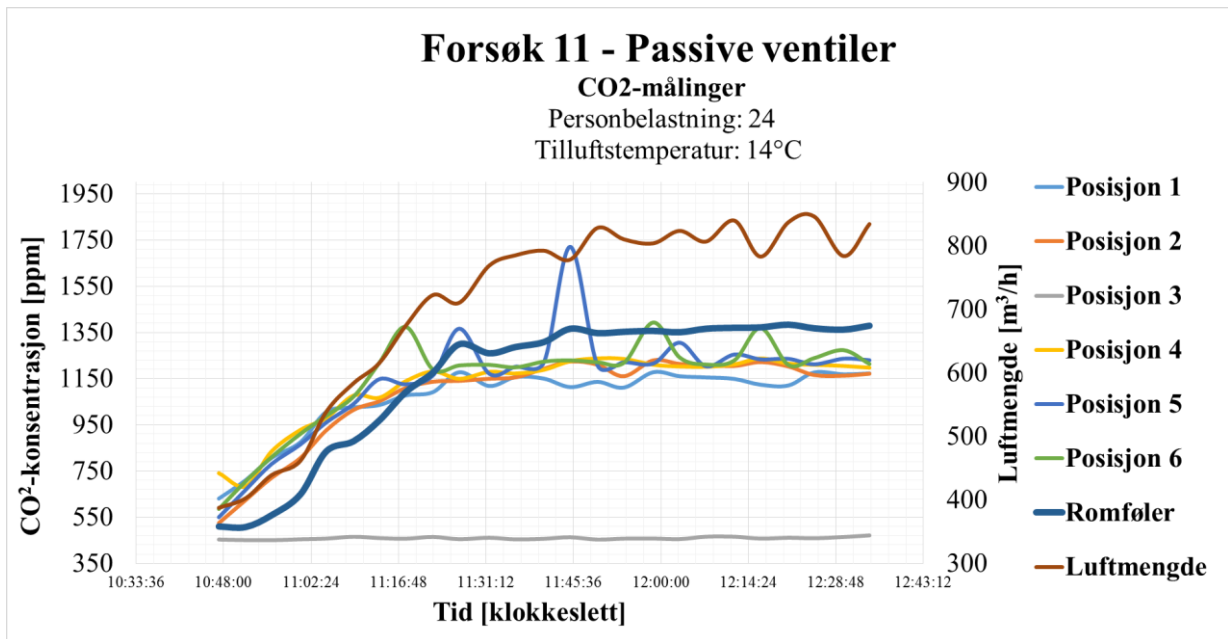
Ved passive ventiler er det på slutten av forsøket registrert noe høyere luftmengder (780 m³/h) enn ved slutten for aktive ventiler (750 m³/h). Dette kan være grunnen til at CO₂-konsentrasjonen er noe høyere ved slutten for aktive ventiler. Ved slutten er det i mellom 1300-1350 ppm for de fleste posisjonene. For de passive ventilene ligger CO₂-konsentrasjonene noe lavere, mellom 1150-1200 ppm for de fleste posisjonene.

Ventilasjonsluftmengdene er ikke tilstrekkelige for å kunne holde CO₂-konsentrasjonen under 1000 ppm. Trykket aggregatet leverer med skulle ha vært tilstrekkelig til å levere nok luftmengder, men fordi ventilasjonssystemet er underdimensjonert i forhold til personbelastningen vil ikke systemet takle høyere luftmengder, uten at det går ut over krav til lydnivå kanalnett og over tilluftsventilen.

Ved slutten av forsøkene oppnås lokal ventilasjonseffektivitet (ϵ_v) på 0,94 for aktive ventiler og 0,87 for passive ventiler. Det er valgt å ta utgangspunkt i målepunkt 6 ved utregning av ventilasjonseffektivitet.

Forsøk 5 og 11





For forsøket med passive ventiler stabiliserer CO₂-konsentrasjoene seg mellom 1150-1200 ppm, men for de aktive er dette spranget større og ligger mellom 1200-1500 ppm for de ulike posisjonene. For de aktive er luftmengden i snitt rundt 750 m³/h, mens luftmengden for de passive er i snitt 800 m³/h mot slutten.

Posisjonen 5 og 6 har også i dette forsøket mange sprang som viker fra grafene for de andre posisjonene i rommet. Som tidligere antatt, skyldes dette mest sannsynlig stagnasjon av luft i området rundt posisjonene 5 og 6.

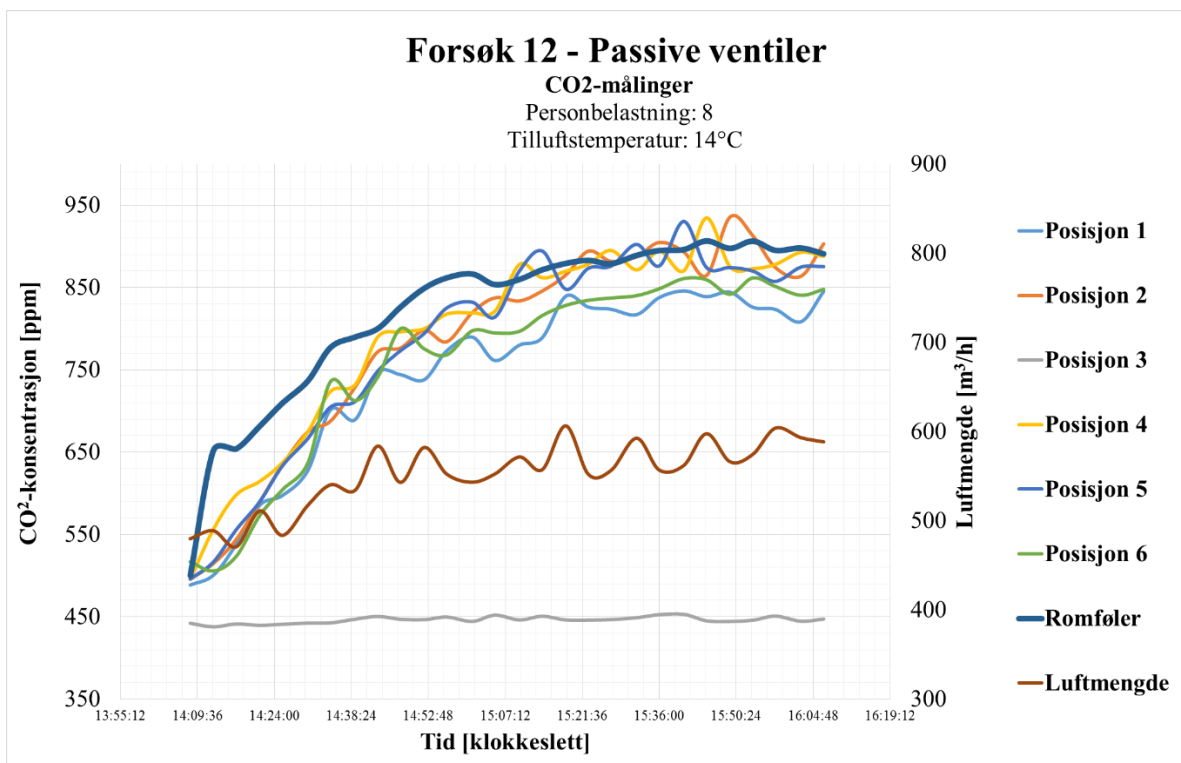
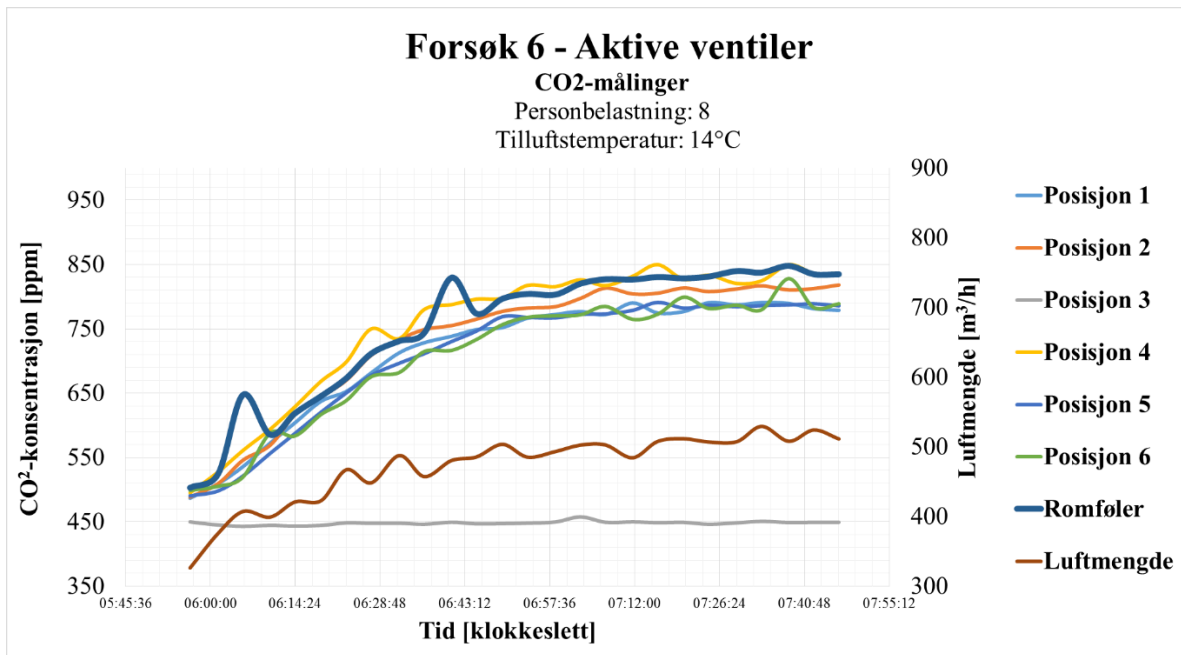
Ved slutten av forsøkene oppnås lokal ventilasjonseffektivitet (ϵ_v) på 0,94 for aktive ventiler og 0,97 for passive ventiler. (Punkt 6)

Myndighetene anbefaler ikke CO₂-konsentrasjon over 1000 ppm. Felles for alle forsøk med full personbelastning, er at CO₂-konsentrasjonen overstiger 1000 ppm, til tross for tilstrekkelige luftmengder i forhold til krav.

CO₂-konsentrasjonene i ulike posisjoner er lite forandret ved sammenligning mot forsøk 4 og 10.

Forsøk 6 og 12

I disse forsøkene ble tilluftstemperaturen holdt konstant på 14°C og personbelastningen var 8 personer.



I disse forsøkene er personbelastningen lavere, og følgelig er CO₂-konsentrasjonen lavere. Det gjør at CO₂-konsentrasjonene stabiliserer seg på et lavere nivå. Det tydelig forskjell i konsentrasjonsforløpet til de to ulike tilluftsventilene. Ved slutten av forsøket med passive ventiler varierer luftmengden mellom 550-620 m³/h, og CO₂-konsentrasjonen er mellom 830-900 ppm. Ved slutten med de aktive ventilene er derimot luftmengden lavere og ligger mellom

520-540 m³/h. CO₂-konsentrasjonen også en betydelig lavere verdi, mellom 770-850 ppm. CO₂-konsentrasjonene varierer betydelig mer for passive ventiler enn ved aktive. Dette kan skyldes at de aktive ventilene klarer å opprettholde et mer uniformt strømningsbilde i rommet.

At omtrent alle punkter registrerer forholdsvis like verdier, viser at omrøringen skaper et uniformt forurensningsbilde i rommet.

Ved slutten av forsøkene oppnås lokal ventilasjonseffektivitet (ϵ_v) på 0,99 for aktive ventiler og 1,0 for passive ventiler (Punkt 6).

11.2 Lufttemperatur og lufthastighet i oppholdssonen

De neste grafene viser lufthastighetene i oppholdssonen når systemet har stabilisert seg, og luftmengden er konstant. Resultatene for lufthastigheter i oppholdssonen er i tillegg vist i samme figur for å kunne sammenligne passive og aktive ventiler opp mot hverandre.

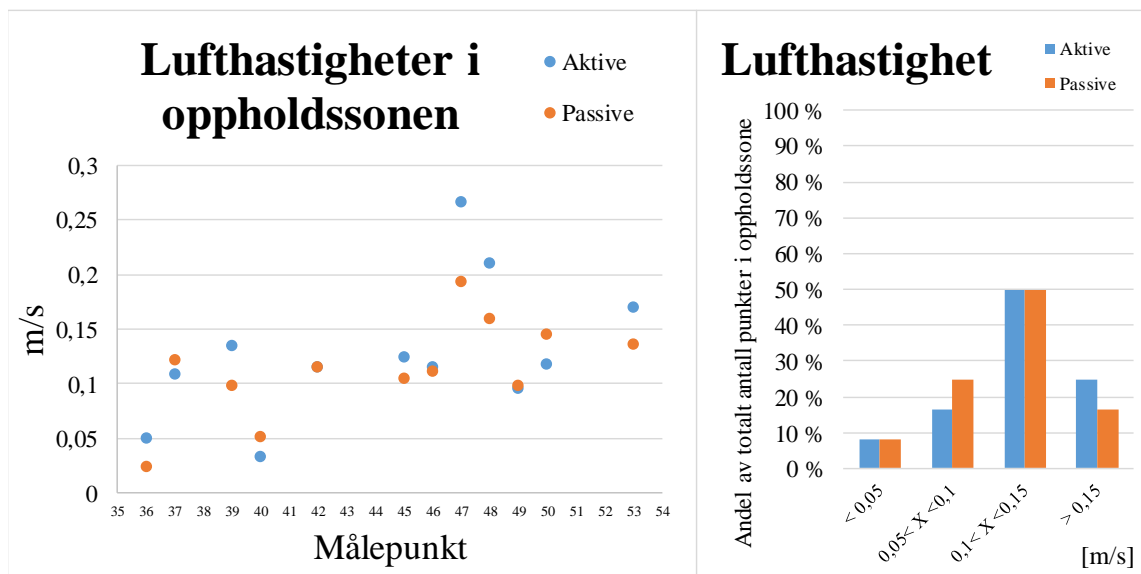
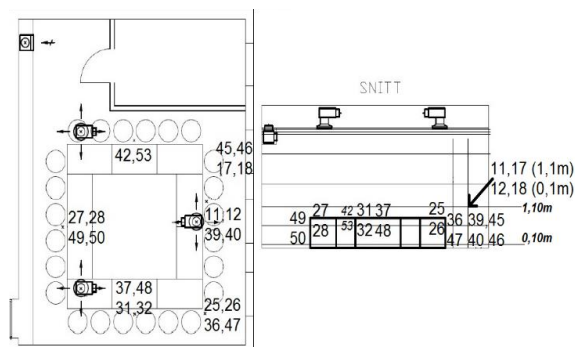
Sammenligning mellom passive og aktive ventiler

Følgende figurer og grafer viser forskjellen i lufthastigheter og temperaturer i oppholdssonen ved aktive og passive ventiler. Forsøkene er ikke direkte sammenlignbare ettersom ikke alle forutsetningene er like. Under forsøk har tilluftstemperaturen vært den samme, men luftmengden har vært noe høyere ved bruk av passive ventiler. Dette fordi de aktive ventilene ikke har kunnet levert tilsvarende luftmengder ved samme trykk som de passive. I samtale med Swegon, produsenten av ventilasjonsanlegget, ble det konstatert at ventilasjonssystemet i prøverommet var underdimensjonert i forhold til den personbelastningen og varmebelastningen som oppstår i forsøkene.

Ved evaluering av inneklimate er forsøkene 4,5,6,10,11 og 12 valgt. Dette valget er basert på at det i disse forsøkene oppstår mest kritiske tilstander når det gjelder tidlig avløsning av luftstråle fra tak.

Resultat fra forsøkene 1,2,3,7,8,9 er gitt i vedlegg B.

Forsøk 4 og 10			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	760	785	m ³ /h
Tilluftstemperatur	18	18	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	8	8	°C
Personbelastning	24	24	

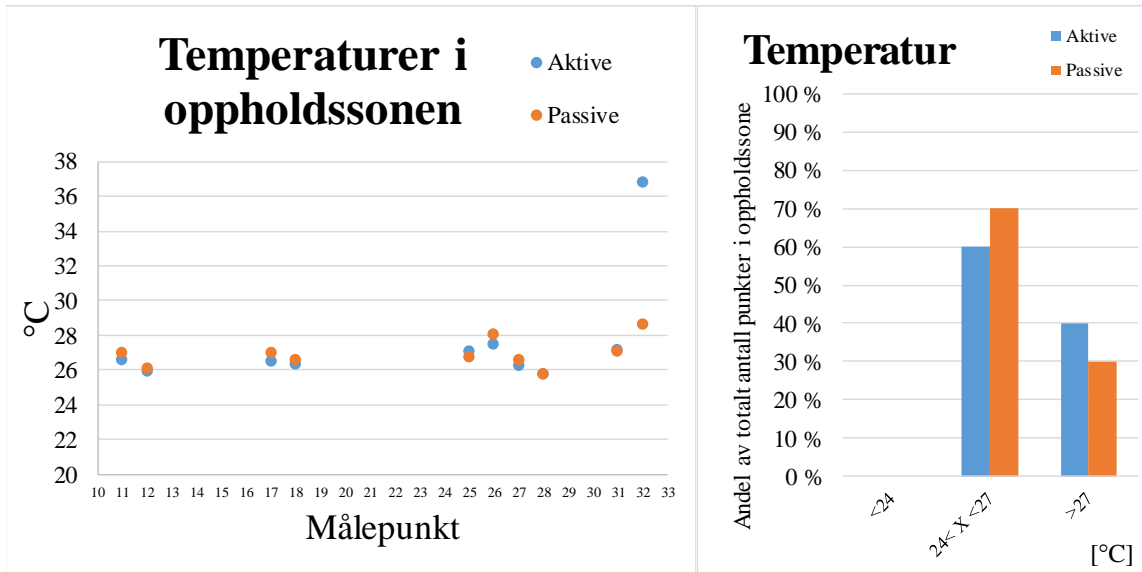


Av figuren for lufthastigheter i oppholdssonen er lufthastighetene i rommet i de fleste posisjoner under kravet på 0,15 m/s, både ved aktive og passive ventiler. I forsøket er maksimalverdier i oppholdssonen høyere ved aktive ventiler. Lufthastighetene varierer for de enkelte punktene i rommet. Fra figuren kan man se at lufthastigheten i de fleste punkter var i området 0,05-0,15 m/s.

Retten under tilluftsventilen, i punkt 40, er det registrert lave lufthastigheter. Årsaken til lav lufthastighet i dette punktet kan skyldes at luftbevegelsene ikke er like store.

I måleresultater overstiges krav til maksimal lufthastighet i oppholdssonen i punktene 47, 48 og 53. Dette er punkter som er plassert i en høyde av 0,1 m over gulv.

I noen punkter er lufthastighetene lavere enn ellers i oppholdssonen. Dette kan tyde på lavere luftbevegelse, og kan medføre mer stillestående luft. Stillestående luft kan tyde på dårlig ventilasjonseffektivitet.



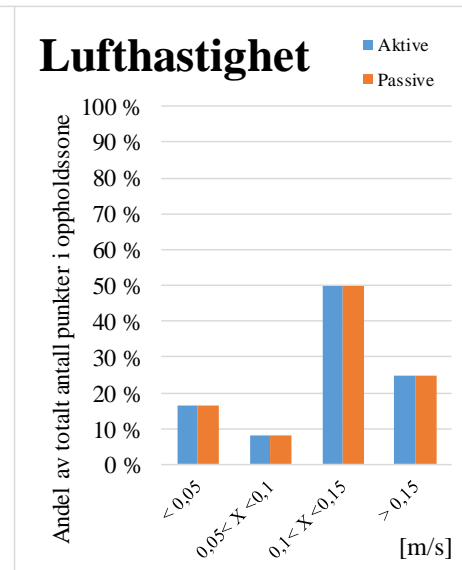
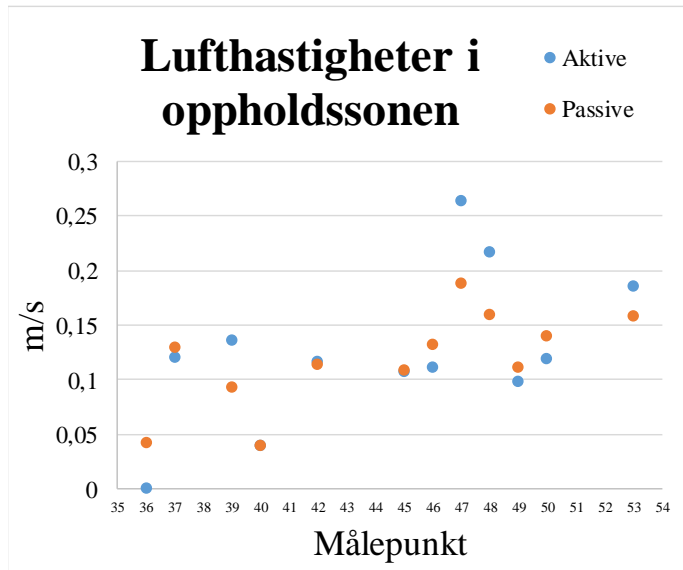
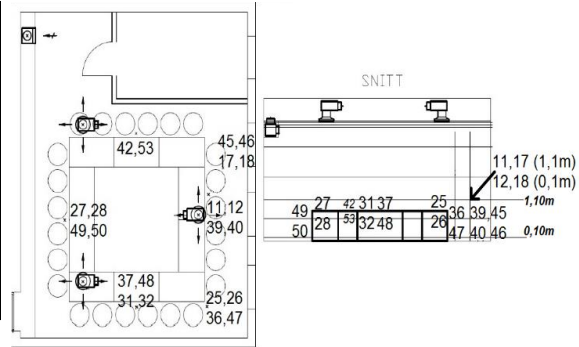
I henhold til måledata fra forsøk er romluftstemperaturen forholdsvis ensartet i de ulike måleposisjonene i oppholdssonen. Den vertikale temperaturforskjellen er sammenlignet for et nivå på 0,1 m, og et nivå på 1,1 m. Det er ikke registrert verdier som overstiger krav til vertikal temperaturforskjell.

Temperaturen i punkt 32 er unormalt høy. Dette kan skyldes at termoelementet ligger for nær varmefoliet på gulvnivå.

Figuren viser temperaturfordelingen i oppholdssonen ved forsøk med aktive og passive ventiler. Alle temperaturer viser seg å ligge i stor grad mellom 26-28°C, med noen unntak der temperaturene overstiger 28°C. Krav til temperaturer i oppholdssonen om sommeren tilsier at temperaturen ikke bør overstige 26°C. I dette forsøket vil ikke krav til temperatur tilfredsstilles. Dette vil si at ventilasjonen ikke har nok kjøleeffekt i rommet.

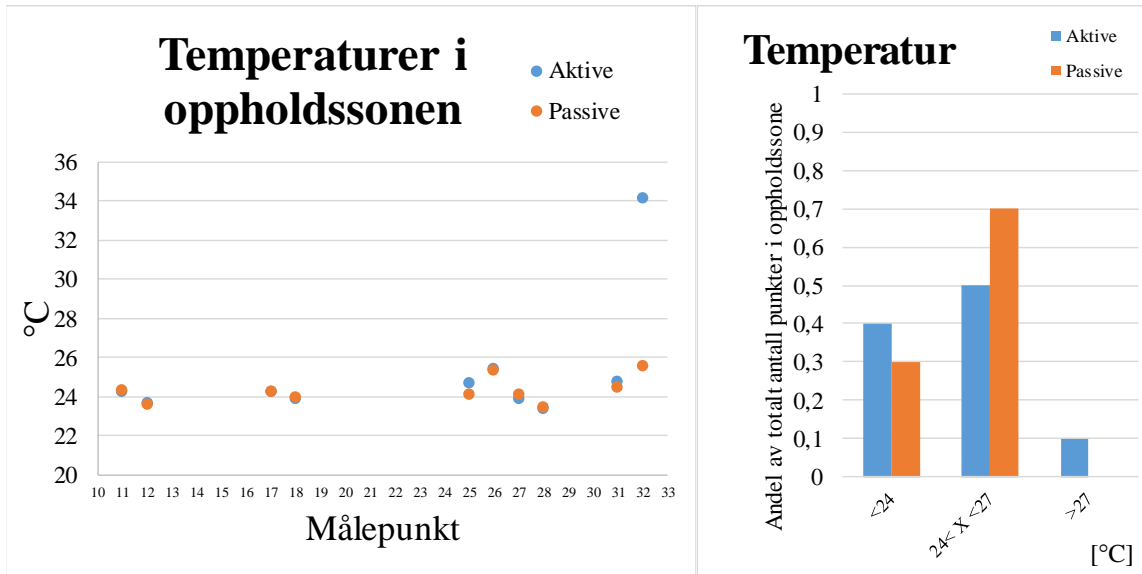
Sammenlignes de to tilluftsventilene mot hverandre er det tydelig at de temperaturen i oppholdssonen er relativt like i disse forsøkene.

Forsøk 5 og 11			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	785	830	m ³ /h
Tilluftstemperatur	14	14	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	12	12	°C
Personbelastning	24	24	



Generelt er lufthastighetsfordelingen i disse forsøkene relativt like som for forsøkene 4 og 10. De fleste hastigheter er målt innenfor området 0,1-0,15 m/s. I likhet med forsøk 4 og 10 er lufthastigheten høyere i punkt 47, 48 og 53.

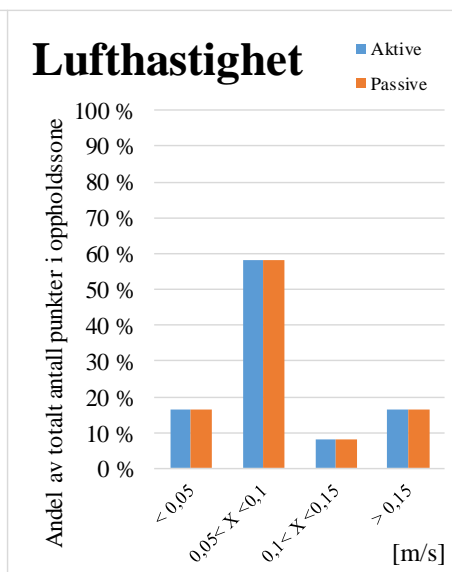
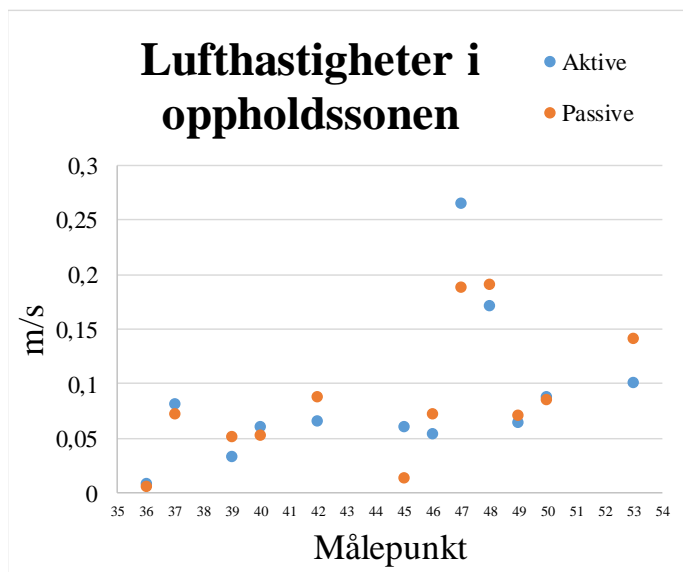
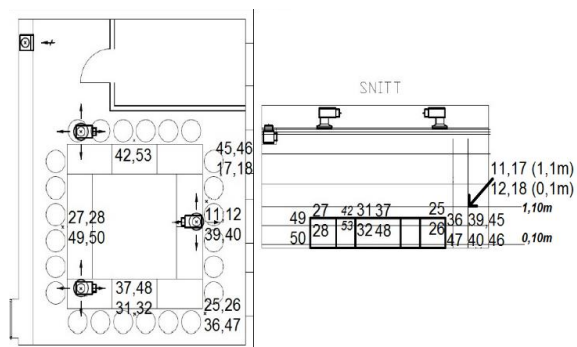
Sammenlignes søylediagrammet for forsøkene 5 og 11 med forsøkene 4 og 10, kan man se at det er målt høyere lufthastigheter i forsøk 5 og 11. Dette kan skyldes at det blir tilført luft med lavere temperatur, og luftstrålen vil følgelig avløses tidligere fra tak. Siden lufthastigheten overstiger anbefalte verdier, vil det for noen personer oppstå lokale ubehag som følge av trekkfølelse ved ankler.



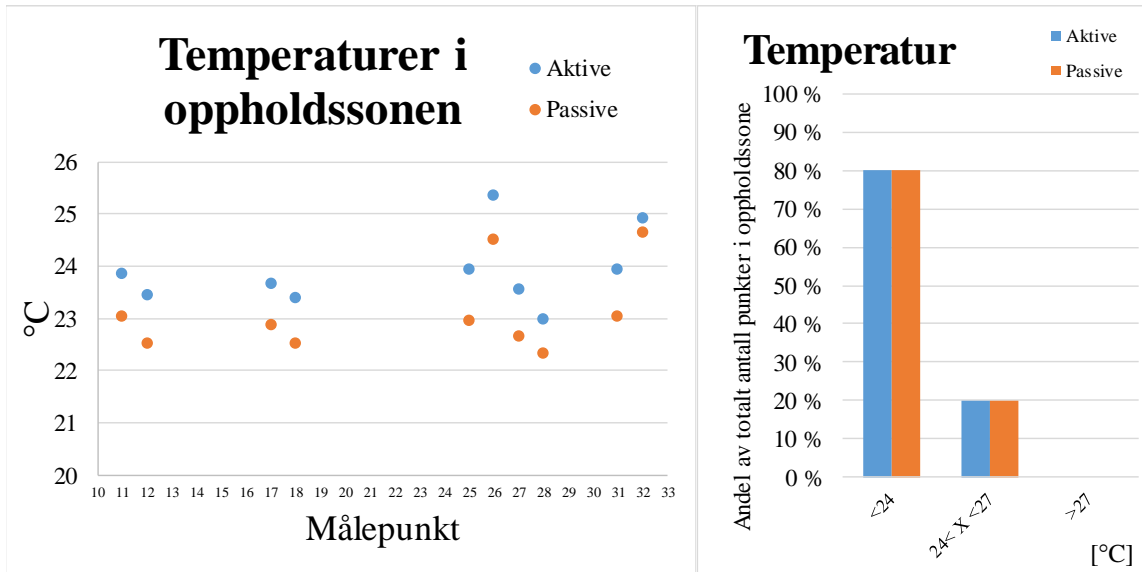
Som følger av lavere tilluftstemperatur er det i dette forsøket registrert lavere temperatur i oppholdssonen ved bruk av passive og aktive ventiler. Kjølekapasiteten til ventilasjonen oppnår temperaturer som er innenfor kravene.

Ved sammenligning av de to ventiltypene er det ikke store temperaturforskjeller i oppholdssonen i disse forsøkene.

Forsøk 6 og 12			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	510	580	m ³ /h
Tilluftstemperatur	14	14	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	12	12	°C
Personbelastning	8	8	



I forsøk 6 og 12 er personbelastningen lavere og tilluftstemperaturen på 14 °C. Som følger av mindre personbelastning tilføres det derfor mindre luftmengder i disse forsøkene. Dette ser ut til å forårsake lavere lufthastigheter i oppholdssonen enn i forsøkene 4,5,10 og 11 med større tilført luftmengde. Det er i likhet med de andre forsøkene målt høyere lufthastighet i punktene 47, 48. I punkt 53 er lufthastigheten noe høyere ved passive enn ved aktive. Dette kan skyldes at de aktive ventilene oppnår bedre induksjon og lengre kastelengde, før luftstrålen kommer inn i oppholdssonen.



I forsøk 6 og 12 er det mindre personbelastning, og følgelig er det mindre varmetilskudd til rommet. Kjølig tilluft og mindre varmebelastning gjør at temperaturen i oppholdssonen er lavere under disse forsøkene. Temperaturen i oppholdssonen er innenfor krav, og følgelig vil dette tilfredsstille krav til termisk komfort.

I forsøk 6 og 12 vises det at lavere tilluftstemperatur har liten innvirkning på lufthastighetene i oppholdssonen.

Ved sammenligning av de to tilluftsentilene er det målt høyere temperaturer i oppholdssonen ved bruk av aktive ventiler. Dette kan skyldes det faktum at de passive ventilene leverer større luftmengder til rommet, og oppnår dermed større kjøleeffekt.

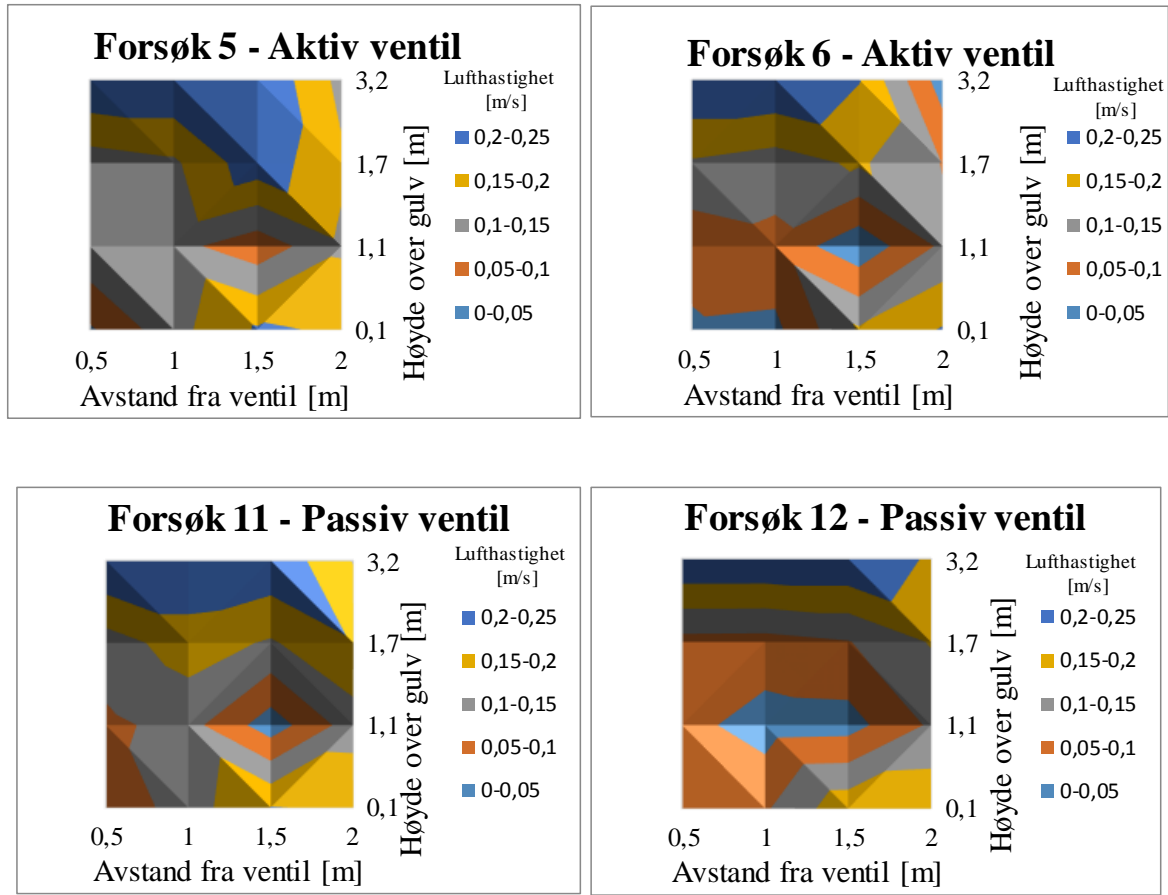
Temperaturen i punktene 26 og 32 er noe høyere enn for resten av målingene. Dette skyldes at målepunktene er plassert der solinnstrålingen bli simulert.

I all hovedsak vil ventilasjonen tilfredsstille kravene til termisk komfort i oppholdssonen.

I forsøk 2 og 8 gitt i vedlegg B oppstår det høyere temperaturer i oppholdssonen. Dette skyldes i stor grad at det tilføres luft med høyere temperatur (18 °C). Lufthastighetene er tilsvarende som i forsøk 6 og 12.

Overflatediagram

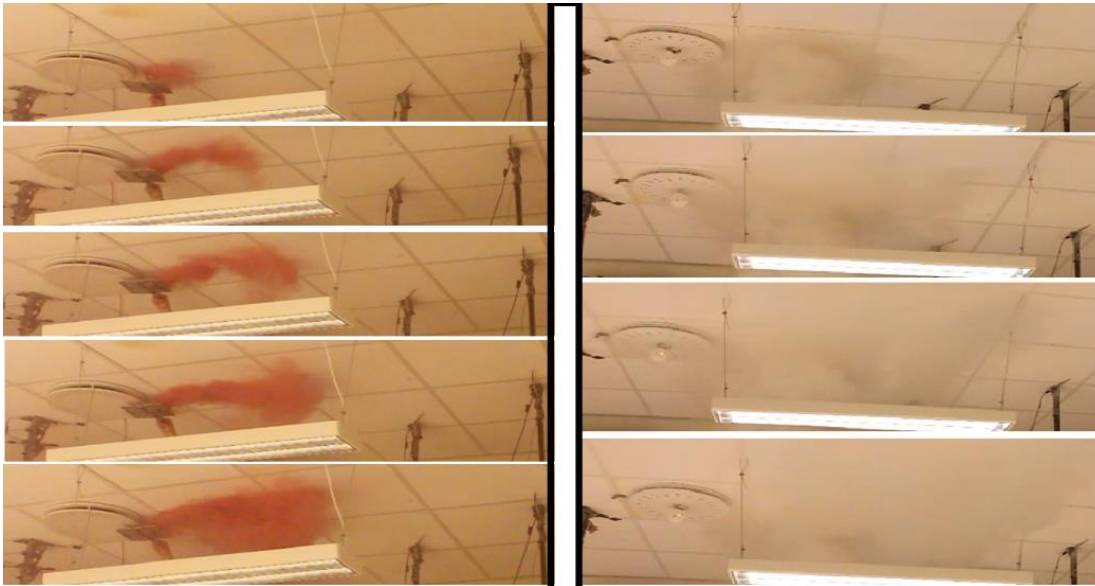
I følgende overflatediagram vises lufthastighetsfordelingen ved bruk av aktiv og passiv ventil. I forsøk 5 er luftmengden høyere enn i forsøk 6. Større luftmengder har i forsøkene forårsaket større lufthastigheter i oppholdssonen.



Overflatediagrammene viser illustrativt lufthastighetsfordelingen fra ventilene i et snittperspektiv. I sonen med blått helt øverst i diagrammet er lufthastigheten vist som 0,2-0,25 eller større.

Overflatediagrammene viser at det er stor likhet i strømningsbildet for de to ulike tilluftsventilene. Strømningsbildet viser at det ved reduisering av luftmengder i forsøk 6 og 12, oppstår lavere lufthastigheter i oppholdssonen (mellom 0-1,7 m i diagrammet).

Lavere luftmengder og undertemperert tilluft skal i teorien medføre høyere lufthastigheter i nærheten av passiv ventil på grunn av for tidlig avløsning av luftstråle fra tak. Ved bruk av røykappuller og røyksimulering ble det heller ikke funnet indikasjoner på nedfall av luft som følge av avløsning. Det ble under røyksimulering observert at varme konveksjonsstrømmer bidro til at luftbevegelser med hastighet rettet vertikalt nedover avtar etter hvert som luftstrålen faller ned i oppholdssonen.



Figur 46 - Luftstrålens avløsning fra tak ved aktive og passive ventiler

I Figur 46 vises bilde av lufstrålen ut fra passiv ventil (rød røyk) og aktiv ventil (hvit røyk). I begge tilfeller kleber strålen langs taket, før den avløses fra taket i en gitt avstand fra ventilens utløp.

11.3 Diskusjon og oppsummering

At ventilasjonssystemet er underdimensjonert preger CO₂-konsentrasjon og temperatur i prøverommet ved høy personbelastning. Underdimensjoneringen av tilluftssystemet fører til at anlegget ikke klarer å levere tilstrekkelige luftmengder. Dette gjelder både ved håndtering av CO₂-konsentrasjonen, og håndtering av kjølebehovet som oppstår i rommet.

Når det gjelder temperaturer og lufthastigheter i oppholdssonen varierer dette forholdsvis lite under de ulike forsøkene. En årsak til at temperaturene varierer lite og at undertemperert tilluft er varmere når den faller inn i oppholdssonen, skyldes i stor grad god omrøring. Varm luft fra rommet blandes inn i tilluftsstrålen, og gir denne hurtig oppvarming.

I de fleste forsøk er den vertikale temperaturen innenfor kravet på 3°C.

Ved sammenligning med CO₂-grafene kan det i denne rapporten konkluderes med at ventilasjonseffektiviteten er bedre ved bruk av aktive ventiler. De aktive ventilene opprettholder bedre omrøring ved endring av spaltehøyden under forsøk med mindre luftmengder. Høyere utløpshastighet fører til høyere luftbevegelser i rommet, noe som positivt påvirker ventilasjonseffektivitet. Til tross for mindre luftmengder tilført de aktive ventilene i forsøk 6, oppnås lavere CO₂-konsentrasjoner i rommet enn ved bruk av passive ventiler og høyere luftmengder (forsøk 12).

Lufthastighetene i oppholdssonen var i de fleste tilfeller under 0,15 m/s, selv ved tilluftstemperatur helt ned til 14°C. I noen punkter er det målt lufthastigheter som ikke tilfredsstillt kravene. Siden luftstrømning i rom er kompleks og påvirkes av mange ulike faktorer, er det krevende å gi klare konklusjoner på hvorfor disse høye lufthastigheten har oppstått i enkelte punkter i rommet.

I noen målepunkter er det meget lave lufthastigheter. Årsaken til lave lufthastigheter i oppholdssonen kan skyldes at luftstråler fra tilluftsventilen oppnår god induksjon med romluft. Induksjonen fører til rask hastighetsreduksjon av strålen like etter ventilutløpet.

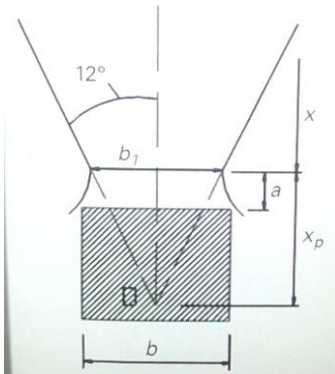
I Mari-Liis Maripuu's akademiske avhandling fra 2006 (Maripuu 2006), er det gjennomført målinger med aktive-tilluftsventiler for å se påvirkningen av de termiske forhold ved varierende luftmengder. I likhet med resultatene i dette studiet, viste resultatene fra Maripuu's avhandling at krav til inn klima i hovedsak ble oppfylt, til tross for reduserte luftmengder og lav tilluftstemperatur.

I likhet med student Kai Robert Vandsvik, som våren 2013 utførte forsøk på aktive og passive ventiler, kan det konkluderes med at de aktive ventilene oppnår høyere ventilasjonseffektivitet enn for passive i forsøkene.

Varmekildene i rommet har innflytelse på luftbevegelser i rommet. Oppdriften fra varmekilder motarbeider og kan utligne hastigheten luftstrålen når den løsner fra taket. Dette kan være grunnen til at det ikke oppstår høye lufthastigheter i oppholdssonen. I tillegg vil solinnstrålingen, simulert med varmefolie på gulv, forsterke varmeoppdriften fra gulvet.

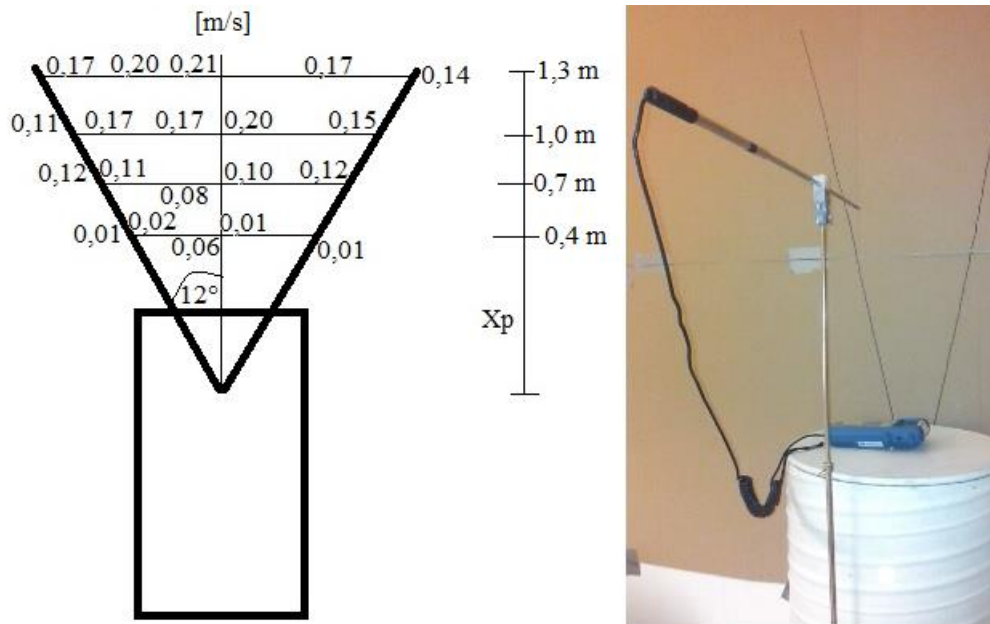
Lufthastighet i en varmekonveksjonsstrøm

Det ble gjennomført et forenklet forsøk for å studere lufthastighetene over et spirorør. Det ble benyttet en håndholdt luftføler i dette forsøket. Det ble målt lufthastighet i den vertikale oppdriften fra varmekonveksjonsstrømmen. Denne lufthastigheten vil motarbeide luftstråler som faller nedover.



Figur 47 - Konveksjonsstrøm over varmekilde (Stensaas and Hovland 2001)

I Figur 47 er bredden av det varmeavgivende objektet lik b . Bredden av konveksjonsstrømmen i det området den er smalest, er b_1 . (Stensaas and Hovland 2001)



Figur 48 – Skjematisk bilde av målinger av lufthastighet fra konveksjonsstrøm over et spirorør.

I tillegg til målinger ble det utført beregning på sentralhastighet fra en punktkilde. Det ble i beregningene benyttet formel for punktkilde i (Skåret 2000). Den konvektive effekten [W] fra varmekilden kan som regel settes lik 50% av den totalt tilførte effekten. (Stensaas and Hovland 2001) Lyspæren som avgir varmen til spirorøret er på 75 W. I beregningen lufthastigheten som funksjon av avstanden over varmekilden vist.

$x+x_p$ (m)	Lufthastighet	Benevning
0,4	0,58	<i>m/s</i>
0,7	0,48	<i>m/s</i>
1	0,43	<i>m/s</i>
1,3	0,39	<i>m/s</i>
1,6	0,37	<i>m/s</i>
1,9	0,35	<i>m/s</i>

Tabell 15 - Oversikt over lufthastighet over varmekilden

Både beregninger og målinger viser i dette studiet at det oppnås relativt store lufthastigheter over varmekilden. Ved røykttest ble det observert at luftstrømningen ut fra tilluftsventilen ble motarbeidet av konveksjonsstrømmer generert av varmekildene i rommet.

12 Konklusjon og videre studier

12.1 Konklusjon

Hensikten med denne rapporten er å vurdere termisk og atmosfærisk inneklime ved behovsstyrt ventilasjon. Studiet tar for seg behovsstyrt ventilasjon ved bruk av enten aktive ventiler eller passive ventiler i kombinasjon med VAV-spjeld. Målinger er foretatt i laboratorium satt opp som et møterom med innblåsing fra tilluftsventiler plassert i tak. For å kvantifisere ulike klimaparametere, ble lufthastighet, lufttemperatur og luftkvalitet (CO₂-innhold) målt på forskjellige steder i rommet, hovedsakelig i oppholdssonen. Ved å analysere måledataene, har ytelsen til ventilasjonsanlegget for varierende luftmengder blitt dokumentert ved hjelp av ulike tilluftsventiler.

I tillegg er flere beregninger og forsøk foretatt for å studere temperatur- og hastighetsfordelingen langs en luftstråle, og for å fastlegge hvor avløsning fra tak skjer.

For å oppfylle krav til termisk komfort i oppholdssonen, bør ventilen skape et stabilt luftstrømningsbilde, uavhengig av tilluftsmengden. Ved lavere luftmengder bør det ikke forekomme risiko for at kald tilluft avløses for tidlig fra tak, og at luftstrålen faller inn i oppholdssonen med for høy hastighet og lav temperatur.

For å sammenligne strømningsbildene for to ulike tilluftsventiler, ble det gjennomført forsøk i et prøverom med variasjon i personbelastning og følgelig variasjon i luftmengder. Tilluftstemperaturer helt ned til 14°C ble tilført prøverommet for den hensikt å studere strømningsbildet i rommet.

Resultater fra dette studiet bekrefter at lufthastigheter, lufttemperaturer og konsentrasjonen av CO₂ i prøverommet varierer ved behovsstyrt ventilasjon. Ulike tilførte luftmengder gir ulik omrøring i prøverommet både for passive og aktive ventiler.

Resultater fra forsøk viser at temperaturen i forsøk med full personbelastning overstiger kravet til anbefalt temperatur (26°C). CO₂-konsentrasjonen ved full personbelastning overstiger anbefalte verdier på 1000 ppm.

I forsøk gjennomført i laboratoriet har risikoen for trekk vært lav til tross for lave luftmengder og lave tilluftstemperaturer. I de fleste punkter lå lufthastighetene under kravet på 0,15 m/s, mens det i enkelte punkter i oppholdssonen ble målt lufthastigheter opp mot 0,3 m/s.

For forsøk med lav personbelastning ble krav til termisk komfort og luftkvalitet i all hovedsak oppfylt.

Ventilasjonseffekten for punktene i oppholdssonen lå sjelden under 0,9, med unntak av noen punkter der det viste seg å være gjentakende forringet sirkulasjon på luften.

Ved sammenligning at de to tilluftsventilene er det få resultater som viser markante forskjeller i temperatur- og hastighetsfordeling i oppholdssonen. Det kan konkluderes med at de aktive ventilene oppnår bedre ventilasjonseffektivitet. Dette skyldes i hovedsak at luftstråler ut fra aktive tilluftsventiler oppnår høyere hastigheter som følge av redusert utblåsningsareal.

Ved beregning av luftstrålens hastighet inn i oppholdssonen, oversteg hastigheten anbefalte krav. Dette ble ikke målt i noen punkter under forsøk. Det konkluderes med at konveksjonsstrømmer fra varmekildene i rommet har motarbeidet høye lufthastigheter fra tilluften.

Beregninger på luftstråler langs takflaten ble sammenlignet med ventilforsøk. Modellene fra beregning samsvarer godt med målte verdier. Luftstrålen oppnår tidlig en temperaturøkning og hastighetsreduksjon som følge av induksjon.

12.2 Videre studier

En videreføring av denne oppgaven kan være å se nærmere på strømningsforhold fra ventiler med fleksibelt spredningsbilde, slik som vist i Figur 49. Dette for å se om denne tilluftstypen egner seg bedre i møterom eller kontorlandskap ved store kjølebehov og varierte luftmengder. Denne enheten kan leveres som passiv enhet eller som en aktiv enhet. Ved aktive ventiler er alle reguleringskomponenter innebygget i tilluftsventilen.



Figur 49 - Tilluftsventil med regulerbare dyser

Ved å regulere dysene kan luftstrålene føres vekk fra området hvor det ikke er ønskelig med høye luftbevegelser. Forsøk kan utføres for ulike spredningsbilder ved å endre retningen på dysene.

13 Referanser

Arbeidstilsynet (2012). "Klima og luftkvalitet på arbeidsplassen." Retrieved 14.03.2014, 2014, from <http://www.arbeidstilsynet.no/veiledning.html?tid=78036>.

Arbejdtilsynet, D. d. "Temperatur i arbejdsrum på faste arbejdssteder." Retrieved 03.03.14, 2014, from <http://arbejdstilsynet.dk/da/regler/at-veiledninger-mv/arbejdsstedets-indretning/a-1-12-temperatur-i-arbejdsrum/a112-temperatur-i-arbejdsrum.aspx>.

arbejdtilsynet, D. d. "Temperaturforhold." Retrieved 12.2.2014, 2014, from <http://arbejdstilsynet.dk/da/arbejdsmiljoemner/laes-ogsaa/maling-og-vurdering-af-indeklimaet/5-temperaturforhold.aspx>.

Awbi, H. B. (1989). Application of Computational Fluid Dynamics in Room Ventilation.

Byggforsk, S. (1996). "552.351 Fordeling av ventilasjonsluft i rom." Retrieved 4.10.2013, 2013, from <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?documentId=539§ionId=2>.

Byggforsk, S. (1999). "421.501 Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort. ." Retrieved 10.10.2013, 2013, from <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?documentId=193§ionId=2>.

Byggforsk, S. (1999). "421.503 Krav til luftmengder i ventilasjonsanlegg." Retrieved 21.01.14, 2014, from <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=2753>.

Byggforsk, S. (2000). "Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger." Retrieved 07.02.14, 2014, from <http://bks.byggforsk.no/DocumentView.aspx?sectionId=2&documentId=195>.

Byggforsk, S. (2005). Bks-datablad 552.323 Behovsstyrt ventilasjon.

Dokka, T. H. and T. A. Vik (2001). Hybrid ventilasjon : muligheter og barrierer, eksempler, kontrollstrategier, prosjekteringsverktøy. Trondheim, SINTEF, Bygg og miljø, Arkitektur og byggteknikk.

Drangsholt, F. (2004). "Behovsstyrt ventilasjon - Hovedoppgave." Retrieved 9.10.2013, 2013, from http://www.hekta.org/~hp04-72/HTML_side/Prosjektbeskrivelse.htm.

Eggert, T. (1993). Kontorteknologi og inneklime : problemer og løsningsforslag. [Oslo], TI-forlaget.

Espejord, I. (2002). "Arbeidsmiljø og helse i fiskeindustrien i

Nord-Norge ". Retrieved 14.10.2013, 2013, from <http://www.unn.no/getfile.php/UNN%20INTRA/Enhets/AMA/Nye%20AMA%202012/Dokumenter/Fiskeriprojektet%20-%20Delrapport%204.pdf>.

Fanger, P. O. (1988). Air turbulence and sensation of draught.

Vedlegg

Grini, C., et al. (2011). Leco. Behovstilpasset ventilasjon : hvordan får man alle brikkene på plass? Prosjektrapport / SINTEF Byggforsk 73. Oslo, SINTEF Akademisk forl.: 54 s.

Helsetilsynet. "Inneklima. En veileder for kommunehelsetjenesten." Retrieved 15.4.2014, 2014, from <http://www.handboka.no/Sak/Veiled/Shd/inneklima1.htm>.

Herrmann, M. W. K. T. W. (2011). Optimalisering og videreutvikling av behovstilpassede ventilasjonsanlegg med trykkstyring som reguleringsprinsipp, Aalborg Universitet

Hørup Sørensen, H., et al. (1996). Ventilation ståbi. København, Teknisk Forlag.

Indeklimaportalen (2013). "Temperatur og træk." Retrieved 02.03.14, 2014, from http://www.indeklimaportalen.dk/indeklima/temperatur_og_traek/.

KMC-Controls (2014). "Zone control with Variable Air Volume controls (VAV)."

Krog, B.-R. and Gundersen Per (2003). Vannbårne lavtemperatursystemer kombinert med ventilasjon i bygninger. Prosjektrapport / Norges byggforskningsinstitutt 357-2003. Oslo, Norges byggforskningsinstitutt: 54 s.

Leksikon, S. N. "Luftfuktighet." Retrieved 20.2.14, 2014, from <http://snl.no/luftfuktighet>.

Loomans, M. G. L. C. (1998). The Measurement and Simulation of Indoor Air Flow.

Maripuu, M.-L. (2006). Adapting Variable Air Volume (VAV) Systems for Office Buildings without Active Control Dampers, Chalmers University of technology. **Akademisk avhandling**.

Nilsson, P.-E. and Commtech Group (2003). Achieving the desired indoor climate : energy efficiency aspects of system design. Lund, Studentlitteratur.

Norges standardiseringsforbund (1995). Termiske miljø. Moderate omgivelser : bestemmelser av PMV- og PPD-indeks og betingelser for termisk komfort (ISO 7730:1994). Oslo, NSF.

Norges standardiseringsforbund (2007). Inneklimaparametere for dimensjonering og vurdering av bygningers energiytelse inkludert inneluftkvalitet, termisk miljø, belysning og akustikk. Oslo, Norges standardiseringsforbund.

Olesen, B. W. (2000). "Guidelines for comfort." Retrieved 18.10.2013, 2013, from https://www.google.no/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC0QFjAA&url=http%3A%2F%2Fbookstore.ashrae.biz%2Fjournal%2Fdownload.php%3Ffile%3Dolesen_1.pdf&ei=ItWuUqvzHcfy7Aa-wYHIDw&usg=AFQjCNF1J6gP1Vg9_X_l8rzq7q_2RKvG8w&sig2=T37Ve8d9KBO7XIQe4pkZ0Q.

Vedlegg

- Reinartz, A. (1983). Berechnung von Strömungs- und Temperaturfeldern in belüfteten Räumen. Aachen ,.
- Røstad, H. (1973). Ventilasjon : en kort innføring i ventilasjonsteknikk. Oslo, Skarland Press.
- Saracevic, L. (2007). Behovsstyrt ventilasjon, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. **Akademisk avhandling**.
- SINTEF and Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (2007). ENØK i bygninger : effektiv energibruk. Oslo, Gyldendal undervisning.
- Skåret, E. (1976). Luftbevegelse i ventilerte rom : strømnings teknisk grunnlag for dimensjonering av ventilasjonssystemer. [Trondheim], Tapir.
- Skåret, E. (2000). Ventilasjonsteknisk håndbok. Oslo, Norges byggforskningsinstitutt.
- Spengler, J. D., et al. (2001). Indoor air quality handbook. New York, McGraw-Hill.
- Stampe, O. B. (2000). Ventilationsteknikk. Danmark, Danvak ApS.
- Standard, N. (2006). Ergonomi i termisk miljø : analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort (ISO 7730:2005). Lysaker, Standard Norge.
- Stensaas, L. I. and E. Hovland (2001). Ventilasjonsteknikk. Oslo, Gyldendal yrkesopplæring.
- Swegon (2006). "e.r.i.c. TEKNIKKAVSNITT 2006." Retrieved 12.12.2013, 2013, from http://web1.swegon.com/Upload/PDF_snabben/no/e.r.i.c._Teknikkavsnitt.pdf.
- Sørensen, B. "Riktig set-punkt ved CO2-regulering av VAV-anlegg." Retrieved 13.3.2014, 2014, from <http://www.hekta.org/~hp04-72/Dokumenter/VAV-BRS.pdf>.
- Sørensen, B. "Termisk inneklima." from <http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/iaq/pdf/termisk.pdf>.
- Sørensen, B. (2008). "Ventilasjon og ventilasjonseffektivitet." Retrieved 9.10.2013, 2013, from <http://ansatte.hin.no/brs/fag/emner/vvs/docs/effektivitet/effektivitet.html>.
- Toftum, J. Effect of airflow direction on human perception of draught
- Vandsvik, K. R. (2013). Energieffektiv klimatisering.

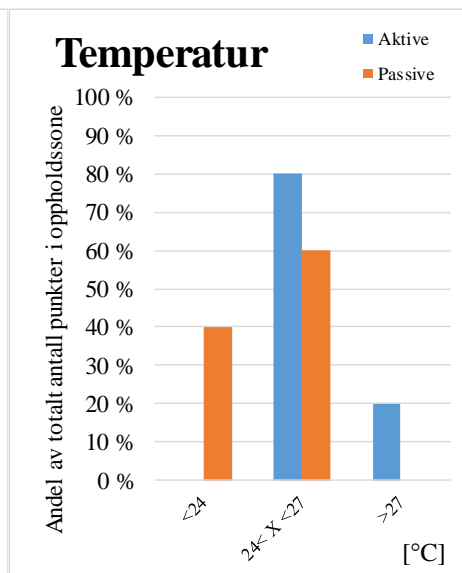
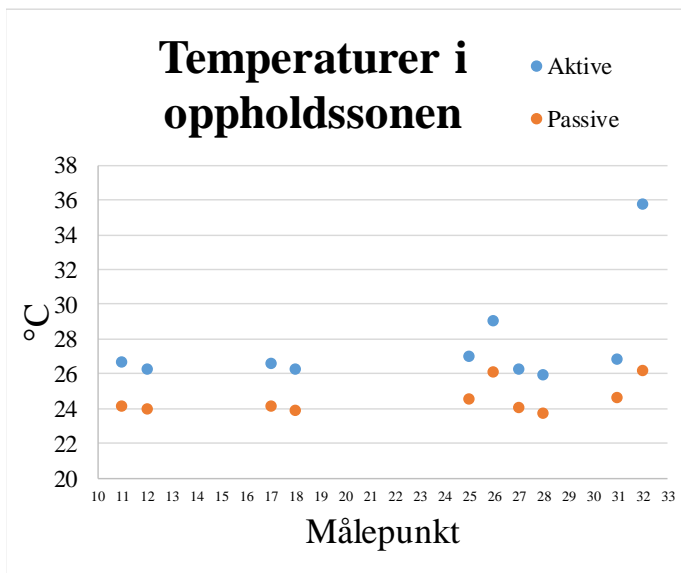
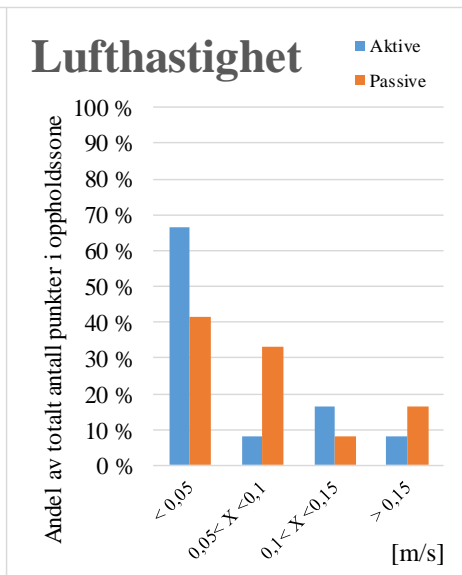
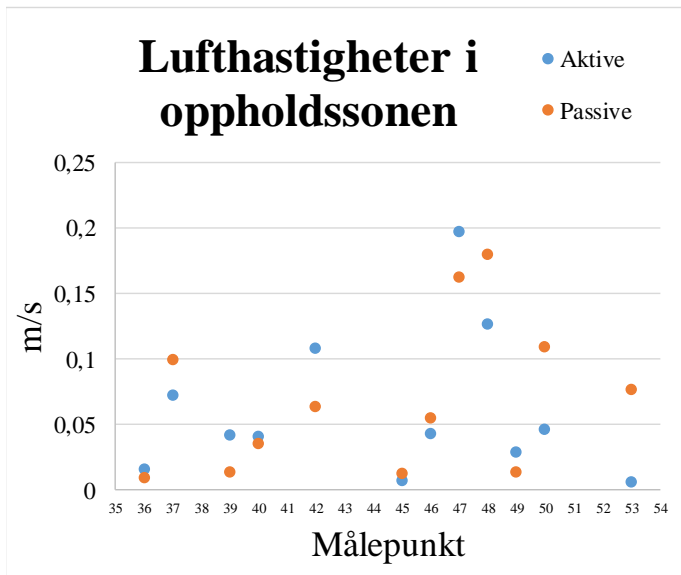
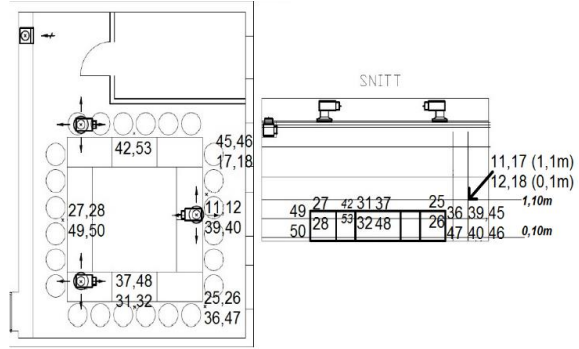
14 Vedlegg

Vedlegg A - Eksempelberegning

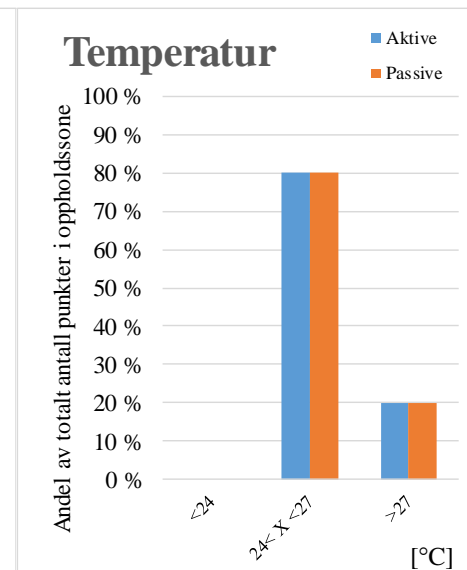
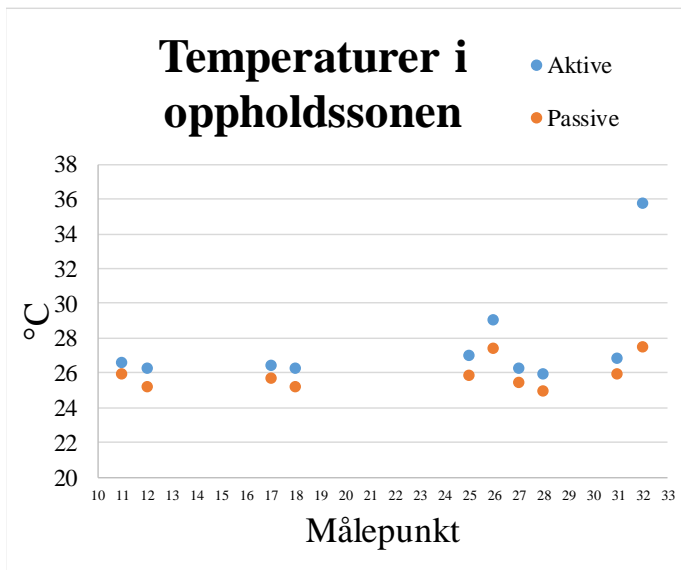
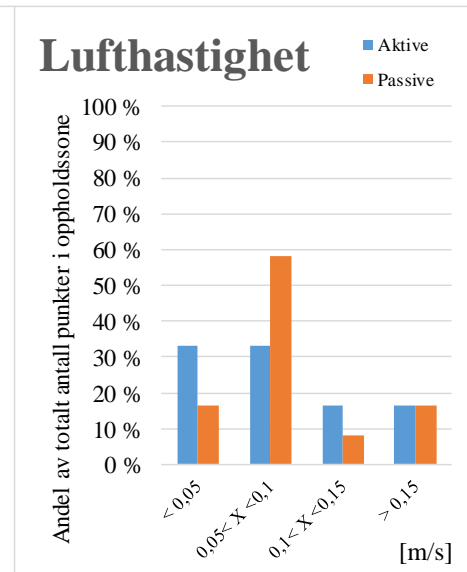
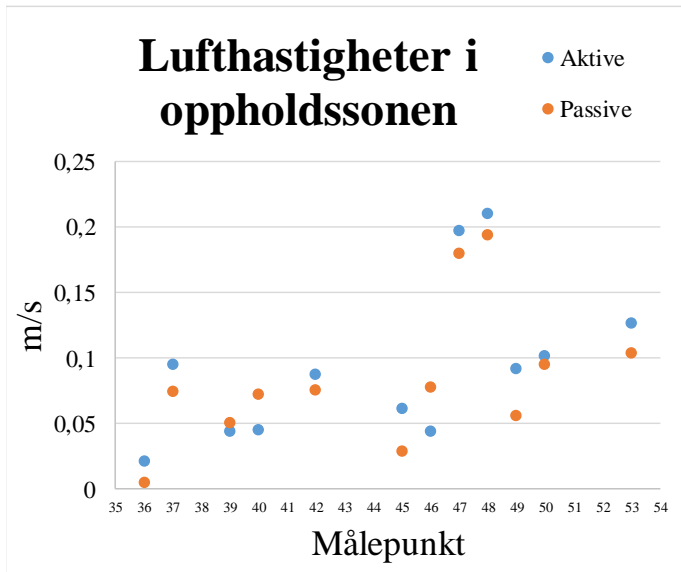
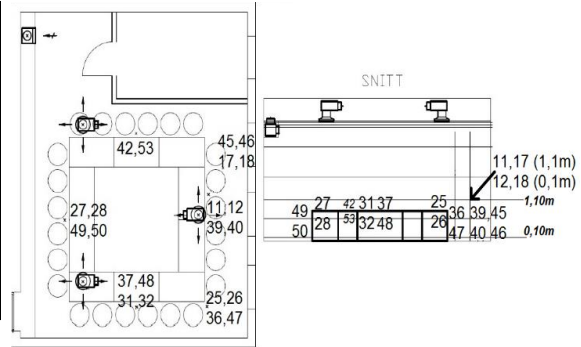
Veggstråle: Horisontal utgang og klebing til taket										
x	U _{m-iso}	A _r x	ΔT _m	T _m -stråle	qv/q _{v0}	qv				
U _k	3,88									
ρ ₀	1,20									
ρ _r	1,20									
ε	1,00									
i	1,00									
C _b	0,24									
K ₃	1,04									
ΔT ₀	12,00									
g	9,81									
A _{r0k}	0,0023									
Imløpshøyde	3,20									
T _{rom}	26,00									
T _{stråle-utløp}	14,00									
A ₀	0,01									
A _{r0}	0,01									
x _p	0,08									
r	0,23									
A _k	0,01									
Spaltehøyde	0,01									
Radiell stråle										
0	3,88	0,00	12,00	14,00	0,92	0,092				
0,20	2,41	0,00	6,47	19,53	3,22	0,322				
0,40	1,21	0,01	3,23	22,77	5,52	0,552				
0,50	0,97	0,02	2,59	23,41	6,67	0,667				
0,80	0,60	0,09	1,62	24,38	10,12	1,012				
1,00	0,48	0,18	1,29	24,71	12,42	1,242				
1,20	0,40	0,32	1,08	24,92	14,72	1,472				
1,40	0,34	0,50	0,92	25,08	17,02	1,702				
1,50	0,32	0,62	0,86	25,14	18,17	1,817				
1,80	0,27	1,07	0,72	25,28	21,62	2,162				
2,00	0,24	1,46	0,65	25,35	23,93	2,393				
2,20	0,22	1,95	0,59	25,41	26,23	2,623				
2,40	0,20	2,53	0,54	25,46	28,53	2,853				
2,60	0,19	3,21	0,50	25,50	30,83	3,083				
2,80	0,17	4,01	0,46	25,54	33,13	3,313				
3,00	0,16	4,93	0,43	25,57	35,43	3,543				
3,20	0,15	5,99	0,40	25,60	37,73	3,773				
3,40	0,14	7,18	0,38	25,62	40,03	4,003				
3,60	0,13	8,53	0,36	25,64	42,33	4,233				
3,80	0,13	10,03	0,34	25,66	44,63	4,463				
4,00	0,12	11,70	0,32	25,68	46,93	4,693				
4,20	0,11	13,54	0,31	25,69	49,23	4,923				
4,40	0,11	15,57	0,29	25,71	51,53	5,153				
4,60	0,10	17,79	0,28	25,72	53,83	5,383				

Vedlegg B - Resterende resultater fra forsøk

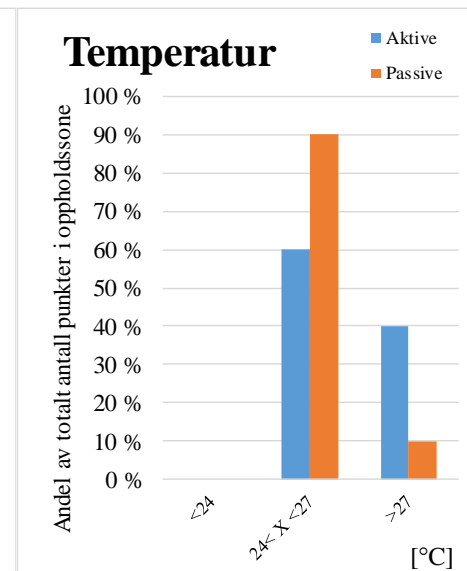
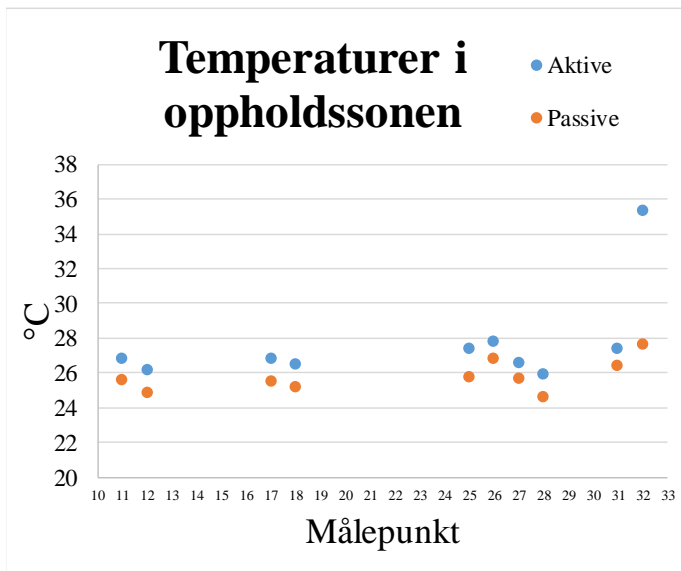
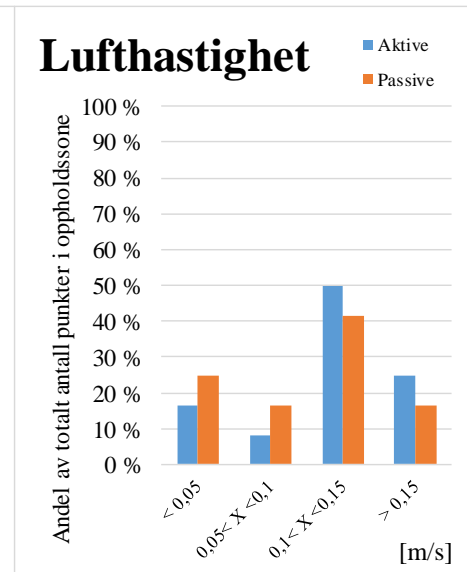
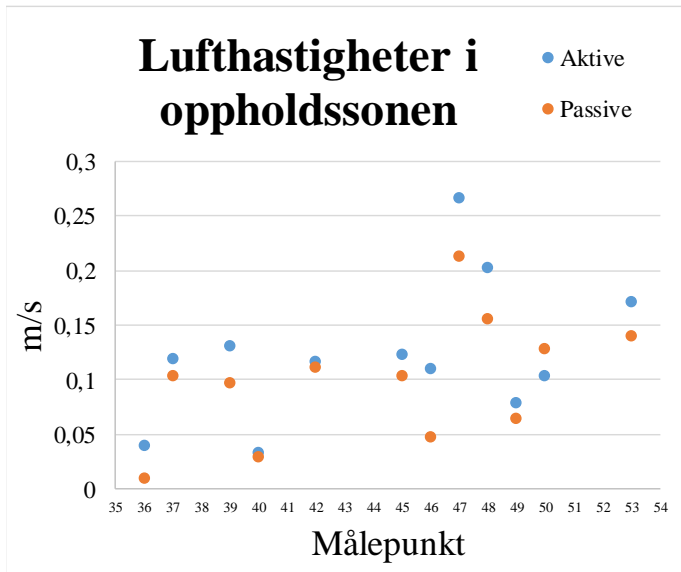
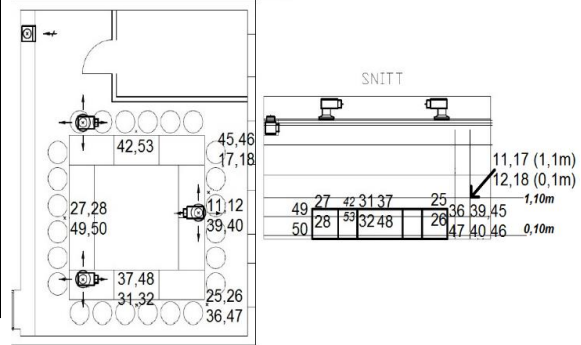
Forsøk 1 og 7			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	365	415	m ³ /h
Tilluftstemperatur	18	18	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	8	8	°C
Personbelastning	0	0	



Forsøk 2 og 8			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	550	550	m ³ /h
Tilluftstemperatur	18	18	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	8	8	°C
Personbelastning	8	8	



Forsøk 3 og 9			
	Aktiv ventil	Passiv ventil	
Luftmengde	760	870	m ³ /h
Tilluftstemperatur	16	16	°C
Romtemperatur	26	26	°C
Delta T	10	10	°C
Personbelastning	24	24	



Vedlegg C - Måling av luftmengde

Målepunktplassering ved luftmengdemåling

Nominell diameter	Måletverrsnitt	Målepunktene plassering		
		a	b	c
400		40	200	360

Måling av luftmengde						
Måling	Horisontalt			Vertikalt		
	360	200	40	40	200	360
1	1,51	1,44	1,35	1,38	1,43	1,5
2	1,61	1,35	1,53	1,4	1,42	1,49
3	1,47	1,42	1,3	1,45	1,53	1,57
4	1,69	1,46	1,44	1,29	1,4	1,47
5	1,5	1,38	1,2	1,37	1,41	1,53
6	1,53	1,34	1,45	1,48	1,42	1,52
7	1,57	1,4	1,37	1,34	1,48	1,54
8	1,54	1,41	1,5	1,39	1,55	1,55
9	1,52	1,37	1,58	1,5	1,39	1,56
10	1,46	1,31	1,49	1,48	1,41	1,44
11	1,5	1,51	1,54	1,49	1,37	1,53
12	1,45	1,49	1,27	1,46	1,34	1,51
Gj.snitt	1,529166667	1,406666667	1,418333333	1,419166667	1,429166667	1,5175

Etter at lufthastighetene ble målt i målepunktene, beregnes middelhastigheten, v_m .

$$v_m = \frac{v_1 + v_2 + \dots + v_n}{n} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Luftmengden beregnes av:

$$q_L = k * v_m * A * 3600 \left[\frac{m^3}{h} \right] = 638 \text{ m}^3/h \text{ (Aggregatet leverer ifølge grensesnittet = 650 m}^3/h)$$

der k = korreksjonsfaktor = 0,97 (Stensaas and Hovland 2001)

A = Kanaltverrsnitt

Vedlegg D - Varmetapsberegninger

Element	Bredde	Høyde	Areal	Tykkelse	Sjikt 1		Sjikt 2		Sjikt 3		Varmeovergang		U-verdi	A*U	T _{ute} °C	T _{inne} °C	Varmetap
					Ledneve W/mK	Tykkelse m	Ledneve W/mK	Tykkelse m	Ledneve W/mK	Tykkelse m	Inne m ² K/W	Ute m ² K/W					
Benevning																	
Vegg mot nord	7,0	3,2	22,4	0,1	58,0	0,001	0,030	0,049	58,0	0,001	0,130	0,130	0,53	11,9	20,0	26,0	71,2
Vegg mot sør	2,9	3,2	9,3	0,1	58,0	0,001	0,030	0,099	58,0	0,001	0,130	0,130	0,28	2,6	20,0	26,0	15,7
Vegg mot vest	8,7	3,2	27,8	0,1									0,35	41,7	27,8	26,0	0,0
Vinduer (x3)	1,2	2,1	7,2										5,80	41,7	27,8	26,0	-75,1
Vegg	6,3		20,6	0,1									0,41	8,5	27,8	26,0	-15,2
Dør	0,8	2,0	1,6										0,35	0,6	27,8	26,0	-1,0
Vegg mot øst	8,7	3,2	27,8	0,1									0,28	0,0	20,0	26,0	0,0
Dør	1,2	2,0	2,4	0,1	58,0	0,001	0,030	0,099	58,0	0,001	0,130	0,130	0,28	0,0	20,0	26,0	0,17
Vegg			8,4	0,1	58,0	0,001	0,030	0,099	58,0	0,001	0,130	0,130	0,52	8,9	20,0	26,0	0,0
Vegg, isolert vindu			17,0	0,1									2,60				53,2
Vindu (x2)	5,8	2,9	17,0										0,29				0,0
Eterisolering	5,8	2,9	17,0		0,0	0,100							1,40				0,0
Vegg, dragerelement	5,8	0,3	1,7										1,40	2,4	20,0	26,0	14,7
Tak	8,7	7,0	50,8	0,1	58,0	0,001	0,030	0,099	58,0	0,001	0,170	0,170	0,28	14,0	20,0	26,0	83,9
Gulv	8,7	7,0	50,8								0,100	0,100	0,30	15,2	20,0	26,0	91,5
Sum																	239,0

Vedlegg E - Varmetapsberegning for yttervegg

Vedlegget viser beregning av det simulerte uterommets temperatur ved varmetap gjennom ytterveggen som er i prøverommet. I det simulerte uterommet skal temperaturen simulere en utetemperatur på 30°C ved varmeoverføring gjennom en vegg bygget i henhold til TEK10.

TEK10 setter krav til at U-verdi på vinduer skal maksimalt være 1,2 W/m²K. U-verdiene til vinduene i ytterveggen i prøverommet er 5,8 W/m²K. Tilsvarende har TEK10 krav til at U-verdi for yttervegg skal maksimalt være 0,18 W/m²K. U-verdien på ytterveggselementene i prøverommet har U-verdi på 0,41 W/m²K. (TEK10) (Hans Martin Mathisen 2014)

Med utgangspunkt i dette beregnes temperaturen i uterommet ved hjelp av ligningen som beskriver varmetap i form av konduksjon gjennom en flate:

$$Q_{\text{konduksjon}} = (A * U * \Delta T)_{\text{vegg}} + (A * U * \Delta T)_{\text{vindu}}$$

$Q_{\text{konduksjon}}$ og areal er konstant i begge tilfeller.

$$\Delta T = 30^{\circ}\text{C} - 26^{\circ}\text{C} = 4^{\circ}\text{C} = 4 \text{ K}$$

$$[(U * \Delta T)_{\text{vegg}} + (U * \Delta T)_{\text{vindu}}]_{\text{TEK10}} = [(U * \Delta T)_{\text{vegg}} + (U * \Delta T)_{\text{vindu}}]_{\text{Eksisterende vegg}}$$

$$\Delta T_{\text{Eksisterende vegg}} = 0,9^{\circ}\text{C}$$

For at temperaturen i det simulerte uterommet skal simulere en utetemperatur på 30°C ved en yttervegg bygget etter krav fra TEK10, må temperaturen være 26°C + 0,9°C = 26,9°C. (Vandsvik 2013)

Vedlegg F - Risikoreport

I vedlegget på neste side følger et utdrag av risikovurderingsrapporten om helse, miljø og sikkerhet i forbindelse med laboratorieforskningene. Rapporten er godkjent av prosjektleder Hans Martin Mathisen, instituttleder Olav Bolland og HMS-ansvarlig på varmeteknisk laboratorium, Morten Grønli. Fullstendig rapport kan fås ved å kontakte en av disse personene. Risikomatriksen vil gi en visualisering og en samlet oversikt over aktivitetens risikoforhold slik at ledelse og brukere får et mest mulig komplett bilde av risikoforhold.

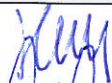
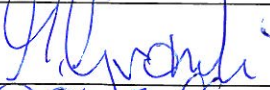

Risikovurderingsrapport

Ventilasjonsanlegg og CO2-gass

Prosjekttittel	Plassering av detektorer ved Behovsstyrt ventilasjon
Apparatur	Ventilasjonsanlegg og CO2-gass
Enhet	NTNU
Apparaturansvarlig	Hans Martin Mathisen
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen
HMS-koordinator	Morten Grønli
HMS-ansvarlig (linjeleder)	Olav Bolland
Plassering	Klimarom på mesanin i VVSLab
Romnummer	C163
Risikovurdering utført av	Kai Robert Vandsvik, Martin Bentsen

Godkjenning:

Apparatur kort (UNIT CARD) valid for:	12 måneder
Forsøk pågår kort (EXPERIMENT IN PROGRESS) valid for:	12 måneder

	Navn	Dato	Signatur
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen	4/2-14	
HMS koordinator	Morten Grønli	3/2-2014	
HMS ansvarlig (linjeleder)	Olav Bolland	13/3-2014	

INNHALDSFORTEGNELSE

1	INNLEDNING	1
2	ORGANISERING.....	1
3	RISIKOSTYRING AV PROSJEKTET	1
4	BESKRIVELSER AV FORSØKSOPPSETT	1
5	EVAKUERING FRA FORSØKSOPPSETNINGEN.....	2
6	VARSLING.....	2
6.1	Før forsøkskjøring.....	2
6.2	Ved uønskede hendelser	2
7	VURDERING AV TEKNISK SIKKERHET	3
7.1	Fareidentifikasjon, HAZOP.....	3
7.2	Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff og gass	3
7.3	Trykkpåkjent utstyr	3
7.4	Påvirkning av ytre miljø (utslipp til luft/vann, støy, temperatur, rystelser, lukt)	4
7.5	Stråling.....	4
7.6	Bruk og behandling av kjemikalier	4
7.7	El sikkerhet (behov for å avvike fra gjeldende forskrifter og normer).....	4
8	VURDERING AV OPERASJONELL SIKKERHET.....	4
8.1	Prosedyre HAZOP	4
8.2	Drifts og nødstopps prosedyre.....	4
8.3	Opplæring av operatører.....	4
8.4	Tekniske modifikasjoner.....	5
8.5	Personlig verneutstyr	5
8.6	Generelt.....	5
8.7	Sikkerhetsutrustning	5
8.8	Spesielle tiltak.....	5
9	TALLFESTING AV RESTRISIKO – RISIKOMATRISSE	5
10	LOVER FORSKRIFTER OG PÅLEGG SOM GJELDER.....	7
11	DOKUMENTASJON.....	7

1 INNLEDNING

Kandidaten skal måle/logge lufthastigheter, CO₂-konsentrasjoner samt temperaturer ved ulike personbelastninger, i romluften i testrommet i klimateknisk lab. Mennesker blir simulert ved hjelp av CO₂-gass(utånding) og lyspærer (varmeavgivelse).

Riggen er det store testrommet i klimalaben. Selve målingene vil bli gjort på PC som blir stående utenfor testrommet. Dvs. at det ikke skal være personer i rommet mens forsøkene kjøres.

2 ORGANISERING

Rolle	NTNU
Prosjektleder	Hans Martin Mathisen
Apparaturansvarlig	Hans Martin Mathisen
Romansvarlig	Martin Bustadmo
HMS koordinator	Morten Grønli
HMS ansvarlig (linjeleder):	Olav Bolland

3 RISIKOSTYRING AV PROSJEKTET

Hovedaktiviteter risikostyring	Nødvendige tiltak, dokumentasjon	Dato
Prosjekt initiering	Prosjekt initiering mal	14.01.13
Innledende risikovurdering	Fareidentifikasjon – HAZID Skjema grovanalyse	01.03.13
Vurdering av teknisk sikkerhet	Prosess-HAZOP Tekniske dokumentasjoner	01.03.13
Vurdering av operasjonell sikkerhet	Prosedyre-HAZOP Opplæringsplan for operatører	01.03.13
Sluttvurdering, kvalitetssikring	Uavhengig kontroll Utstedelse av apparaturkort Utstedelse av forsøk pågår kort	-

4 BESKRIVELSER AV FORSØKSOPPSETT

Forsøkene utføres i testrommet i klimateknisk lab. Først testes CAV-ventiler(passive) og deretter testes VAV-ventiler(aktive), dvs. en liten ombygging skjer medio april.

Forsøkene kjøres med ulike personbelastninger, tilluftstemperaturer og tilluftsmengder. Det vil si ulike mengder tilført CO₂gass, men aggregatet regulerer etter CO₂-nivå som skal holdes under 1000ppm.

Lufthastigheter, CO₂-konsentrasjoner og temperaturer blir målt og logget i ulike punkter i testrommet.

Det vil også bli kjørt egne forsøk med røykampuller for å se hvordan strømningsbildene er ved ulike parameterverdier.

Testrommet vil være stengt ved alle forsøk, og ingen skal inn i rommet ved kjøring av forsøk. Bilder tas utenfra og all logging lagres på pc som står utenfor rommet.

5 EVAKUERING FRA FORSØKSOPPSETNINGEN

Evakuering skjer på signal fra alarmklokker eller lokale gassalarmstasjon med egen lokal varsling med lyd og lys utenfor aktuelle rom, se 6.2

Evakuering fra rigg området foregår igjennom merkede nødutganger til møteplass, (hjørnet gamle kjemi/kjelhuset eller parkeringsplass 1a-b.)

Aksjon på rigg ved evakuering: For tester på tak skal røykampullen slukkes med vann før området forlates (se vedlagt datablad). For målinger på ventilasjonsanlegg skal sporgass stenges av og riggen forlates slik den er stilt opp.

6 VARSLING

6.1 Før forsøkskjøring

Varsler i henhold til feltskjema og leverer dette til instituttkontoret. Forsøkene registreres i aktivitetskalender for lab.

Varsling per e-post, til iept-experiments@ivt.ntnu.no

I e-posten skal det stå::

- Navn på forsøksleder
- Navn på forsøksrigg
- Tid for start: (dato og klokkeslett)
- Tid for stop: (dato og klokkeslett)

6.2 Ved uønskede hendelser

BRANN

Ved brann en ikke selv er i stand til å slukke med rimelige lokalt tilgjengelige slukkemidler, skal nærmeste brannalarm utløses og arealet evakueres raskest mulig. En skal så være tilgjengelig for brannvesen/bygningsvaktmester for å påvise brannsted.

Om mulig varsles så:

NTNU	SINTEF
Morten Grønli, Mob: 918 97 515	Harald Mæhlum, Mob: 930 14 986
Olav Bolland: Mob: 918 97 209	Anne Karin T. Hemmingsen Mob: 930 19 669
NTNU – SINTEF Beredskapstelefon	800 80 388

GASSALARM

Ved gassalarm skal gassflasker stenges umiddelbart og området ventileres. Klarer man ikke innen rimelig tid å få ned nivået på gasskonsentrasjonen så utløses brannalarm og laben evakueres. Dedikert personell og eller brannvesen sjekker så lekkasjested for å fastslå om det er mulig å tette lekkasje og luften ut området på en forsvarlig måte.

Varslingsrekkefølge som i overstående punkt.

PERSONSKADE

- Førstehjelpsutstyr i Brann/førstehjelpsstasjoner,
- Rop på hjelp,
- Start livreddende førstehjelp
- **Ring 113** hvis det er eller det er tvil om det er alvorlig skade.

ANDRE UØNSKEDE HENDELSER (AVVIK)

NTNU:

Rapportering av uønskede hendelser, Innsida, avviksmeldinger

https://innsida.ntnu.no/lenkesamling_vis.php?katid=1398

7 VURDERING AV TEKNISK SIKKERHET

7.1 Fareidentifikasjon, HAZOP

Forsøksoppsetningen deles inn i følgende noder:

Node 1	Rigg i teknisk rom/ ventilasjonsanlegg
--------	--

Vedlegg: A Hazop_mal

Vurdering: Sikkerhet er ivaretatt

I testrommet kan det oppstå forhøyede konsentrasjoner av CO₂, hvis det er lekkasje på utstyr evt. feil med ventil/flaske. Ettersom mennesker ikke er inne i testrommet under forsøk vil det ikke være nødvendig å ha ekstra sikkerhet i forbindelse med dette. Det er også flere CO₂-logginger som går underveis i forsøket, så det vil hele tiden være mulig å sjekke CO₂-konsentrasjonen før man entrer testrommet.

7.2 Brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff og gass

Inneholder forsøkene brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff

Nei	
-----	--

Vurdering: Potassium chlorate i røykappullene er eksplosivt dersom det blandes med brennbart materiale. Ampullene kan forverre branner som allerede er i gang. Lystgass er ikke brennbar, men kan underholde en brann uten tilstedeværelse av luft og kan dermed forverre branner. Lystgassen er under trykk og skal ikke utsettes for temperaturer over 45 grader.

7.3 Trykkpåkjent utstyr

Inneholder forsøksoppsetningen trykkpåkjent utstyr:

JA	
----	--

Vurdering: Gassflaske med CO₂ som er fastspent/forankret og som er plassert utenfor testrommet i KlimaLab.

7.4 Påvirkning av ytre miljø (utslipp til luft/vann, støy, temperatur, rystelser, lukt)

NEI	
-----	--

Vurdering: Eksperimentene vil generere utslipp av sporgass(CO₂) og gass fra røykampuller. Røykampuller avgir 55m³ over 3-4 min. Røyken vil gå via ventilasjonsanlegget og bli slippet ut over tak via avkastet. Grenseverdien til karbondioksid over 8 timer på 5000 ppm vil også overholdes.

7.5 Stråling

NEI	
-----	--

7.6 Bruk og behandling av kjemikalier

JA	
----	--

Vedlegg: datablad røykampuller

Vurdering: Røykampuller består hovedsakelig av ammonium chloride og potassium chlorate. Oppbevares bort fra mat og barn på et tørt sted. Brukte røykampuller er ikke klassifisert som farlig avfall, mens ubrukte eller ødelagte røykampuller er farlig avfall.

7.7 El sikkerhet (behov for å avvike fra gjeldende forskrifter og normer)

NEI	

8 VURDERING AV OPERASJONELL SIKKERHET

Sikrer at etablerte prosedyrer dekker alle identifiserte risikoforhold som må håndteres gjennom operasjonelle barrierer og at operatører og teknisk utførende har tilstrekkelig kompetanse.

8.1 Prosedyre HAZOP

Metoden er en undersøkelse av operasjonsprosedyrer, og identifiserer årsaker og farekilder for operasjonelle problemer.

Vurdering: Enkel prosedyre. Misforståelser vil ikke føre til farlige situasjoner. Skjema er derfor ikke fylt ut.

8.2 Drifts og nødstopps prosedyre

Vedlegg: G Forsøksprosedyre

Nødstopps prosedyre:

Hendelser som aktiverer en nødstopps er brann og samt lekkasjer fra sporgassutstyret. Sporgasstilførsel stoppes.

8.3 Opplæring av operatører

Dokument som viser opplæringsplan for operatører er utarbeidet for forsøkene.

Vedlegg: H Opplæringsplan for operatører

8.4 Tekniske modifikasjoner

- Tekniske modifikasjoner som kan gjøres av Operatør:
Alle modifikasjoner kan utføres av operatør.
- Dersom andre gasser benyttes i forsøkene må ny risikovurdering utføres.

8.5 Personlig verneutstyr

- Vernebriller benyttes ved bruk av røykappuller.

8.6 Generelt

- Traverskran og truck kjøring skal ikke foregå i nærheten under eksperimentet.
- Gassflasker skal plasseres i godkjent stativ med avstengningsventil lett tilgjengelig.
- Vann og trykklufttilførsel i slanger skal stenges/kobles fra ved nærmeste fastpunkt når riggen ikke er i bruk.

8.7 Sikkerhetsutrustning

- Ikke nødvendig.

8.8 Spesielle tiltak

9 TALLFESTING AV RESTRISIKO – RISIKOMATRISSE

Risikomatrissen vil gi en visualisering og en samlet oversikt over aktivitetens risikoforhold slik at ledelse og brukere får et mest mulig komplett bilde av risikoforhold.

IDnr	Aktivitet-hendelse	Frekv-Sans	Kons	RV
1	Fall fra stillas i testrom ved montering av utstyr i himling.	1	E	E1
2	Fare for skade fra kniv, drill eller annet utstyr for installasjon av utstyr	2	C	C2
3	Fare for å snuble i utstyr	3	B	B3

Vurdering restrisiko: Restirisiko er akseptabel.

KONSEKVENNS	Svært alvorlig	E1	E2	E3	E4	E5
	Alvorlig	D1	D2	D3	D4	D5
	Moderat	C1	C2	C3	C4	C5
	Liten	B1	B2	B3	B4	B5
	Svært liten	A1	A2	A3	A4	A5
		Svært liten	Liten	Middels	Stor	Svært Stor
SANSYNLIGHET						

Prinsipp over akseptkriterium. Forklaring av fargene som er brukt i risikomatriksen.

Farge	Beskrivelse
Rød	Uakseptabel risiko. Tiltak skal gjennomføres for å redusere risikoen.
Gul	Vurderingsområde. Tiltak skal vurderes.
Grønn	Akseptabel risiko. Tiltak kan vurderes ut fra andre hensyn.