

Behovsstyrt ventilasjon

Lana Saracevic

Master i energi og miljø

Oppgaven levert: Juni 2007

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Biveileder(e): Johan Halvarsson, EPT

Oppgavetekst

Av hensyn til arbeidsmiljø og inneklima i moderne yrkesbygg er tilfredsstillende ventilasjon av stor betydning. For å oppnå dette benyttes avanserte tekniske installasjoner. Driften av anleggene krever imidlertid ofte opptil 50 % av elektrisitetforbruket og 40 % av den totale energibruken, noe som sterkt påvirker både bygningenes driftsøkonomi og den samfunnsmessige bærekraft på lang sikt.

Kandidaten utførte høsten 2006 prosjektoppgaven "Behovsstyrt og behovstilpasset klimatisering - energibruk og inneklima". Denne oppgaven er en videreføring av dette arbeidet.

I rom hvor behovsstyrt ventilasjon benyttes vil det være en eller flere varierende belastninger. Det kan for eksempel være lukt og forurensninger fra mennesker og varmebelastninger fra ulike kilder. Forurensningskonsentrasjonen avhenger av kildestyrke, kildens plassering samt luftstrømninger generert av ventilasjonen, varme/kalde flater og bevegelser.

Fortregningsventilasjon og omrøringsventilasjon gir ulike strømningsbilder. Det råder derfor usikkerhet med hensyn til plassering av sensorer i rom slik at de gir et representativt bilde av inneklimaet i rommet.

I laboratoriets klimaprøverom er det bygd opp et klasserom i full skala hvor ventilasjonstyper, luftmengder og belastninger kan prøves ut. Kandidaten kan benytte seg av dette rommet.

Målet med masteroppgaven er å utarbeide forslag til kriterier for valg av sensortype og plassering av disse i rom slik at det oppnås god luftkvalitet og effektiv energibruk. Hovedvekt legges på klasserom og kontorlandskap.

Oppgaven gitt: 16. januar 2007

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Forord

Denne masteroppgaven er utført ved Institutt for energi- og prosessteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU), i løpet av våren 2007.

Hensikten med oppgaven var å utarbeide forslag til plassering av sensorer ved hjelp av hvilke man kan styre luftmengder som ventilasjonsanlegg leverer. En modell av et klasserom med omrøringsventilasjon med bakkantsinnblåsning som var bygd opp på Varmeteknisk Laboratorium ved NTNU er blitt undersøkt.

Jeg vil gjerne takke min veileder Hans Martin Mathisen som bidro med faglig støtte gjennom situasjoner hvor mine kunnskaper ikke strakk til. Frode Frydenlund og Rasmus Høseggen, takkes for gode råd i forbindelse med datasimuleringene. Men mest av alt ønsker jeg å takke Kai Schmitz for tålmodighet han har vist og støtte jeg ikke kunne ha vært foruten.

Trondheim, 12.juni 2007

Lana Saracevic

Sammendrag

Menneskene tilbringer mesteparten av livet innendørs, og inneklimaet har innvirkning på vår helse, trivsel og prestasjonsevne. Tilfredsstillende ventilasjon og klimatisering av bygninger er derfor av stor betydning. Ved hjelp av avanserte tekniske installasjoner kan et godt inneklima oppnås. Ulempen er imidlertid at slike løsninger er svært energikrevende og gjør at bygningssektoren står for en stor del av den totale energibruken. I et samfunn som retter stadig større fokus mot energisparing og effektiv energibruk, er det derfor viktig å undersøke hvorvidt tekniske installasjoner for klimatisering av rom kan gjøres mer energiøkonomiske, uten at det går utover deres funksjon.

Behovsstyrt ventilasjon gir en mulighet til å redusere energien som brukes til drift av ventilasjonsanlegg. Ved å tilpasse mengder tilført luft til forurensningskonsentrasjonen i et rom, kan det unngås å ventilere for mye når forurensningsbelastningen er liten, og på denne måten reduser energibehovet til behandling og transport av ventilasjonsluften. For å få fullt utbytte av et slikt system er det svært viktig å velge ut passende styringsstrategi og plassere sensoren som skal styre anlegget slik at den gir et representativt bilde av inneklimaet i rommet.

Gjennom dette arbeidet blir forurensningsspredningen i et klasserom med omrøringsventilasjon og bakkantsinnblåsning undersøkt ved hjelp av laboratorieforsøk, for å finne en passende plass for montering av en CO₂ sensor. Målet var å finne en et sted hvor forurensningskonsentrasjonen varierte i samme takt som forurensningskonsentrasjonen i oppholdssonen. Resultatene viste at en god løsning for den gitte forsøksoppstillingen vil være å montere sensoren på et sted som ikke ligger i veien for brukere, men nærme oppholdssonen og forurensningskildene. Et mer konkret forslag til plasseringen krever ytterligere undersøkelser og målinger.

Det er viktig å nevne at konklusjonene som her er blitt trukket mest sannsynlig ikke gjelder for rom med andre typer ventilasjon. Ved valg av plassering må det tas hensyn til at forurensningsspredningen vil påvirkes av kildestyrke, kildens plassering, varme og kalde flater, bevegelser, samt luftstrømninger generert av ventilasjonen. Derfor er det behov for å gjennomføre flere forsøk med ulike typer ventilasjonssystemer.

Abstract

People spend most of their lives indoors, and the indoor climate has effect on our well-being and performance. Satisfactory ventilation and air conditioning in the buildings is therefore of major importance. With the help of advanced technical installations a good indoor climate can be achieved. However the disadvantage is that these kind of solutions are very energy demanding. They are the reason why the building sector represents a large part of the total energy consumption. As the society today is focusing more on energy conservation and energy effectiveness, it is important to investigate if the technical solutions for air conditioning can be made more energy efficient, without decreasing their performance.

Demand controlled ventilation systems offer an opportunity to decrease energy required to run ventilation systems. By adjusting amount of supplied air to contaminant production in a room, excessive ventilation can be avoided when the contaminant level is low. In this way the energy amount needed to handle and transport the air can be reduced. To exploit the full advantage of such a system, an appropriate control strategy has to be chosen and the sensor that is controlling the ventilation has to be located so that its output signal is representative for the indoor climate in the room.

In this work the contaminant distribution in a classroom with mixing ventilation is examined, in order to find a suitable location for a CO₂ sensor. The aim was to find a convenient position for the sensor in the room where contaminant concentration varies in the same way as in the occupied zone. The results show that a good solution for the given case would be to locate the sensor somewhere out of the way for occupants, but still close to the occupied zone and the contaminant sources. A more definite suggestion for where to locate the sensor demands further examinations and measurements.

It is important to mention that the conclusions based upon this research probably do not apply for other rooms with different ventilation systems. By choosing a location for the sensor it has to be considered that contaminant distribution will be affected by strength and position of the source, warm and cold surfaces, movement within the room and the air flow generated by the ventilation system. Therefore there is a need to conduct more experiments with different types of ventilation systems.

Innholdsfortegnelse

1	Innledning.....	1
2	Tilførsel av frisk luft	3
3	Behovsstyrt ventilasjon	6
3.1	Valg av styringsstrategi	7
3.1.1	Tilstedeværelse.....	7
3.1.2	Karbondioksid	8
3.1.3	Temperatur	9
3.2	Plasserin av sensorer	10
4	Krav til luften og temperaturen innendørs	12
4.1	Luftmengder	12
4.2	Temperaturnivå	14
5	Testrommet.....	17
5.1	Systemair Sinus-BS-200 Tilluftsventil.....	18
5.2	Swegon GRLc avtrekksventil.....	19
6	Simulering	21
6.1	Turbulens.....	22
6.2	Testrommets omslutningsflater	22
6.3	Tilluftsventil	25
6.4	Modell 1	26
6.5	Modell 2	26
6.5.1	Simulering av Modell 2.....	29
7	Tilrettelegging av testrommet	34
7.1	Barn	34
7.2	Tilførsel av gassen.....	38
8	Målemetode	40
8.1	Sommer	40
8.2	Vinter.....	40
8.3	Kartlegging av spredningen av CO ₂ i testrommet.....	45
8.4	Dagsmålinger	46
8.4.1	Vinterdag.....	48
8.4.2	Sommerdag.....	49
8.5	Arbeidets begrensninger	49
9	Utstyr.....	50
9.1	VelociCalc Plus Modell 8388, lufthastighetsmåler fra TSI Incorporated.....	50
9.2	Vaisala GM70 CO ₂ måler	51
9.3	Termoelementer for måling av temperatur.....	52
10	Resultater.....	53
10.1	Kartlegging av spredningen av CO ₂ i testrommet.....	53
10.1.1	Pustesonen.....	54
10.1.2	Andre punkter i rommet	56
10.2	Dagsmålinger	59
11	Diskusjon.....	62
11.1	Kartlegging av spredningen av CO ₂ i testrommet.....	62
11.1.1	Pustesonen.....	62
11.1.2	Andre punkter i rommet	63
11.2	Dagsmålinger	63
12	Konklusjon	66
13	Anbefalinger til videreføring av arbeidet	68

14	Referanseliste	69
	Vedlegg 1	73
	Vedlegg 2	75
	Vedlegg 3	77
	Vedlegg 4	79

Figurfortegnelse

Figur 2-1: Prinsipiell skisse av fortrenningsventilasjonen (Mysen, 2005c).....	3
Figur 2-2: Prinsipiell skisse av omrøringsventilasjonen med bakkantinnblåsning (Mysen, 2005c).....	4
Figur 4-1: Oppholdssonen, (Systemair, 2007a)	15
Figur 5-1: Fotografi av testrommet tatt fra inngangsdøren	17
Figur 5-2: Systemair Sinus-BS-200 Tilluftsventil	19
Figur 5-3: Swegon GRLc avtrekksventil	20
Figur 6-1: Til venstre: et beregningsnett med markerte knyttetpunkt, til høyre: kontrollvolumet til et knyttetpunkt.....	21
Figur 6-2: En dyse fra Sinus-BR-200.....	26
Figur 6-3: Prinsipiell fremstilling av luftstrålen sett fra siden (øverst), og sett ovenfra (nederst) (Mathisen, 2007)	27
Figur 6-4: Lufthastighet i strålen 2 m unna ventilen i ulike avstander fra taket (fargen på grafen angir avstanden) (Mathisen, 2007).....	27
Figur 6-5: Resultat med forfinet beregningsnett rundt tilluftsventilen, sett fra siden, på et plan som skjærer ventilen på midten (ventilen befinner seg øverst i venstre hjørnet), $y = 3,25$ m, $z = 7,03$ m.....	30
Figur 6-6: Resultat med forfinet beregningsnett rundt tilluftsventilen, sett ovenfra, på et plan som skjærer ventilen på midten (ventilen befinner seg øverst, midt på bildet, øverst i venstre hjørne kan man skimte avtrekket), $x = 8,73$ m, $z = 7,03$ m.....	30
Figur 6-7: Resultater med "No O-grids" funksjon, sett fra samme perspektiv som Figur 6-5	31
Figur 6-8: Resultater med "No O-grids" funksjon, sett fra samme perspektiv som Figur 6-6	32
Figur 7-1: Modell av et barn	35
Figur 7-2: Termografisk bilde av barnmodellen (til venstre), sammenlignet med bildet av en person (til høyre)	35
Figur 7-3: Prinsipiell skisse av CO ₂ kabelføringen i testrommet.....	37
Figur 7-4: Modell av et barn innenfra. Bildet viser den indre sylindere med en lyspære inni, samt den blåe kabelen for CO ₂ tilførsel	38
Figur 7-5: Gasstilførsel. I midten ser man et forstørret bilde av de to rotametrene hvorav den til venstre brukes til avlesning av gassmengde. Lengst til høyre er et forstørret bilde av reguleringsventilen	39
Figur 8-1: Bildet viser en prinsipiell skisse av testrommet. De to barna som er utsatt for trekk under vintertilstanden er farget rødt	42
Figur 9-1: VelociCaloc Plus, Modell 8388	50
Figur 9-2: GM70 CO ₂ måler	51
Figur 9-3: Oppbygging av en CARBOCAP sensor, (Vaisala, 2007a).....	52
Figur 10-1: Målepunktene i pustesonen	53
Figur 10-2: Et eksempel av konsentrasjonsvariasjonen i noen punkter i pustesonen under sommerforhold	55
Figur 10-3: Et eksempel av konsentrasjonsvariasjonen i noen punkter i pustesonen under vinterforhold.....	56

Figur 10-4: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 15 og i punkt 16 under sommerforhold	57
Figur 10-5: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 20 under sommerforhold	57
Figur 10-6: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 21 under sommerforhold	58
Figur 10-7: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 12 og i punkt 15 under vinterforhold.....	58
Figur 10-8: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 18 under vinterforhold	59
Figur 10-9: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 23 under vinterforhold	59
Figur 10-10: Konsentrasjonsvariasjonen i løpet av en skoledag om vinteren.....	60
Figur 10-11: Variasjon av tilluftstemperaturen under forsøket hvor en skoledag ble simulert under vinterforhold.....	60
Figur 10-12: Konsentrasjonsvariasjonen i løpet av en skoledag om sommeren	61
Figur 10-13: Variasjon av tilluftstemperaturen under forsøket hvor en skoledag ble simulert under sommerforhold	61
Figur V1-1: Varmefluks gjennom en vegg med flere sjikt	73
Figur V3-1: Oversikt over målepunkter for temperatur i testrommet, sett fra døren og inn i rommet	77
Figur V3-2: Oversikt over målepunkter for temperatur i testrommet, sett ovenfra	78
Figur V4-1: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, sommertilstand	79
Figur V4-2: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, sommertilstand	80
Figur V4-3: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, vintertilstand	80
Figur V4-4: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, vintertilstand	81
Figur V4-5: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand.....	82
Figur V4-6: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand.....	82
Figur V4-7: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand.....	83
Figur V4-8: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, vintertilstand	83
Figur V4-9: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, vintertilstand	84

Tabellfortegnelse

Tabell 6-1: Materialeegenskaper for omslutningsflater slik de er definert i simuleringsmodellen	25
Tabell 8-1: Gjennomsnittlige verdier av utetemperaturer, samt årsmiddeltemperaturen beregnet for Trondheim i tredveårsperioden 1961-1990. Alle temperaturer er angitt i °C (Meteorologisk Institutt, 2007)	41
Tabell 8-2: Oversikt over U-verdier for yttervegg og vinduer	43
Tabell 8-3: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C.....	43
Tabell 8-4: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C.....	43
Tabell 8-5: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C.....	44
Tabell 8-6: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C.....	44
Tabell 8-7: En dag på Charlottenlund barneskole	47
Tabell 10-1: Oversikt over hvor i rommet de resterende målepunktene befinner seg	54

Tabell 10-2: Opplysningene brukt til rangering av de registrerte CO2 verdiene i den 2. måleserien.....	55
Tabell 10-3: Opplysningene brukt til rangering av de registrerte CO2 verdiene i den 11. måleserien.....	56
Tabell 11-1: Rangering av de fire beste punktene under kartleggingsmålingen og under dagsmålingene. De beste punktene står øverst.....	64
Tabell V2-1: Lufthastigheter i ulike punkter, i avstand 1m fra tilluftsventilen	75
Tabell V2-2: Lufthastigheter i ulike punkter, i avstand 2 m fra tilluftsventilen	75
Tabell V2-3: Lufthastigheter i ulike avstander horisontalt ut i fra strålens senterlinje.....	76
Tabell V4-1: Oversikt over variansen til det prosentuelle avviket til konsentrasjonsvariasjonen i et punkt i forhold til referansepunktet i pustesonen med dårligst luftkvalitet.....	81

1 Innledning

Avanserte tekniske installasjoner for klimatisering og ventilasjon brukes i dag i moderne yrkesbygg for å skape et arbeidsmiljø og inn klima som ikke innvirker negativt på menneskenes helse, trivsel og prestasjonsevne. Imidlertid krever driften av slike anlegg en vesentlig del av den totale energibruken i bygninger.

I dagens samfunn fokuseres det mer og mer på energisparing og effektiv energibruk. Fra 1. februar 2007 er det blitt innført nye energikrav i Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven som skal redusere energibehovet i nye bygninger med 25 %. Kravene har en overgangsperiode frem til 1. august 2009 og inntil da vil de nye og gamle forskriftene gjelde side om side. Endringene innebærer at beregnet netto energibehov for bygningene skal ligge under en viss grense som er oppgitt i kWh/m² oppvarmet bruttoareal for 13 forskjellige byggkategorier. Som et alternativ kan fordringen om byggets energieffektivitet tilfredsstilles ved å innføre en rekke energiltak. Det er blitt satt fokus på bedre isolasjon, minst 70 % varmegjenvinning av ventilasjonsluft og bruk av alternative energikilder. (NVE, 2007)

Kreative arkitektoniske løsninger med f. eks utstrakt bruk av glassfasader, kan få problemer med å tilfredsstille de nye energikravene. Derfor er det viktig at man i tillegg til utbedringsforslag som er nevnt ovenfor også vurderer alternative løsninger for å redusere energibruken.

En omfattende undersøkelse av 157 klasserom i Oslo har vist at man ved å bruke behovsstyrt ventilasjon, styrt av konsentrasjonen av CO₂ i luften innendørs, kan redusere energibruken for ventilasjonssystemet ned til 38 % sammenlignet med en tradisjonell CAV (Constant Air Volume) løsning med driftstid på 10 timer. Reduksjonen i energibruken er mulig fordi man med behovstilpassede systemer ventilerer i samsvar med den faktiske brukstiden og antall personer som er til stede. Det viste seg nemlig at gjennomsnittlig bruk av klasserommene er ca 4 timer per dag (ikke 10). Dessuten kan også antall tilstedeværende personer variere sterkt, og er ofte lavere enn antall personer som rommene ble dimensjonert for. (Mysen, 2005a)

For å få full utbytte av et behovsstyrt ventilasjonssystem er det svært viktig å være nøye med prosjekteringen. Plassering av sensorer som skal styre anlegget må være slik at signalene som

de sender ut gir et representativt bilde av luftforhold i oppholdssonen i rommet. Feil plassering kan minke fordelene ved et avansert behovsstyrt ventilasjonssystem.

Hensikten med denne oppgaven er å utarbeide forslag til plassering av sensorer som skal styre ventilasjonsanlegget i et rom, slik at det oppnås god luftkvalitet og effektiv energibruk.

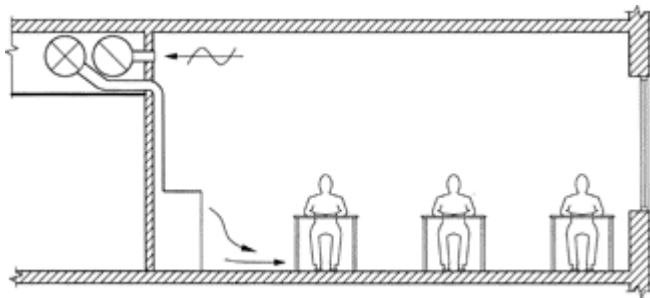
Arbeidet baserer seg på forsøk gjennomført på Varmeteknisk Laboratorium ved NTNU der det finnes et klimaprøverom på størrelse med et klasserom dimensjonert for 30 personer. Rommet har omrøringsventilasjon med bakkantinnblåsning, og er blitt innredet som et klasserom. Siden det er mennesket selv som vil representere den dominerende forurensningskilden her er hovedvekten av oppgaven blitt lagt på å undersøke hvordan konsentrasjonen av CO₂ vil utvikle seg i løpet av brukstiden og hvordan gassen vil spre seg i rommet. I utgangspunktet er det blitt planlagt å gjennomføre datasimuleringer i AirPak (en CFD programvare fra Fluent Inc.) for å få kartlagt spredningene, men siden dette ikke lyktes ble det foretatt omfattende målinger for å få en oversikt. Alle konklusjonene er dermed basert på resultater av forsøk som er blitt gjennomført.

Til å begynne med blir to hovedprinsipper for tilførsel av frisk luft nevnt fordi de gir forskjellige strømningsbilder innendørs. Omrøringsventilasjon med bakkantinnblåsning blir nøyere beskrevet fordi testrommet på laboratoriet er utstyrt med denne type innblåsningssystem. Etterpå blir prinsippet bak behovsstyrt ventilasjon fremstilt, og et utvalg av styringsstrategier presentert. Siden det ble gitt en nærmere beskrivelse av de ulike styringsparametere som vanligvis brukes i forbindelse med behovsstyrt ventilasjon i fordypningsprosjektet som ble gjennomført høsten 2006, er kun de som egner seg til bruk ved ventilasjonsstyring i klasserom gjennomgått her. Videre diskuteres plassering av sensorer med bakgrunn i dagens litteratur. Kapittel 4 gir en oversikt over hvilke krav det stilles til luftkvalitet og temperaturen innendørs i henhold til norske lover og forskrifter. Kapittel 5 gir en beskrivelse av testrommet. Arbeidet som ble gjort i forbindelse med simuleringene i AirPak blir omtalt i Kapittel 6. Til slutt fortelles det hvordan testrommet ble tilrettelagt for forsøk og hvordan målingene ble gjennomført. Måleapparatene som er blitt brukt blir beskrevet. Resultatene presenteres og diskuteres, før det blir gitt forslag til videreføring av arbeidet.

2 Tilførsel av frisk luft

Måten man tilfører luften til et rom på, mengde, hastighet, retning og temperatur, tilluftsventilens plassering og utforming har mye å si for strømningsbildet i et rom, og dermed også for fordelingen av forurensningskonsentrasjonen. Det er to hovedprinsipper for tilførsel av frisk luft til rom; fortregning og omrøring.

Fortrengningsventilasjon kjennetegnes ved at undertemperert luft med lav hastighet blåses direkte inn i oppholdssonen. Den varmes opp ved hjelp av varmekilder i rommet og stiger oppover, uten å blande seg med romluften. Forurensningene vil da følge denne strømmingen og samles opp under taket. Derfor bør avtrekket ligge her. Temperaturen på den tilførte luften har også mye å si for strømmingen i rommet. For kald tilluft vil skape trekk, men er den for varm vil den raskt stige oppunder taket, og rommet vil ikke bli ventilert godt nok.



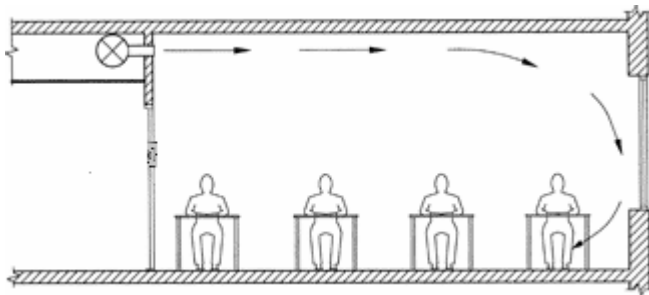
Figur 2-1: Prinsipiell skisse av fortrengningsventilasjonen (Mysen, 2005c)

Ved fortrengningsventilasjon kan man oppnå en bedre kvalitet i pustesonen enn ved omrøringsventilasjon (Mysen, 2005c). Problemet med denne typen lufttilførsel er at tilluftsventilene som plasseres i oppholdssonen ofte er store og pga utilfredsstillende termiske forhold inntil ventilene, også plasskrevende. Som prosjekterende ingeniør kan man ikke forutse fremtidig møblering i rommet, og det er i praksis vanskelig å bevare bruksbegrensningene inntil tilluftsventilene. Et eksempel på uheldig møblering i forhold til tilluftsventilen for fortrengningsventilasjon er fra Strindheim skole i Trondheim hvor lyttekroken i et klasserom ble plassert i ventilens nærsone (Sætren, 2005).

I et klasserom kan det være mer brukervennlig å installere omrøringsventilasjon. Ved omrøring blir tilluften blåst inn med høy hastighet, slik at den blander seg med romluften, og forurensningskonsentrasjonene fortynnes. For å unngå trekk i oppholdssonen som følge av

den høye innblåsningshastigheten bør tilluftsventilene plasseres utenfor denne, gjerne oppunder taket. Temperaturen til den friske luften vil også påvirke strømningsmønsteret. For kald luft vil falle ned mot gulvet altfor raskt og skape trekk, mens for varm luft vil samle seg opp under taket og forbli der uten å komme ned til oppholdssonen. Det finnes imidlertid tilluftsventiler på markedet som tåler en under- eller overtemperatur på 10-12 °C i forhold til romtemperaturen uten at man får problemer med trekk, eller oppsamling av varm luft oppunder taket (Ulverud, 2002). Ved å tilpasse innblåsningshastigheten og temperaturen til den tilførte luften til rommets utforming, plassering av lys, varmekilder og avtrekksventiler, kan man med omrøringsventilasjon oppnå jevn fordeling av forurensningskonsentrasjoner og romtemperaturen.

På testrommet som er blitt brukt i denne undersøkelsen blir luften tilført ved hjelp av omrøringsventilasjon med bakkantsinnblåsning, dvs. at tilluftsventilene er plassert på innerveggen, oppunder taket.



Figur 2-2: Prinsipiell skisse av omrøringsventilasjonen med bakkantsinnblåsning (Mysen, 2005c)

Bakkantsinnblåsning baserer seg på Coandaeffekten, hvilket innebærer at luftstrålen kleber til taket og strømmer langs det. Dette skjer fordi luften mellom taket og luftstrålen rives med uten at ny luft kan komme til i mellom, slik at det dannes en undertrykk mellom taket og strålen som gir en klebende effekt (Systemair, 2007a). Fordelen er at den tilførte luften vil trenge dypere inn i rommet, slik at innblåsningshastigheten reduseres før den når oppholdssonen.

Undertemperert tilluft vil i tillegg til Coandaeffekten påvirkes av termiske krefter som i en viss avstand fra utløpet til ventilen vil få overtaket og trekke strålen nedover. Hvor dette kommer til å skje er blant annet avhengig av temperaturdifferanser mellom rom og tilluft, type og størrelse på ventilen og lufthastigheter (Systemair, 2007a). Strålen kan også løsne på grunn av lysarmaturer og andre ujevnheter i taket, samt konveksjonsstrømmer i vindusregionen. For

tidlig løsning av luftstrømmen kan skape trekkproblemer. Dersom oppvarmingskilden i rommet ikke er plassert under vinduer kan bakkantsinnblåsning forsterke kaldras fra disse (Skåret, 1996).

Fordelen med bakkantinnblåsning er at hovedkanalene for luftavtrekk og -tilførsel kan føres under himling i korridor. Dette medfører lavere installasjonskostnader fordi man slipper å forgrene kanalene ut i rommet, samtidig som himlingen i selve rommet kan sløyfes.

3 Behovsstyrt ventilasjon

Prinsippet for behovsstyrt ventilasjon baserer seg på å regulere luftmengder som skal tilføres et rom i forhold til forurensningskonsentrasjonen i romluften. På denne måten unngår man å ventilere for mye når forurensningsbelastningen er liten. Dermed kan man redusere energibruk til behandling og transport av ventilasjonsluften. Energisparingspotensialet er individuelt for hvert tilfelle. Det er avhengig av bruksmønsteret til en bygning, utendørs forhold og klima, valg og styringsstrategi av ventilasjonssystemet. Systemkomponentene må velges med omhu for at de skal kunne fungere godt i samspill med hverandre uten at virkningsgraden og systemets effektivitet senkes.

Balansert mekanisk ventilasjon egner seg best til behovsstyring ettersom man da kan konstruere anlegget til å gi et hvilket som helst inneklima. Ved naturlig (og delvis også ved hybrid) ventilasjon er man avhengig av utendørs forhold og klima for å få til ønsket effekt.

For å definere behovet for frisk luft må man ta i betraktning det enkelte roms utforming og analysere dets bruksmønster. Man må kjenne til antall mennesker som skal oppholde seg der, hvilke aktiviteter og prosesser skal utføres innenfor rommets fire vegger, når lokalet er i bruk og når det står ledig. Viser behovet seg å være konstant kan man bruke CAV (Constant Air Volume)-anlegg. Det finnes to typer av slike anlegg: de som har mulighet til å levere én luftmengde, ved at de kun kan slåes av eller på, og totrinnsystemer hvor man kan skifte mellom to forskjellige luftmengder og avslått tilstand. I situasjoner hvor forurensningskonsentrasjonen er uforutsigbar og/eller sterkt varierende må man, dersom man ønsker å tilpasse luftmengdene til behovet, bruke et VAV (Variable Air Volume)-anlegg som kan variere luftmengdene trinnløst.

I skoler kan forurensningskonsentrasjonen være uforutsigbar grunnet endringer i timeplanen, eller pga sykdom og annet fravær. Klasserom blir ofte brukt av færre mennesker enn de er blitt dimensjonert for. Basert på antall tilstedeværende er det blitt registrert at kun 74 % av dimensjonerende kapasitet i gjennomsnitt blir utnyttet, når rommet er i bruk (Mysen, 2005a). Denne konklusjonen er basert på undersøkelsen av 157 klasserom i Oslo.

3.1 Valg av styringsstrategi

For å kunne lage et ventilasjonssystem som reagerer raskt på endringene av forurensningskonsentrasjonen i et rom og regulerer luftmengdene deretter, er det svært viktig å velge ut en passende styringsstrategi.

Det finnes to måter å styre et ventilasjonsanlegg på: manuelt og automatisk. Manuell styring kan skje ved at brukeren selv trykker på brytere og regulerer ventiler med utgangspunkt i antall tilstedeværende eller oppstart av ulike prosesser som krever ventilasjon (Mysen, 2005b). Automatisk styring kan enten være tidsbestemt ut i fra bruksmønsteret for en gitt bygning, eller anlegget kan styres ut i fra sensorer som detekterer endringer i inneklima. For et VAV-anlegg vil automatisk styring ved hjelp av sensorer være det mest aktuelle. Da vil mengden av tilført luft bli kontinuerlig tilpasset forurensningsproduksjonen i rommet.

I dag er sensorer som reagerer på endringer i tilstedeværelse (bevegelse), lufttemperatur, konsentrasjoner av ulike forurensningsstoffer, partikler og fuktighet kommersielt tilgjengelige, og brukes i forbindelse med behovsstyring av ventilasjonen. Det er også mulig å finne enheter som inneholder en kombinasjon av sensorer f.eks. en tilstedeværelses- og en temperatursensor i ett.

Aktuelle styringsparametere for ventilasjonen i et klasserom er tilstedeværelse, karbondioksid (CO₂) og temperatur (Mysen, 2005b).

3.1.1 Tilstedeværelse

Tilstedeværelse kan registreres enten ved å hjelp av telleapparater som teller antall personer som går inn i et klasserom og justerer luftmengdene deretter, eller ved hjelp av detektorer som reagerer på bevegelse. Ved bruk av telleapparater burde man også ha et system for å telle personer som går ut, slik at ventilasjonsanlegget alltid får et riktig bilde av tilstedeværelsen i lokalene. Ulempen med denne løsningen kan være at det kan oppstå feil dersom flere går ut eller inn samtidig. Det er mulig at telleapparatet da kan overse noen og dermed sende gale signaler til ventilasjonsaggregatet.

De vanligste bevegelsesdetektorer som benyttes til styring av ventilasjonsaggregater er passive og reagerer på endringer i infrarødstråling. De sender ikke ut noen signaler, men registrerer den infrarøde strålingen som alle varme legemer avgir. Slike detektorer lages av pyroelektriske materialer som endrer polaritet dersom de blir utsatt for temperaturendringer. Skiftende polarisering vil da indusere en elektrisk spenning som brukes som signal. Foran det pyroelektriske materialet blir det plassert en linse som transmitterer infrarød stråling. Denne har gjerne et optisk mønster på overflaten som deler opp ”synsfeltet” til det pyroelektriske materialet. Når en varmekilde passerer fra en del av synsfeltet til en annen, vil detektoren reagere og sende ut et signal. Problemet kan være at altfor raske eller altfor langsomme bevegelser ikke blir registrert. (Hartmann, 2003)

De detektorene som er kommersielt tilgjengelige kan registrere stråling med bølgelengder i hele eller deler av intervallet mellom 0,15 og 20 μm , mens strålingen fra menneskekroppen er sterkest i området mellom 8 og 14 μm (Hartmann, 2003). Ved å velge oppløsningen på linsen kan man bestemme hvor følsomt detektoren er for bevegelse. Stor oppløsning vil egne seg for å detektere små bevegelser, og motsatt. Rekkevidden bør velges slik at detektoren kan ”se” hele oppholdssonen. Tiden mellom det siste registrerte signalet og endringen i innblåst luftmengde kan justeres og tilpasses bruksmønsteret. På denne måten unngår man at anlegget slås av når man sitter helt stille (som f. eks under en skriftlig prøve), eller når brukere forlater rommet for kortere perioder.

Ulempen med bevegelsesdetektorer er at man vanskelig kan avgjøre hvor mange mennesker som oppholder seg i et rom. Man kan som oftest kun registrere om noen er der eller ikke, og dermed sende signaler om slå anlegget av eller på. Denne styringsmetoden representerer en klar forbedring mht energisparing sammenlignet med de tradisjonelle CAV-systemene som kontinuerlig tilfører lik mengde luft uansett om rommet er i bruk eller ikke, men den egner seg best i lokaler hvor tilstedeværelsen varierer og antall tilstedeværende personer er konstant (som for eksempel i cellekontorer).

3.1.2 Karbondioksid

Karbondioksid finnes normalt i atmosfæren, men blir også produsert av mennesker i forbindelse med stoffskiftet, hvilket gjør oss til hovedkilden for denne gassen innendørs.

Produksjonsraten er hovedsakelig avhengig av personens kroppsstørrelse og graden av fysisk aktivitet, noe som gjør at man kan beregne forventet konsentrasjon i rommet, på bakgrunn av antall brukere og deres aktiviteter. CO₂ er fargeløs, luktløs og ufarlig i de mengder som den vanligvis forekommer innendørs, men den indikerer at det er andre biologiske avfallsstoffer til stede som kan føre til ubehag. Ved å betrakte økningen i konsentrasjonen av CO₂ innendørs i forhold til nivået i uteluften, kan man få et bilde av inneklimate i lokaler med høy tilstedeværelse. Ulempen kan være at man i rom som er dimensjonert for mange mennesker ikke får tilført nok luft til å ventilere bort forurensning fra materialer når det er få brukere til stede. Dette kan imidlertid løses ved å legge inn en konstant ventilasjonsmengde som vil ta seg av materialbelastningen og la luftmengdene variere utover dette i takt med personbelastningen (Mysen, 2005b).

De vanligste CO₂-sensorer som brukes til styring av ventilasjonsanlegg benytter detektering av infrarød stråling. Dette kan skje på to måter: ved hjelp av fotoakustiske eller fotometriske sensorer (Sørensen, 2002). En fotoakustisk sensor består av: et kammer som inneholder en luftprøve, en optisk filter som slipper gjennom kun lys med de bølgelengder som kan absorberes av CO₂, en lyskilde og en mikrofon. Når CO₂ molekyler absorberer strålingen vil de begynne å vibrere. Det vil skape et akustisk felt som mikrofonen tar opp og gjør om til elektroniske signaler. Disse signalene vil variere med konsentrasjonen av CO₂. En fotometrisk sensor vil fungere på lignende måte, men isteden for en mikrofon vil denne ha en fotocelledetektor som måler lysintensiteten for den bølgelengden som CO₂ absorberer. Jo høyere konsentrasjon av gassen, dess lavere lysintensitet (Emmerich og Persily, 2001).

Begge sensorer gir relativt nøyaktige målinger og har rask respons. Utgangssignalet vil variere mellom 0 og 10V for begge målemetoder. Problemet er at de kan påvirkes av elektromagnetiskstråling fra kabler og teknisk utstyr. Det er derfor anbefalt å sjekke og kalibrere sensorene med halvannet års mellomrom (Sørensen, 2002).

3.1.3 Temperatur

Temperaturstyring av ventilasjonssystem kan brukes til å jevne ut temperaturdifferanser mellom ønsket og faktisk romtemperatur. En slik løsning vil øke den termiske komforten innendørs, men den bør brukes i kombinasjon med andre styringsparametere for å sikre god

luftkvalitet og tilstrekkelig bortføring av forurensningsstoffer. Selv om varme kan påvirke emisjoner fra noen materialer, så er ikke temperaturvariasjon entydig med variasjonen av forurensningskonsentrasjonen i et oppholdsrom.

3.2 Plassering av sensorer

Etter å ha valgt et passende styringsparameter og en styringsstrategi er det veldig viktig å finne en god plassering for overvåkningssensorene. De må monteres slik at utgangssignalet gir et representativt bilde av inn klimaet i oppholdssonen. Å montere en sensor nær forurensningskilden, ved vinduer og radiatorer eller i direkte sollys kan påvirke signalene og gi et feilaktig bilde av inn klimaet. For å få en bedre oversikt over lokalet kan man installere flere apparater til å kontrollere et rom. En slik løsning vil imidlertid gjøre overvåkingen dyrere og mer komplisert.

Luftstrømninger vil påvirke signalene som blir registrert. Derfor er det viktig å tenke på hvordan ventilasjonsluften vil fordele seg i rommet. Ved fortrengningsventilasjon vil forurensninger stige oppover mot taket med konveksjonsstrømmer som oppstår rundt varme gjenstander og personer. Sensoren bør da plasseres enten i overgangssonen mellom ren og forurenset luft, eller i avtrekkskanalen gitt at den målte konsentrasjonen er representativ for forurensningen i oppholdssonen (Liddament, 1996). Ved omrøringsventilasjon kan man i prinsippet montere sensoren hvor man vil fordi forurensningskonsentrasjonen vil forventes å være jevnt fordelt i rommet, men i virkeligheten vil sensorplasseringen likevel være av betydning siden det ofte oppstår konsentrasjonsgradienter og dødsoner (Mysen, 2005b). I følge Sørensen, Stampe og Ludvigsen (2004), bør sensoren plasseres i oppholdssonen 1,5 m over gulvet, slik at romluften fritt kan strømme forbi den. Imidlertid er denne løsningen svært lite brukervennlig. Apparatet vil da med stor sannsynlighet være i veien for brukere av rommet og de vil alltid måtte ta ansvar for å ikke støte bort i eller puste direkte på det og dermed forstyrre signalene. De fleste apparatene blir i praksis derfor montert enten på en av veggene, i taket eller i avtrekkskanalen. Dette er en grei løsning dersom man klarer å finne et sted hvor forurensningskonsentrasjonen varierer i samme takt som konsentrasjonene i rommet. Dersom man har mulighet til det, er det derfor viktig å foreta nærmere undersøkelser av luftstrømningen og fordelingen av forurensningskonsentrasjonene.

Bevegelsesdetektorer som passivt detekterer infrarød stråling bør ha en direkte, uhindret utsikt til bevegelsen for å kunne registrere den (Danell, 2002). De må derfor plasseres slik at møbler og innredning ikke sperrer signalene.

4 Krav til luften og temperaturen innendørs

For å kunne sette riktige grensebetingelser for styring av et ventilasjonssystem, må man vite hvilke krav stilles til inneklimate i et rom. Dette kapittelet gir en oversikt over eksisterende krav og retningslinjer til luftmengder og temperaturer, med utgangspunkt Byggforskserien og Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven (TEK), § 8-36 og § 8-34, samt veiledningen til disse.

I forbindelse med endringer i Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven er det ikke blitt foretatt noen forandringer i § 8-34 og § 8-36, som tar for seg krav til ventilasjonen og termisk inneklimate. Veiledningen til § 8-36 er blitt presisert og forenklet, men kravene er fremdeles de samme som i forskriftene fra 1997. (BE, 2007a)

4.1 Luftmengder

Den dimensjonerende uteluftmengden for et ventilasjonssystem kan i følge Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven, § 8-34 (Byggforsk kunnskapssystemer, 1997a) finnes ut i fra personbelastningen, materialbelastningen og forurensningen fra aktiviteter og prosesser.

For en voksen person i lett aktivitet skal det tilføres $7 \text{ l/(s}\cdot\text{person)}$. Mengde luft som skal til for å ventilere bort belastningen fra innredningsmaterialer og tekniske installasjoner kan variere mellom $0,7 - 2,0 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$. $0,7 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ er tilstrekkelig i rom som er innredet med lavemitterende materialer, $1 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ i rom hvor det er brukt kjente materialer som erfaringen tilsier er lavemitterende (uten at dette nødvendigvis er blitt vitenskapelig bekreftet), og $2 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ der hvor det enten er blitt brukt ukjente materialer eller de med dokumentert høye utslipp. Slike materialer bør imidlertid ikke benyttes. I de fleste tilfeller kan materialbelastningen antas å være $1 \text{ l/(s}\cdot\text{m}^2)$ (Blom, 1999a).

Verdiene som her er gitt forutsetter god renhold og vedlikehold av både bygget selv og de tekniske installasjonene, god kvalitet på den tilførte luften, en ventilasjonseffektivitet på 1 og at spesielt forurensede prosesser helst plasseres i egne spesialventilerte rom. Ved å følge veiledningen vil man oppnå en luftkvalitet av kategori 2, som gjør at mindre enn 20 % av besøkende kommer til å være misfornøyde med luften innendørs. (Blom, 1999a)

Mengder luft som skal til for å ventilere bort forurensningen fra person- og materialbelastningen adderes sammen og sammenlignes med mengder luft som må tilføres på grunn av de forskjellige aktiviteter og prosesser som foregår i lokalene. Den største av de to verdiene velges da som den dimensjonerende luftmengde for ventilasjonsanlegget.

På skoler er det for det meste mennesker som representerer den største forurensningskilden, og den dimensjonerende luftmengden kan da beregnes ved hjelp av Ligning 4.1:

$$v = p \cdot n + B \quad (4.1)$$

Hvor v representerer uteluftsmengden uttrykt i $l/(s \cdot m^2)$, p personfaktoren i $l/(s \cdot \text{person})$, n personbelastningen i person/m^2 , og B materialbelastningen i $l/(s \cdot m^2)$.

For klasserom vil denne metoden gi en dimensjonerende luftmengde på $4,5 l/(s \cdot m^2)$, gitt at man regner med at personbelastningen er $0,5 \text{ person}/m^2$, og at materialbelastningen er på $1 l/(s \cdot m^2)$. For testrommet som blir benyttet i denne oppgaven kan man da regne med en dimensjonerende luftmengde på $276,3 l/s$. Dette representerer den mengde luft som må tilføres dersom klasserommet er besatt med antall mennesker den ble dimensjonert for. Imidlertid har flere undersøkelser vist at antall brukere som er til stede ofte er lavere. Det er derfor sannsynlig at mengder tilført luft kan reduseres og energi kan bli spart dersom ventilasjonen tilpasses bruksmønsteret og antall brukere.

I rom hvor mennesker står for den største delen av forurensningen, kan man bruke CO_2 konsentrasjonen i luften som en indikator på antall tilstedeværende. Dette fordi mennesker avgir CO_2 i forbindelsen med stoffskiftet. Brukernes vekt, alder, kosthold og aktivitetsnivå vil påvirke produksjonen av gassen (Seppänen, Fisk og Mendell, 1999). Den anbefalte normen for konsentrasjonen av CO_2 innendørs er $1800 \text{ mg}/m^3$ noe som tilsvarer 1000 ppm (parts per million) (Nasjonalt Folkehelseinstitutt, 1998). Den målte verdien i luften inne bør vurderes i forhold til utendørskonsentrasjonen av gassen (utendørskonsentrasjonen bør brukes som referanseverdi).

Et voksent menneske produserer ca $19 l/h CO_2$ ved lett aktivitet, mens barn i grunnskolen ved samme aktivitetsgrad produserer omtrent $15 l/h$. For å få omtrent samme luftmengde som for voksne er det derfor anbefalt å senke det maksimalt tillate CO_2 nivået i barneskoler til 900 ppm . (Mysen, 2005b)

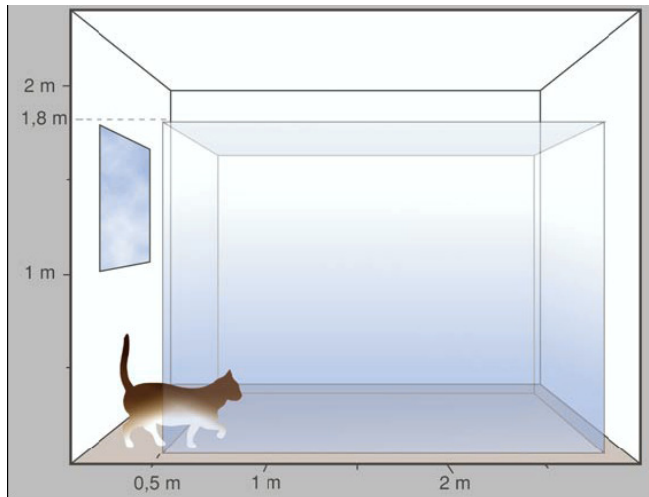
4.2 Temperaturnivå

Termisk komfort brukes til å beskrive en sinnstilstand hvor man er tilfreds med det termiske miljøet man befinner seg i. Inntrykket er subjektivt og vil variere fra menneske til menneske, derfor må man regne med at et visst antall brukerne i et rom alltid kommer til å være misfornøyde. Veiledningen til Teknisk forskrift, § 8-36 om termisk inneklima tar utgangspunkt i at mindre en 10 % av brukere føler misnøye med den termiske komforten i kroppen som helhet (Blom, 2000). Følelsen vil påvirkes av vår bekleddning, aktivitetsgrad og oppholdstid i et bestemt termisk miljø, samt strålingstemperatur fra omgivende flater, lufttemperatur, lufthastighet og luftfuktighet (Blom, 1999b).

Det er vanlig å benytte lufttemperaturen til å beskrive de termiske forhold i et lokale, men som nevnt i avsnittet ovenfor så vil også strålingen fra omgivende flater påvirke komfortopplevelsen. Dette fordi en stor del av kroppens varmetap skjer ved hjelp av stråling. Gjennomsnittlig strålingstemperatur er en fiktiv verdi for overflatetemperaturen på omgivende flater, som gir samme varmeutveksling som de faktiske overflatetemperaturene. Denne verdien kan benyttes sammen med lufttemperaturen til å finne den operative temperaturen i rommet, som gir den samme varmeavgivelsen fra mennesket som de faktiske omgivelsene. Den operative temperaturen er altså den temperaturen vi kan føle i et rom. Dersom lufthastigheten innendørs ikke overstiger 0,2 m/s og differansen mellom den gjennomsnittlige strålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4 °C (noe som vanligvis er tilfellet), er den operative temperaturen gitt av gjennomsnittet mellom lufttemperaturen og den gjennomsnittlige strålingstemperaturen. (Blom, 1999b)

Krav til varmeisolasjon i dagens bygninger gjør at den gjennomsnittlige strålingstemperaturen avviker lite fra lufttemperaturen, hvilket igjen innebærer at den operative temperaturen er tilnærmet lik lufttemperaturen (jmfør avsnittet ovenfor). For å kunne sørge for behagelige termiske forhold for mer enn 90 % av brukere er det vanlig å kontrollere lufttemperaturen i oppholdssonen i lokalene. Oppholdssonen defineres vanligvis som en sone innenfor det fysiske rommet som begrenses av vertikale plan med 0,5 m avstand fra ytterveggen, 0,2 m avstand fra de øvrige veggene, gulvet og et horisontalt plan 1,8 m over gulvet, slik som vist i Figur 4-1 (Systemair, 2007a). Definisjonen kan imidlertid variere fra rom til rom og avhenger av hva slags lufttilførselssystem man bruker (Sørensen et al, 2004). Verdiene som er angitt i

Figur 4-1 er derfor kun veiledende. Om vinteren når den gjennomsnittlige strålingstemperaturen er noe lavere enn lufttemperaturen, bør lufttemperaturen settes noe høyere enn den optimale operative temperaturen. Det motsatte gjelder om sommeren (Blom, 1999b).



Figur 4-1: Oppholdssonen, (Systemair, 2007a)

Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven sier at: ”Det termiske inn klimaet i rom for varig opphold skal gi tilfredsstillende helseforhold og komfortopplevelse ved forutsatt bruk.” (Byggforsk kunnskapssystemer, 1997b). I veiledningen (BE, 2007a) er det anbefalt at lufttemperaturer innendørs bør holdes innenfor et intervall mellom 19 og 26 °C fordi for høye og for lave lufttemperaturer kan skape ubehag og helseproblemer, og føre til redusert arbeidsprestasjon og økt ulykkesrisiko. Lufttemperaturen skal tilpasses rommets funksjon og bruk. I oppvarmings sesongen bør den ikke overstige 22 °C, mens man om sommeren, på dager da utelufttemperaturen er høyere enn 26 °C, kan akseptere at den øvre temperaturgrensen overskrides med 50 timer per et normalår (BE, 2007a). For skoler bør dette kravet skjerpes til f.eks. 25 timer per år, fordi denne type bygg er stengt om sommeren (Mysen, 2005c). Veiledningen nevner også at man kan unngå uakseptabelt ubehag ved å sørge for at lufttemperaturforskjellen mellom brukernes hode og føtter er mindre enn 3 °C, og at temperaturvariasjonen i løpet av en dag ikke er større enn 4 °C (BE, 2007a). Den optimale operative temperaturen for klasserom er $24,5 \pm 1,5$ °C om sommeren og $22,0 \pm 2,0$ °C om vinteren (Blom, 2000).

Temperaturen påvirkes av interne varmekilder som mennesker og teknisk utstyr, solinnstråling gjennom vinduer, varmeledning og infiltrasjon gjennom veggene og ventilasjon.

5 Testrommet

Forsøkene ble gjennomført i et testrom på Varmeteknisk Laboratorium ved NTNU, se Figur 5-1. Rommet er 7,03 m bredt og 8,73 m langt, målt innenfra, og dets overflate tilsvarende et vanlig klasserom, dimensjonert for 30 personer (Byggforsk kunnskapssystemer, 1997c).



Figur 5-1: Fotografi av testrommet tatt fra inngangsdøren

Høyden er begrenset til 3,25 m av en nedsenket himling. Ni lamper som henger 35 cm under himlingen utgjør belysningen i rommet. Hver lampe har to lysrør, hver på 28 W. Gulvet har et belegg av vinyl.

Veggen rett overfor døren kan kjøles ned og på denne måten representere en yttervegg. Det er fire vinduer med treramme og tolags glass med luft i mellom på denne veggen. Under hvert vindu er det plassert en elektrisk ovn med en effekt på 1000 W.

På den veggen hvor inngangsdøren befinner seg (dørveggen) er det lagt inn et stort vindu med dobbelt isolerglass i aluminiumsramme. Også her er det kun luft mellom glassene. For å kunne simulere solinnstråling er det lagt inn gulvvarme oppå gulvbelegget i området under veggen.

Retten over dørveggen, oppunder himlingen er det laget et skjul for tillufts- avtrekkskanalene. Skjulet er laget av to 0,8 mm tykke blikkplater. På denne er det to avtrekks- og tre tilluftsventiler.

Tilluftsventilene er av type Sinus-BS-200, levert av Systemair. Mens avtrekksventilene av typen GRLc er levert fra Swegon.

5.1 Systemair Sinus-BS-200 Tilluftsventil

Sinus-BS-200 er en veggmontert tilluftsventil som består av et plenums-kammer med et innregulerbart spjeld, og en frontplate som er perforert øverst med et antall dyser under, se Figur 5-2. Hver dyse har en diameter på 35 mm, og kan dreies 360 ° rundt slik at man selv kan påvirke spredningsmønsteret til luften. Dysenes posisjon påvirker ikke luftmengde, trykkfall eller støy fra anlegget (Systemair, 2007b). Sinus-BS-200 har en sideanslutning til luftkanalen, med en gummipakning på anslutningsstussen.

Ventilen gir høy induksjon av luften, og en kort kastelengde. Den egner seg godt til innblåsing av temperert og undertemperert luft (gitt at undertemperaturen ikke overstiger 10 °K) (Systemair, 2007b).

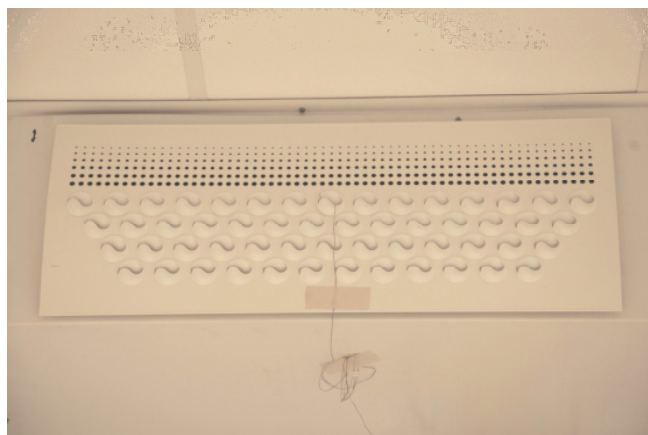
K-verdien for denne ventilen er 27,7 (verdien er oppgitt på selve ventilen). Denne størrelsen sier noe om forholdet mellom innreguleringsstrykket over spjeldet og luftstrømmen gjennom den, og kan uttrykkes som vist i Ligning 5.1 nedenfor:

$$K = \frac{q}{\sqrt{\Delta P_i}} \quad (5.1)$$

K er K-verdien, q luftstrømmen og ΔP_i innreguleringsstrykket. (Systemair, 2007c)

Ved å kjenne til K-verdien kan man stille inn trykket slik at man får en ønsket luftstrøm.

Sinus-BS-200 er brukervennlig og kan lett rengjøres med lunket vann og milde rensemiddel. Frontplaten taes ned og settes på plass uten bruk av verktøy, slik at man kommer til på innsiden også (Systemair, 2007c).

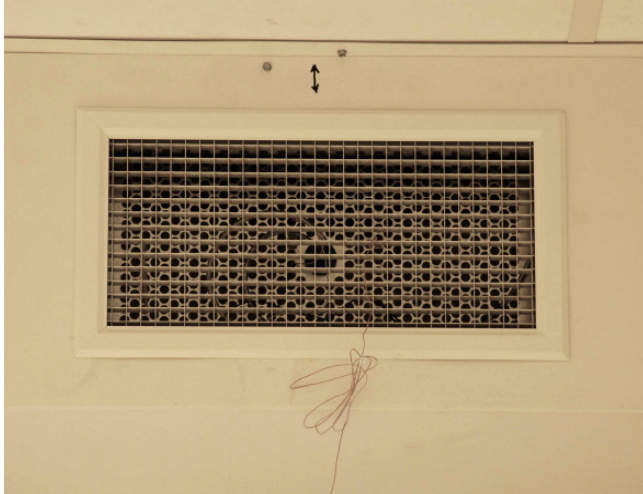


Figur 5-2: Systemair Sinus-BS-200 Tilluftsventil

5.2 Swegon GRLc avtrekksventil

GRLc er en rektangulær avtrekksventil med aluminiumsrist over åpningen. Den har også et plenumskammer med spjeld som kan fjernes, distribusjons plate, fast målepunkt og lyddemping. Ventilen har et veldig stort fritt tverrsnitt (91 %) som gjør at trykkfallet over komponenten er liten (Swegon, 2007). Derfor er GRLc velegnet til bruk ved store luftmengder. Fordi ventilen er tilknyttet luftkanalen på langsiden, er komponentens K-verdi 39,8 (Swegon, 2006).

Aluminiumsgitteret kan rengjøres med lunket vann og et rensemiddel, mens innsiden av plenumskammeret bør støvsuges. Gitteret foran er lett å fjerne uten bruk av verktøy. (Swegon, 2007)



Figur 5-3: Swegon GRLc avtrekksventil

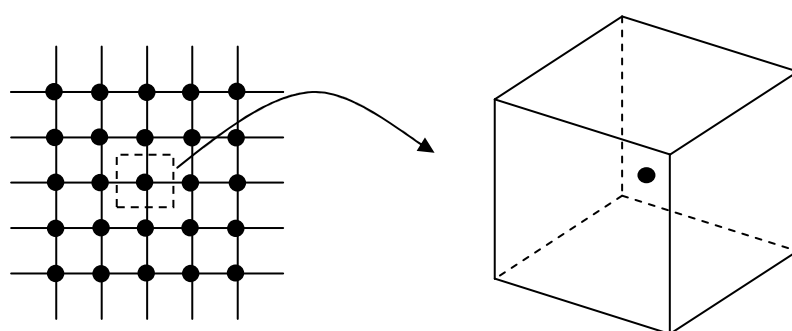
6 Simulering

Selv om datasimuleringen av forholdene i rommet mislyktes, beskriver dette kapittelet det arbeidet som er blitt gjort i forsøk på å få den til å fungere, samt når og hvorfor man valgte å gå bort fra denne metoden for kartlegging av spredningen av karbondioksid i rommet.

Testrommet ble modellert ved hjelp av AirPak som er en CFD (Computational Fluid Dynamics) programvare fra Fluent Inc. Alle gjenstandene, vinduene og veggene i rommet ble tegnet slik at de hadde samme dimensjoner i forhold til hverandre både i virkeligheten og i modellen. For å få dette til ble det foretatt målinger i testrommet. De målte verdiene ble rundet av til nærmeste hele centimeter, før gjenstandene ble lagt inn i AirPak.

AirPak bruker Navier-Stokes ligninger for beregning av massetransport, bevegelsesmengde til forskjellige stoffer i luften og energi ved laminære strømminger. For turbulente strømminger og beregninger der man også ser på varmeutveksling ved stråling, blir ytterligere transportligninger beregnet. (Fluent Inc., 2002)

Før AirPak kan finne en løsning, vil programmet kreve at brukeren definerer et beregningsnett i modellen, se Figur 6-1. For hvert knyttetpunkt (node) i nettet vil det da beregnes et sett av Navier-Stokes ligninger i et kontrollvolum rundt punktet og en løsning vil bli funnet.



Figur 6-1: Til venstre: et beregningsnett med markerte knyttetpunkt, til høyre: kontrollvolumet til et knyttetpunkt

Løsningens nøyaktighet vil påvirkes av nettets tetthet. Dersom nettet ikke er tett nok, kan beregningene gi unøyaktige resultater, men er det for tett kan det ta altfor lang tid å få et svar. Brukermanualen for AirPak (Fluent Inc., 2002) anbefaler derfor at nettet skal lages tettere i nærheten av objekter i modellen hvor temperatur- og hastighetsgradientene forventes å være

store. På denne måten kan man øke nøyaktigheten i løsningen der hvor strømmingen i modellen endrer seg mest, mens man kan spare beregningstid ved å ha et nettverk med større kontrollvolum der hvor endringene i strømmingen ikke er av betydning.

I delkapitlene nedenfor kan man lese hvilke avgjørelser og begrensninger ble gjort i modelleringsprosessen. Målet var ikke å ha en modell som eksakt kan forutsi luftstrømmen i testrommet, men en som gir et representativt bilde som senere kan bli undersøkt ved hjelp av forsøk og målinger.

6.1 Turbulens

AirPak tilbyr valget mellom fire turbulensmodeller, deriblant en standard k-epsilon modell som her ble valgt for simuleringen av testrommet.

k-epsilon modellen er semi-empirisk i det den tar utgangspunkt i både teoretiske og praktiske betraktninger. Den er basert på to transportligninger; én for den turbulente kinetiske energien til strømmingen som er direkte utledet av matematiske sammenhenger, og én for den turbulente spredningsraten som baserer seg på fysiske vurderinger. (Fluent Inc., 2002)

Modellen er robust, stabil og gir en akseptabel nøyaktighet for et bredt spekter av turbulente strømminger. Selv om RNG varianten av k-epsilon modellen (som også var et alternativ) kan gi mer nøyaktige og pålitelige resultater, er den mer kompleks og krever opp til 15 % mer beregningstid enn en standard k-epsilon modell. (Fluent Inc., 2002)

6.2 Testrommets omslutningsflater

Det var nødvendig å avgjøre de termiske egenskapene til alle omslutningsflater i testrommet for å kunne modellere dem i AirPak. Tettheten, varmekapasiteten og konduktiviteten til hver flate måtte mates inn i dataprogrammet. Ettersom samtlige omslutningsflater på testrommet er sammensatt av flere sjikt, ble det avgjort at man skulle benytte tettheten og varmekapasiteten til det sjiktet som grenser mot rommet (da dette materialet har mest å si for luft- og varmestrømminger innendørs), og en midlere varmekonduktivitet over alle sjikt. Den midlere varmekonduktiviteten ble beregnet etter metoden som er beskrevet i Vedlegg 1.

Alle veggene i rommet bortsett fra den rett overfor døren er levert av et firma ved navn Prepan som selger isolasjonspaneler laget etter sandwich-prinsippet med polyuretan (PUR) som kjernemateriale mellom to tynne stålplater. Panelene i taket og veggene er påført et overflatesjikt på 200 my Plastisol, mens døren er dekket med 200 my PVF-2. Begge materialene er typer av plast. Beleggene er imidlertid så tynne at man kan se bort fra deres termiske egenskaper (Schjetne, 2007).

Panelene som representerer sideveggen til venstre når man kommer inn i rommet, dørveggen, døren og taket ble levert i tykkelse på 0,1 m (hvorav tykkelsen på de to stålplatene til sammen utgjør 0,12 cm, og PUR resten). Egenskapene for stål er hentet fra NS-EN 12524 (Norsk Standard, 2000), mens konduktiviteten til PUR ble funnet i Miljøvaredeklarasjonen for prefabrikkerte paneler (Prepan, 2004).

Sideveggen til høyre for inngangsdøren er laget av samme materiale, men har en tykkelse på 0,08 m og dermed en annen midlere varmekonduktivitet.

I tillegg til panelet fra Prepan har taket en nedsenket himling som er laget av plater i mineralull med størrelse 0,6 m x 0,6 m hver. Slike plater av mineralull har vanligvis en varmekapasitet på 1030 J/kgK, en tetthet på 80 kg/m³ og en varmekonduktivitet på 0,033 W/mK (Nilsen, 2007). Luftsjiktet mellom panelet fra Prepan og himlingen ble det ikke tatt hensyn til ved beregninger av midlere varmekonduktivitet.

Veggen overfor døren som skal representere en yttervegg er bygd opp på en annen måte enn de andre. Innenfra og ut er den sammensatt av en 0,013 m tykk gipsplate, et 0,1 m tykt lag med mineralull, og til slutt en 0,012 m tykk plate av asfalt som vindsperre. Verdiene for gips og asfalt ble hentet fra NS-EN 12524 (Norsk Standard, 2000), mens verdiene for mineralullen som ble levert fra Glava er hentet fra firmaets produktdata (Glava, 2007).

Gulvet er dekket med et vinylbelegg. Tykkelsen på slike kan variere mellom 1,5 mm og 3 mm (Musum Interiør A/S, 2007). Etersom det er litt usikkert hvor tykt belegget på testrommet er, ble tykkelsen satt til 2 mm. Under vinylen er det et tregulv (0,023 m), så et 0,1 m tykt lag med mineralull, og en sponplate (med tykkelse 0,015 m) til slutt. Tregulvets varmekonduktivitet avhenger av tresorten, men vil i praksis variere mellom 0,12 - 0,14 W/mK (Krohn, 2002). Her

ble det valgt en middelvei på 0,13 W/mK. For sponplater kan man anta en konduktivitet på 0,14 W/mK (Kristensen, 2001).

Luftkanalene er skjult med to plater og befinner seg over dørveggen, oppunder himlingen. For simuleringsmodellen er skjulet definert som to små vegger kalt "kanalvegg y" (den vertikale) og "kanalvegg z" (den horisontale). Platene er laget av blikk, som egentlig er tynt valset stål med et sinkbelegg utenpå. Dermed ble det her brukt egenskaper til stål.

Det er to typer vinduer i rommet. Den ene befinner seg på dørveggen og er laget av dobbelt isolerglass med aluminiumsramme. Den andre består av fire tolags vinduer i treramme og befinner seg på veggen rett overfor døren. Hulrommet mellom glassplatene for begge typer vinduer er fylt med vanlig luft. I følge NS 3031 (Norsk Standard, 1987) har disse typer vinduer en U-verdi på henholdsvis 3,1 – 3,3 W/m²K, og 2,7 – 2,8 W/m²K. For beregningene i denne oppgaven ble det brukt U-verdier på 3,2 W/m²K og 2,7 W/m²K. Ut i fra disse verdiene ble det beregnet en midlere varmekonduktivitet for hele vinduet, ved hjelp av Ligning (6.1).

$$U = \frac{1}{R_{si} + l/k + R_{se}} \quad (6.1)$$

Hvor l er tykkelsen på vinduet. $R_{si} = R_{se} = 0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ representerer henholdsvis den innvendige og den utvendige varmeovergangsmotstanden. Her er de satt lik fordi veggen som skal representere ytterveggen i virkeligheten grenser mot et lite, avlangt rom, og er beskyttet mot ytre forhold som sol og vind. Dermed kan man anta at veggen egentlig grenser mot et uoppvarmet rom og sette varmeovergangsmotstandene lik hverandre i følge NS-EN ISO 6946 (Norsk Standard, 1997). Varmekapasitet og tetthet ble for glass funnet i standarden NS-EN 12524.

Tabell 6-1 gir en oversikt over materialer og materialegenskaper slik de er lagt inn i dataprogrammet, samt hvilke omslutningsflater de er blitt brukt på.

Tabell 6-1: Materialegenskaper for omslutningsflater slik de er definert i simuleringsmodellen

Materiale	Omslutningsflate	Varmekapasitet [J/kgK]	Tetthet [kg/m³]	Konduktivitet [W/mK]
Dorvegg sol_material	Dørvegg, venstre sidevegg, døren	450	7800	0,026
Hoyrevegg sol_material	Høyre sidevegg	450	7800	0,027
Tak sol_material	Tak	1030	80	0,027
Vindusvegg sol_material	Ytterveggen (rett overfor døren)	1000	900	0,045
Gulv sol_material	Gulvet	1400	1700	0,047
Kanalvegg sol_material	Kanalvegg y, kanalvegg z	450	7800	50
Vindu 1 sol_materiale	Vinduer med treramme	750	2500	0,27
Vindu 5 sol_materiale	Vindu med aluminiumsramme	750	2500	0,38

6.3 Tilluftsventil

Luftstrømmen i et rom er sterkt avhengig av hva slags tilluftsventil og lufttilførselsprinsipp som blir brukt.

På grunn av den kompliserte formen på tiluftsventilen Sinus-BS-200 som er installert i testrommet, ble ventilen modellert separat og på to forskjellige måter for å finne ut hvordan man best mulig kunne simulere den virkelige luftstrømmen. To forskjellige modeller ble vurdert.

Først ble mengden av tilført luft i laboratorierommet innstilt slik at de tre ventilene til sammen skulle levere 276,3 l/s. Denne verdien er basert på kravene som er beskrevet i Kapittel 4.1. Luftmengden ble fordelt likt på de tre ventilene slik at hver av dem skulle levere 92,1 l/s. Innreguleringen ble gjort ved hjelp av den oppgitte K-verdien for ventilen. I følge Ligning 5.1, oppnår man de ønskede luftmengdene når innreguleringstrykket er 11,06 Pa.

6.4 Modell 1

Øvre delen av frontplaten til Sinus-BS-200 består av seks rekker med 61 små runde hull i hver. Åpningene i den øverste rekken har en diameter på 2 mm, og størrelsen øker med 1 mm for hver neste rekke. Denne delen av ventilen ble innført i AirPak som en tynn perforert ventil (i størrelse 69 x 7 cm) med 55 % fritt tverrsnitt. Under denne perforeringen er det fire rekker med dyser, se Figur 5-2. Øverst er det 15 dyser, og det er én mindre for hver rekke nedover. Dysene har en noe spesiell form, se Figur 6-2. De er runde med en diameter på 35 mm, men åpningen er begrenset av to små flater som retter strålen i en 18 ° vinkel. Hver dyse kan dreies 360 ° rundt. For å forenkle simuleringen er alle blitt snudd slik at de blåser luften i samme retning; oppover i en 18 ° vinkel med veggen.

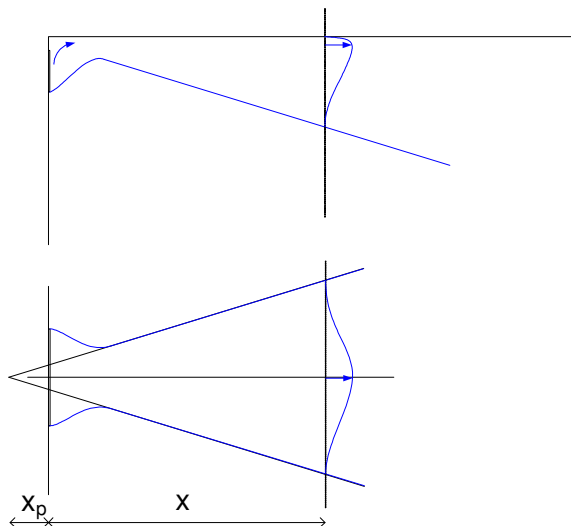


Figur 6-2: En dyse fra Sinus-BR-200

I CFD modellen ble dyserekkene fremstilt som åpninger med en høyde på 18 mm, mens lufthastigheten ut i fra dem fikk en verdi i y- og z-retning, for å beskrive størrelsen og retningen på luftstrømmen ut i fra dysene (ventilen var plassert i x-y planet). Problemet med denne modellen var imidlertid å bestemme riktig lufthastighet ut gjennom hver åpning, og dermed også fordelingen til mengden luft som skulle tilføres rommet. Dermed ble denne løsningen forkastet.

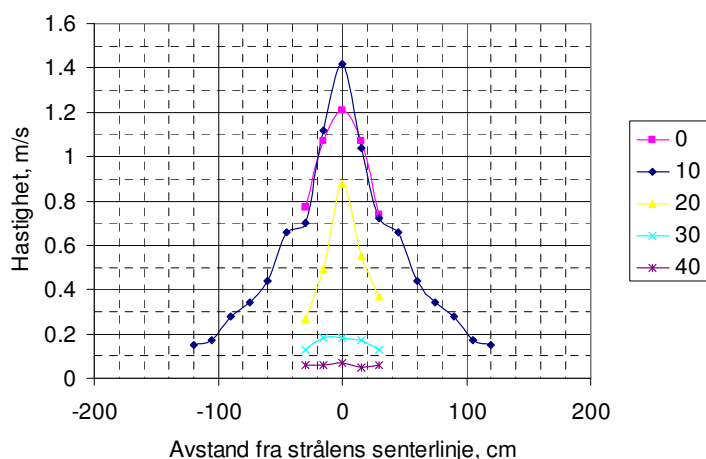
6.5 Modell 2

Det ble foretatt en røyktest i laboratoriet for å få et bilde av strålens form og spredning. Den prinsipielle skissen av luftstrålen er tatt med i Figur 6-3.



Figur 6-3: Prinsipiell fremstilling av luftstrålen sett fra siden (øverst), og sett ovenfra (nederst) (Mathisen, 2007)

På bakgrunn av dette ble det avgjort at tilluftsventilen i stedet skulle modelleres som en kvadratisk åpning med en viss overflate og en bestemt hastighet normalt ut av ventilen og inn i rommet. For å kunne bestemme de nødvendige dimensjonene og verdiene ble det foretatt målinger av lufthastighetene i testrommet. Dette ble gjort ved hjelp av VelociCalc Plus (se Kapittel 9.1 for nærmere beskrivelse av instrumentet). Dataene er registrert i til sammen 61 punkter i avstand 1 og 2 m fra midtre tilluftsventil og i forskjellige høyder og avstander fra strålens senterlinje. Resultatene er samlet i Tabeller V2-1, V2-2 og V2-3, se Vedlegg 2.



Figur 6-4: Lufthastighet i strålen 2 m unna ventilen i ulike avstander fra taket (fargen på grafen angir avstanden) (Mathisen, 2007)

Ut i fra målingene som ble foretatt 2 m fra tilluftsventilen (se grafisk fremstilling av verdiene i Figur 6-4) ble det gjort beregninger med utgangspunkt i Ligningene 6.2 og 6.3, på neste side.

$$b = C_b (x + x_p) \quad (6.2)$$

$$\frac{u_m}{u_0} = \sqrt{\frac{\rho_0}{\rho_r}} \frac{1,54}{C_b} \frac{\sqrt{A_0}}{x + x_p} \sqrt{\frac{i}{\varepsilon}} \quad (6.3)$$

Hvor b representerer strålens halve bredde, C_b turbulenskonstanten, x avstanden fra ventilen, x_p polavstanden, u hastighet i sentrum (merket m) og innløpet beregnet ut fra lysåpningen (merket 0), ρ er lufttettheten inn (merket 0) og utenfor strålen (merket r). Videre er A_0 overflaten til tilluftsåpningen, i impulsfaktoren og ε kontraksjonskoeffisienten.

Ligning 6.2 gjelder når tetthetsforskjellen mellom luften inn og utenfor strålen er liten, og strømmingen er inkompressibel. Siden man kan regne med inkompressibel strømming for hastigheter under 50 m/s (Skåret, 1986), kan Ligning 6.3 som brukes til å regne ut senterhastigheten (u_m) for runde aksielle stråler, skrives som Ligning 6.4:

$$u_m = u_0 \frac{1,54}{C_b} \frac{\sqrt{A_0}}{x + x_p} \sqrt{\frac{i}{\varepsilon}} \quad (6.4)$$

Ettersom ventilen skal plasseres rett under taket, vil strålen klebe til taket pga Coandaeffekten. For å ta hensyn til denne effekten må A_0 multipliseres med 2 (Skåret, 1986).

Det forutsettes at strålebredden og senterhastigheten i modellen skal være lik de virkelige verdiene som ble målt i laboratoriet 2 m fra ventilen. Videre kan man anta at modellen vil ha en ideell tapsfri innstrømming slik at både i og ε kan settes lik 1. Dermed får man Ligning 6.5.

$$u'_m = u_m = u_0' 1,54 \frac{\sqrt{2A_0'}}{b} \quad (6.5)$$

Hvilket kan skrives som:

$$u_0' \sqrt{2A_0'} = u_m \frac{b}{1,54} \quad (6.6)$$

Størrelser som er merket med " ' " gjelder for modellen, mens de som ikke er merket angir verdier som er målt i virkeligheten. Ved hjelp av sammenhengen mellom strømningshastighet gjennom en åpning og volumstrømmen gjennom i i Ligning 6.7, kan man skrive om Ligning 6.6 og få Ligning 6.8.

$$u_0' = \dot{V}_0 / A_0' \quad (6.7)$$

$$A_0' = 2 \left(\frac{\dot{V}_0}{u_m \frac{b}{1,54}} \right)^2 \quad (6.8)$$

Ved hjelp av Ligning 6.7 og 6.8 kan man da regne ut hvilken innløpshastighet og overflate den modellerte ventilen bør ha. Størrelsen b kan man finne ut i fra de foretatte målingene, ved hjelp av $y_{0,5}$ som angir den avstanden fra strålens senterlinje hvor hastigheten har sunket til halvparten av hastigheten i senteret av strålen. $y_{0,5}$ kan leses ut fra Figur 6-4.

Videre har man at:

$$y_{0,5} = C_{0,5}(x + x_p) \quad (6.9)$$

Og $C_b = 2,35 C_{0,5}$ (Skåret, 1986), hvilket medfører at $b = 2,35 y_{0,5}$.

Ved å løse ligningssettet som består av Ligning 6.7 og 6.8 finner man at innløpshastigheten til ventilen i modellen bør være 2,3 m/s, mens overflaten bør være 0,04 m².

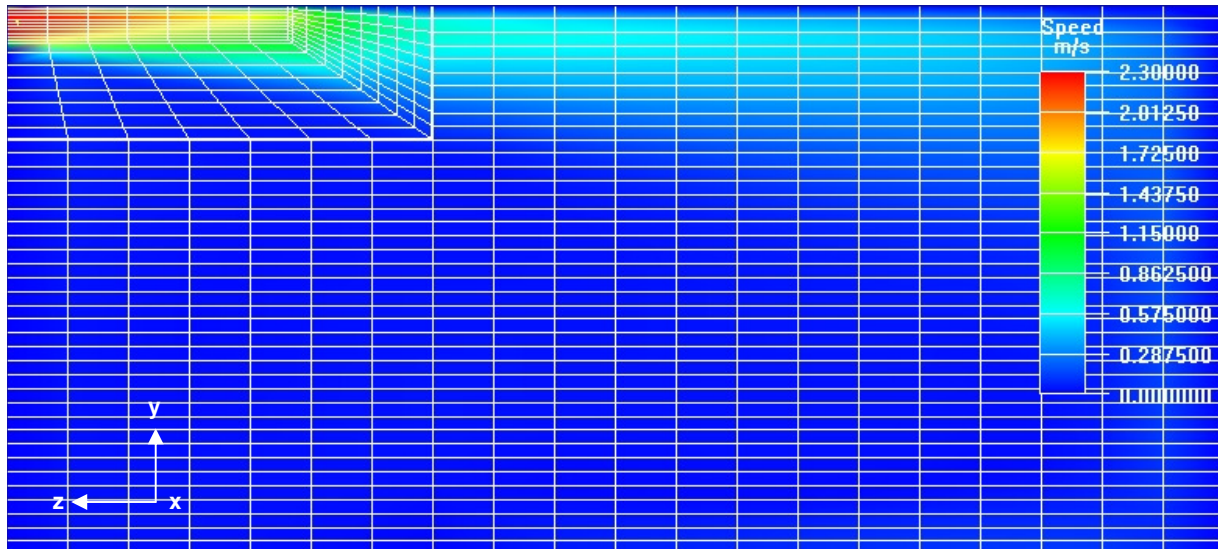
Tilluftsventilen ble dermed tegnet i AirPak som en kvadratisk åpning med sidelengdene på 20 cm, og en hastighet normalt ut av ventilen på 2,3 m/s.

6.5.1 Simulering av Modell 2

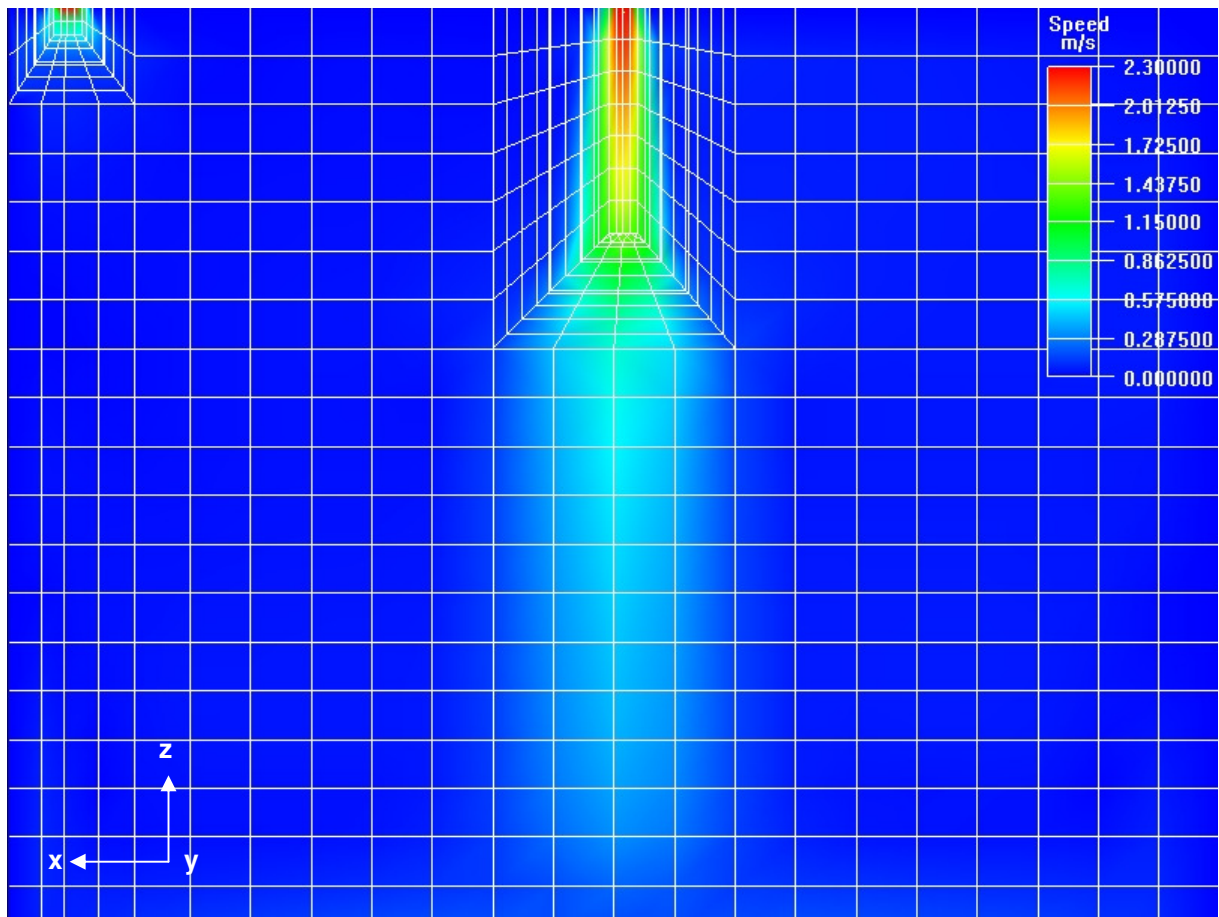
I AirPak ble Modell 2 plassert i et rom med samme størrelse som testrommet har i virkeligheten. Veggene ble ikke tegnet opp, kun romdimensjonene ble definert.

Tilluftsventilen ble tegnet oppunder taket slik at dens sentrum tilsvarte senterpunktet for den midtre ventilen i laboratoriet. Det ble også laget en avtrekksventil som fikk form av en åpning med samme størrelse som tilluftsventilen. Luften fikk en hastighet på 2,3 m/s rett inn i denne og ut av rommet. Avtrekket ble plassert oppunder taket, i et hjørne av den samme veggen hvor tilluftsventilen ble tegnet.

Det ble så definert et beregningsnett for modellen. AirPak kan generere to typer nett: kubisk eller tetraedrisk. Kubisk nett ble valgt, da tetraedrisk nett er anbefalt å bruke kun dersom modellen inneholder kompliserte geometriske former (Fluent Inc., 2002). Videre kan man med AirPak generere et nett som består av et minimum antall noder som egner seg for den gitte løsningen. Ved å undersøke denne kan man få et bilde om hvor nettet bør forfines og gjøres tettere for å få en mer nøyaktig løsning. Så kan man la programmet generere et finere nett ved hjelp av standardinnstillinger som allerede er definert i AirPak. Dette gav imidlertid ikke et bra nok resultat for denne modellen. Derfor ble nettet ytterligere forfinet i området rundt tilluftsventilen. Resultatet kan man se i Figur 6-5 og 6-6.



Figur 6-5: Resultat med forfinet beregningsnett rundt tilluftsventilen, sett fra siden, på et plan som skjærer ventilen på midten (ventilen befinner seg øverst i venstre hjørnet), $y = 3,25$ m, $z = 7,03$ m



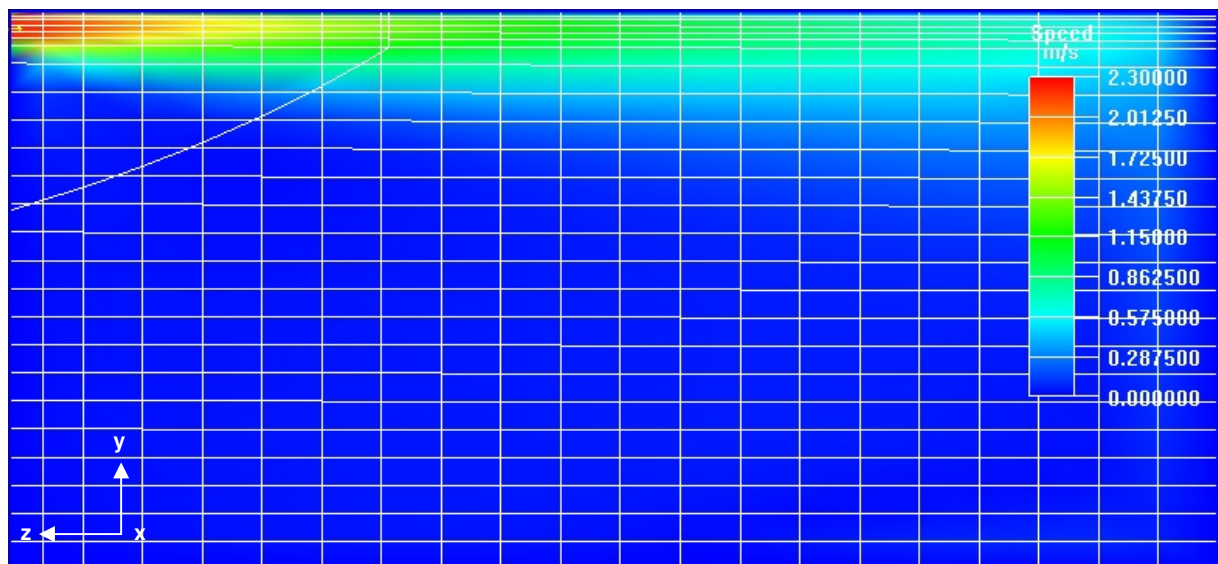
Figur 6-6: Resultat med forfinet beregningsnett rundt tilluftsventilen, sett ovenfra, på et plan som skjærer ventilen på midten (ventilen befinner seg øverst, midt på bildet, øverst i venstre hjørne kan man skimte avtrekket), $x = 8,73$ m, $z = 7,03$ m

Figurene viser at størrelsen på hastighetene i midten av strålen er litt mindre enn, men tilnærmet lik de målte verdiene, mens spredningen på strålen er mye bredere i virkeligheten.

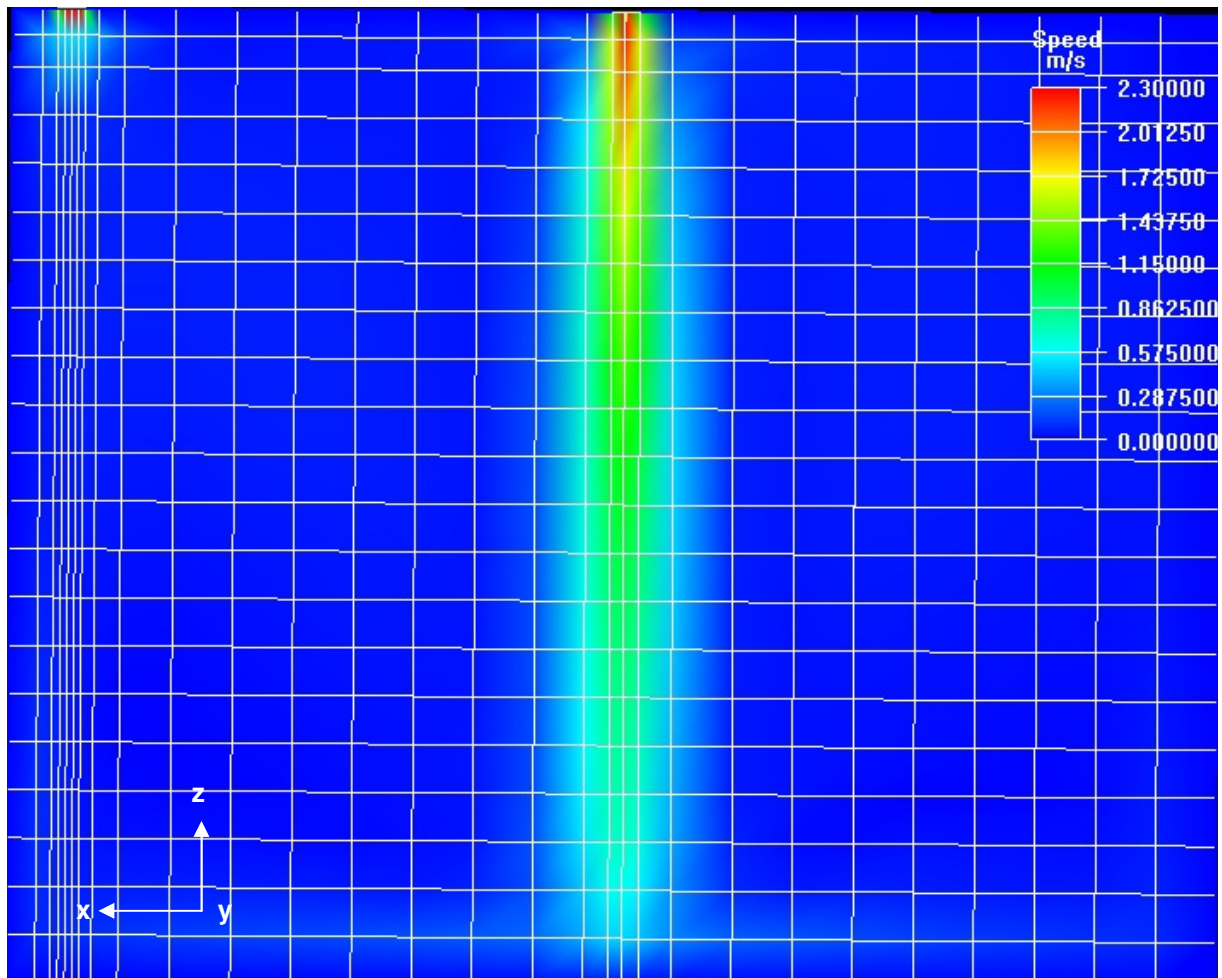
Dessuten kan man på bakgrunn av røyktesten som ble foretatt i laboratoriet også hevde at kastelengden er litt for kort.

I Figur 6-5 kan man se at strålen i modellen vil følge beregningsnettet i overgangen mellom det spesifikke beregningsnettet for ventilen og nettet for resten av rommet. Dette tyder på at beregningsnettet som er blitt brukt er for grovt. Med et passende nett ville strålen ha vært uavhengig av nettets struktur.

I et forsøk på å forbedre dette problemet ble overgangsnettet mellom ventilområdet og resten av rommet fjernet ("No O-grids" funksjonen ble slått på). Resultatene er vist i Figur 6-7 og 6-8.



Figur 6-7: Resultater med "No O-grids" funksjon, sett fra samme perspektiv som Figur 6-5



Figur 6-8: Resultater med "No O-grids" funksjon, sett fra samme perspektiv som Figur 6-6

Figurene viser at strålen har fått lengre kastelengde, men spredningen har ikke forbedret seg. Strålens bredde er fremdeles større i virkeligheten. Størrelsen av hastigheten i sentrum av strålen har sunket ytterligere i forhold til de som er blitt målt. Dette beregningsnettet ble også forkastet, fordi resultatene lignet altfor lite på observasjonene og målingene fra laboratoriet.

Siden det ikke lyktes å forfine nettet rundt tilluftsventilen ytterligere, ble det gjort en del forsøk med å legge inn diverse objekter i nærheten av ventilen. Ideen var at ved å forfine nettet rundt disse objektene ville man også få et finere nett rundt selve ventilen. Flere varianter ble nå undersøkt i forsøk på å finne et beregningsnett som gav resultater som samsvarte med målingene. Det ble forsøkt å legge inn en vegg bak tilluftsventilen. Veggens høyde og bredde ble satt slik at de gjenspeilet høyden og bredden på luftstrålen observert i laboratoriet. Så ble det lagt inn et objekt som skulle forestille en lampe som i testrommet ligger ca 1 m fra selve ventilen, 35 cm under taket. Til slutt ble det også tegnet inn en vegg i taket

med samme bredde som den observerte spredningen til luftstrålen i laboratoriet. Denne veggen var i z-retning like lang som rommet.

Ved å gjøre objektene aktive eller inaktive (vise eller skjule dem i modellen), ble flere forskjellige kombinasjoner testet. Underveis ble det jevnlig konferert med personell fra Instituttet for energi- og prosesseteknikk ved NTNU og SINTEF Energiforskning som har erfaring med AirPak. Nettet ble stadig gjort finere, uten at det førte med seg tilfredsstillende resultater. Etter hvert ble det nødvendig å oppgradere datamaskinenes arbeidsminne for å kunne forfine nettet ytterligere.

Det ble også forsøkt å redusere rommet ved å kutte bort de delene hvor strømmingen ikke ble målt. I det siste forsøket ble rommet redusert med nesten 41 m². Veggen bak ventilen og i taket, ble brukt til å få et fint nett rundt strålen. Beregningsnettet ble definert til å inneholde 1 546 795 noder til sammen, og er det tetteste nettet som ble testet i forbindelse med denne oppgaven. Imidlertid var dette også det alternativet som gav de mest usannsynlige resultatene. Lufthastigheten innenfor rommet varierte mellom 0 og 38 000 m/s noe som er umulig å oppnå i et 20 m² stort rom hvor luften tilføres med en hastighet på 2,3 m/s. Til sammenligning har en orkanvind en hastighet fra 32,6 m/s og oppover (Meteorologisk Institutt, 2006). Verdiene ga tydelig inntrykk av at det var noe som var feil enten med selve beregningsprogrammet, eller anvendelsen av dette på denne typen strømningsproblem.

På grunn av tidsrammen for denne oppgaven ble det besluttet å avslutte alle simuleringer av rommet med AirPak. Man kunne ikke fortsette å simulere uten en tilfredsstillende modell for tiluftsventilen, og det var ikke tid nok til å gjennomføre flere forbedringer av modellen.

All videre forskning som er gjennomført i forbindelse med denne oppgaven er derfor basert på forsøk og målinger i laboratoriet.

7 Tilrettelegging av testrommet

Før man kunne foreta målinger måtte testrommet klargjøres for forsøk. Mengden tilført luft som ble stilt inn i forbindelse med målingene som ble gjort da tilluftsventilen ble forsøkt simulert i AirPak, viste seg å være altfor høy. Dette ble oppdaget ved å lese av den målte verdien av trykket over et bend i tilluftskanalen. Sammenhengen mellom denne verdien og tilført luftmengde er tidligere blitt funnet i forbindelse med forsøk gjort med det samme ventilasjonssystemet. Den baserer seg på en serie målinger som da ble foretatt. Grunnen til at luftmengdene ikke stemte ved bruk av kalibreringsmetoden med hjelp av K-verdien kan være at ventilene i virkeligheten har en annen K-verdi enn den som er blitt oppgitt. Siden tilluftsventilene blir masseprodusert kan det tenkes at K-verdien vil variere litt fra ventil til ventil av samme modell.

Luftmengdene ble stilt inn på nytt ved å måle trykket over bendet i tilluftskanalen. Avtrekksventilene ble stilt inn slik at trykkdifferansen mellom utenfor og inne i testrommet var null, dvs. slik at man trakk ut den samme mengde luft som var blitt tilført rommet. Videre måtte forurensningskilder settes på plass.

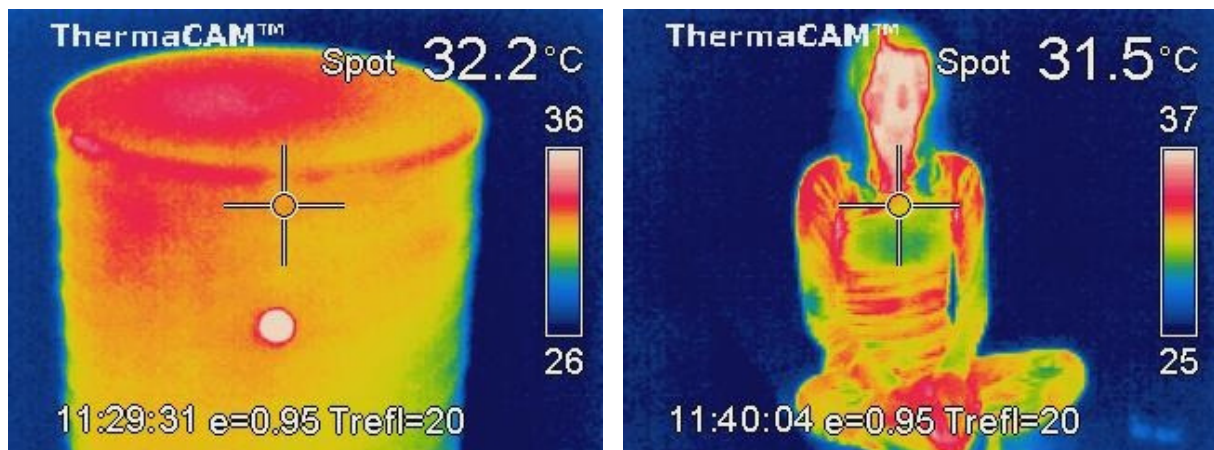
7.1 Barn

For å modellere barn ble det brukt 1 m lange, malte spiralfalsete rør i 0,9 mm tjukt galvanisert stål, med en diameter på 0,4 m. Rørene ble løftet 0,3 m opp fra gulvet ved hjelp av metallbein, se Figur 7-1.



Figur 7-1: Modell av et barn

Hvert rør er dekket med et lokk i samme materialet, både øverst og nederst. Inni er det plassert én lyspære på 75 W som skal representere varmeavgivelse fra et barn i sittende skoleaktivitet. Denne verdien er basert på at et menneske avgir 70 W/m^2 kroppsoverflate ved stillesittende arbeid (Norsk Standard, 2004). Lyspæren er satt inn i et mindre (0,37 m langt) spiralfalset, umalt rør med en diameter på 0,16 m. Dette for at den avgitte varmen til omgivelsene fra hele sylindren skal være mer uniformt fordelt og ikke bare konsentrert i det punktet hvor lyspæren befinner seg. Figur 7-2 viser overflatetemperaturen til en barnmodell sammenlignet med overflatetemperaturen til et stillesittende menneske, i samme omgivelser. Bildene ble tatt ved hjelp av et termografisk kamera. Variasjonsintervallene for overflatetemperaturene er relativt like på begge bilder.



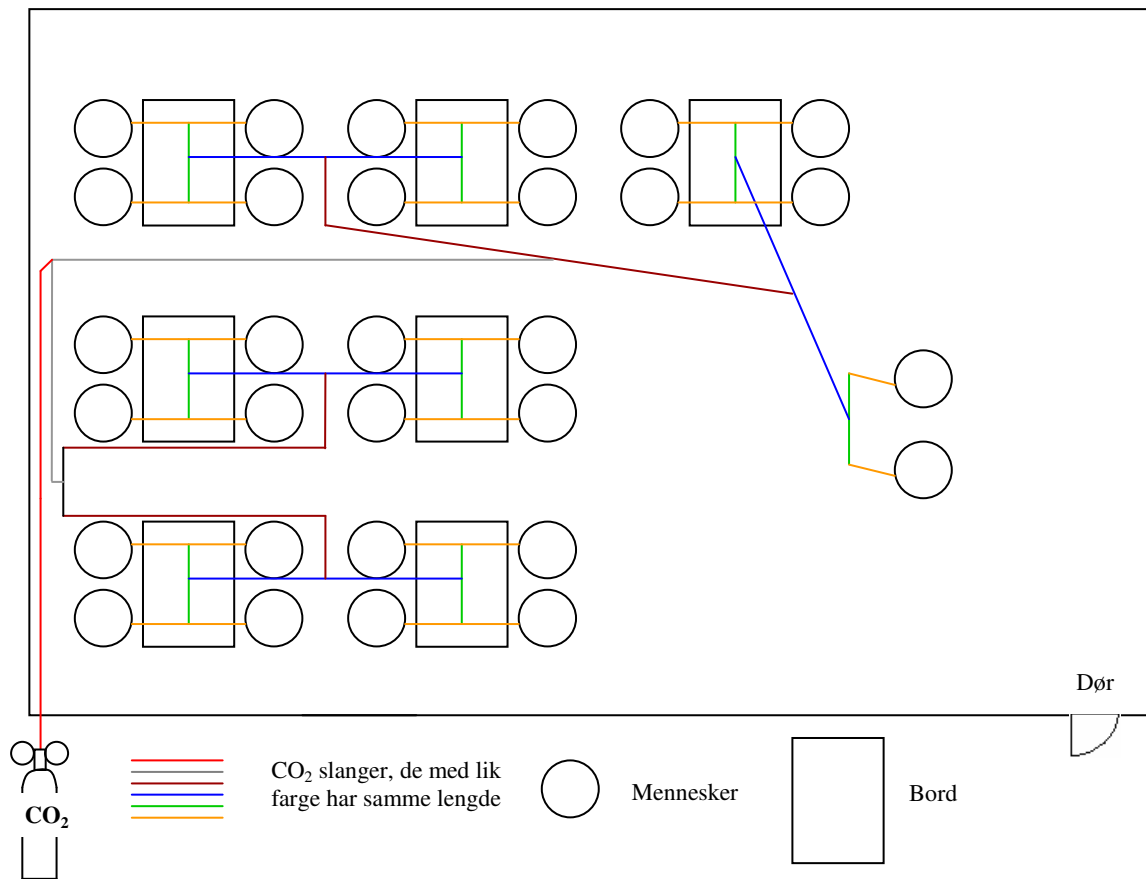
Figur 7-2: Termografisk bilde av barnmodellen (til venstre), sammenlignet med bildet av en person (til høyre)

I tillegg til varmeavgivelse måtte man finne en måte å simulere pustefunksjonen også, eller rettere sagt utpust med CO₂ avgivelse. I følge Mysen (2005b) kan man regne med at et barn i lett aktivitet produserer 15 l/h CO₂. Dette utgjør ca 4 % av den totale luftmengden de puster ut (Brunk, 2006). Med andre ord skulle man få en luftstrøm på 0,375 m³/h fra hver enkel sylinder. For å få til dette ble det besluttet å bore hull i sylindrene. Først ble det boret fire hull med forskjellige diametre i en av sylindrene. Hullene ble laget ca 13 cm under lokket på toppen. Så ble lufthastigheten ut fra hvert enkelt hull målt, mens de andre var lukket igjen med tape. Ved hjelp av sammenhengen:

$$\dot{V} = A \cdot v \quad (7.1)$$

Som sier at volumstrømmen gjennom en flate er lik arealet til flaten ganget med strømningshastigheten, kunne man så finne volumstrømmen gjennom hver enkel åpning. Det største hullet som hadde en diameter på 22 mm, gav det mest tilfredsstillende resultatet selv om luftmengden var kun en tredjedel av den ønskede. Derfor ble det besluttet å bore et hull også i bunnen av sylindren for å øke den konvektive luftstrømmen gjennom det spiralfalsete røret. Med et hull med diameter på 29 mm, midt på bunnen fikk man det ønskede resultatet.

CO₂ gassen ble så fordelt fra en gassflaske ved hjelp av plastslanger, frem til hvert enkelt barn. Den totale tilførselen til rommet ble regnet ut til å være 7,5 l/min (15 l/h per barn, for 30 stykker). Kabelføringen ble laget symmetrisk, og grenene fikk samme lengde for å sikre at det ble tilført like mye gass gjennom hvert sluttstykke. På grunn av symmetrien ble det laget 32 sluttstykker i gassfordelingsnettet og ikke 30. Dette førte til at det kom 14,06 l/h (og ikke 15 l/h) ut i fra hver slange. De to ekstra endene ble ført inn i de to sylindere som står lengst til høyre i Figur 7-3, slik at de fikk to i stedet for én slange hver. På denne måten ble det samlede utslipp samme som fra 30 barn, bare at den ikke kom fra 30 like punktkilder. Denne oppstillingen ble godtatt siden det samlede utslippet var likt. Dessuten vil i virkeligheten produksjonen av CO₂ uansett variere fra menneske til menneske, avhengig av deres kroppsstørrelse, aktivitetsgrad og kosthold.



Figur 7-3: Prinsipiell skisse av CO₂ kabelføringen i testrommet

Figur 7-3 viser en prinsipiell fremstilling av kabelføringen. Slangene som har samme farge er i virkeligheten like lange. De som er tegnet inn med oransje, er sluttstykkene som fører gassen inn i barnmodellene. Slangene ble ført inni sylindrene gjennom det samme hullet som kablen til lyspæren. Deretter ble de snurret tre ganger rundt den innerste sylindren. Gassen ble til slutt sluppet ut rett over lyspæren, slik som vist i Figur 7-4. Dette ble gjort for å varme opp CO₂ gassen tilstrekkelig så den stiger med konveksjonsstrømmene og ut av ”pustehullet”. CO₂ har nemlig større atomvekt enn luft og vil, dersom den ikke blir oppvarmet, synke i luft ved samme temperatur. Luften som menneskene puster ut er også varm, ca 36,6 °C (Jurelionis, 2006).



Figur 7-4: Modell av et barn innenfra. Bildet viser den indre sylindren med en lyspære inni, samt den blåe kabelen for CO₂ tilførsel

7.2 Tilførsel av gassen

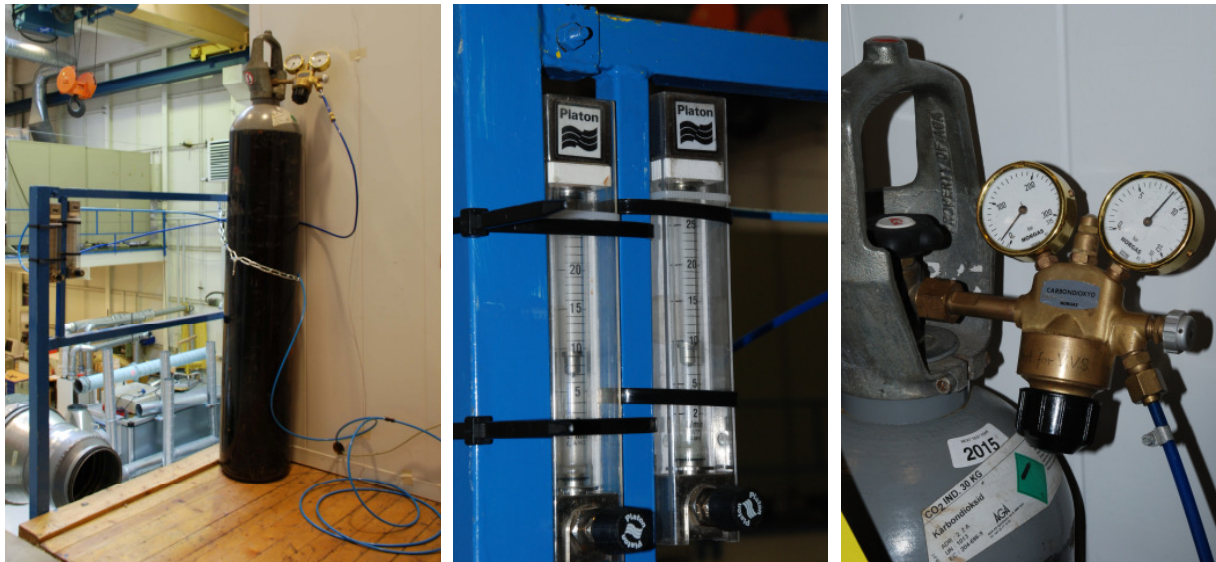
Gassflasken ble koblet til en reguleringsventil, hvis oppgave er å redusere trykket fra flasken til et mer sikkert og stabilt trykk ved brukerstedet. Reguleringsventilen ble igjen koblet til et rotameter ved hjelp av hvilket man kan regulere mengden gass som kommer ut av flasken. Rotametrene har forskjellig skalering alt ettersom hva slags gasstrøm de er tiltenkt brukt for. Siden det ikke lyktes å få tak i et rotameter for CO₂, ble det brukt en som viser luftstrøm. For å kunne tilføre ønsket mengde CO₂ ble omregningsformelen i Ligning 7.2 brukt.

$$\text{\textit{ønsket mengde gass}} = \frac{\text{\textit{avlest mengde gass}} \cdot \text{\textit{faktor for tilført gass}}}{\text{\textit{faktor for gassen rotameteret er blitt kalibrert for}}} \quad (7.2)$$

0,773 ble brukt som faktor for CO₂, 0,998 for luft. Både formelen og faktorene er hentet fra Installation and Operation Manual, fra Brooks Instrument (2000). Ved innsetting får man at rotameteret skal vise 9,7 l/min, når man ønsker å få tilført 7,5 l/min CO₂.

I begynnelsen var det problematisk å få stabil tilførsel av ønsket mengde CO₂. Det ble observert at reguleringsventilen frøs etter kort tid slik at gassen ikke kunne strømme jevnt gjennom. Trykkdifferansen mellom inngangstrykket og utgangstrykket på ventilen måtte senkes. Ved prøving og feiling ble det funnet frem til at utgangstrykket fra reguleringsventilen måtte være omtrent 9 bar for å sikre en relativ jevn og stabil gasstilførsel. Å øke

utgangstrykket ytterligere og dermed minke forskjellen mellom inngangs- og utgangstrykket på ventilen var ikke aktuelt siden koblingen mellom reguleringsventilen og gasslangen tåler en maksimaltrykk på 10 bar (Bustadmo, 2007). En ekstra rotameter ble satt inn mellom avlesningsrotameteret og reguleringsventilen for å redusere trykket litt mer før gassfordelingsnettets. Figur 7-5 viser anordningen.



Figur 7-5: Gasstilførsel. I midten ser man et forstørret bilde av de to rotametrene hvorav den til venstre brukes til avlesning av gassmengde. Lengst til høyre er et forstørret bilde av reguleringsventilen

Under gjennomføring av forsøk ble reguleringsventilen i tillegg varmet opp med jevne mellomrom ved hjelp av en varmluftspistol, for å unngå frysing.

8 Målemetode

Ventilasjonsluften som blir tilført kan enten kjøles ned eller varmes opp før den slippes inn i rommet. I testrommet ble dette tidligere styrt ved å sette en verdi for ønsket tilluftstemperatur. Før forsøkene ble satt i gang ble sensoren som registrerte tilluftstemperaturen satt over i avtrekkskanalen for å gjøre det enklere å kontrollere romtemperaturen.

Temperaturene på forskjellige steder i rommet ble overvåket ved hjelp av termoelementer som var koblet til en datalogger. For oversikt over målepunktene se Vedlegg 3. Det ble registrert at romtemperaturen alltid var en grad høyere enn temperaturen målt i avtrekket.

To ulike tilstander ble testet. En representerer sommer og den andre vinter.

8.1 Sommer

Muligheten til å simulere solinnstråling ved hjelp av gulvvarme ble ikke benyttet, slik at den undersøkte tilstanden tilsvarer en overskyet, varm sommerdag. De eneste varmekildene i rommet var barna og belysningen. Temperaturene i rommet og laboratoriet utenfor ble forsøkt holdt mest mulig lik for å hindre at varmestrømmene mellom disse rom skulle påvirke resultatene. I begynnelsen var det problemer med å oppnå dette. Temperaturen i testrommet viste seg alltid å være 3 grader høyere enn den ble satt til å være. Etter en stund ble det oppdaget at dette skyldes feilkobling i temperaturføleren som ble brukt til å styre temperaturen på avtrekksluften. Feilen ble rettet opp av fagfolk og med riktig tilkobling ble denne forskjellen redusert til å være $\pm 0,5$ grader (Bakken, 2007).

8.2 Vinter

Vintertilstanden ble modellert ved å kjøle ned den veggen i testrommet som representerer ytterveggen. For å finne en plausibel vinterdag i Trondheim ble klimadata undersøkt. Tabell 8-1 viser gjennomsnittsverdier for utetemperaturer for hver måned og årsmiddeltemperaturen for Trondheim, beregnet over en 30-årsperiode fra 1961 til 1990.

Tabell 8-1: Gjennomsnittlige verdier av utetemperaturer, samt årsmiddeltemperaturen beregnet for Trondheim i tredveårsperioden 1961-1990. Alle temperaturer er angitt i °C (Meteorologisk Institutt, 2007)

Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Des	Årsmiddeltemperatur
-2,9	-2,3	0,5	3,9	9,4	12,6	13,8	13,3	9,4	6,0	1,0	-1,3	5,3

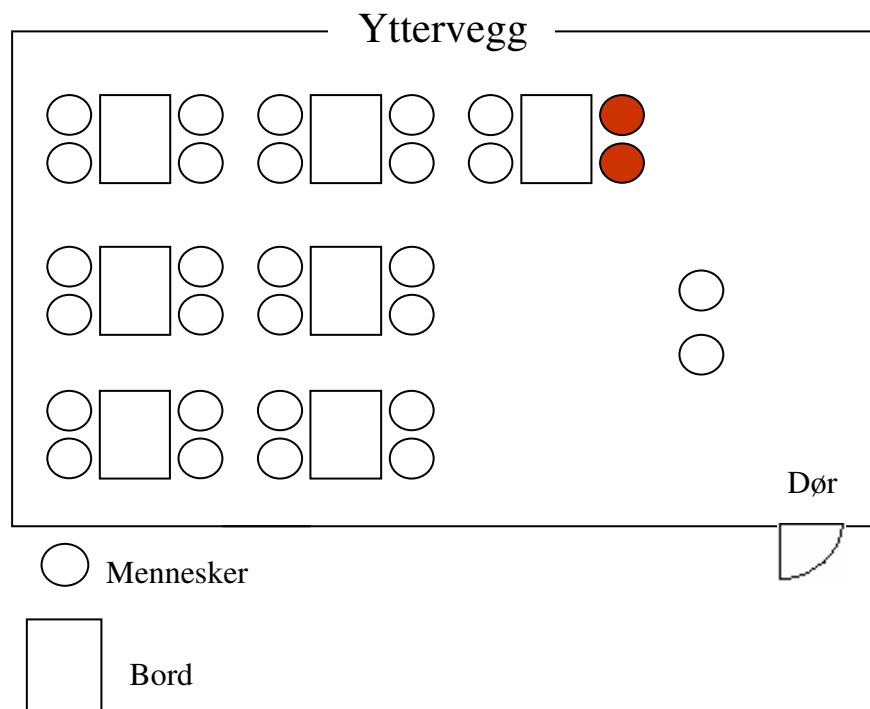
Dataene er hentet fra hjemmesidene til Meteorologisk Institutt. I Byggforsk serien, Blad 451.021, er det oppgitt en årsmiddeltemperatur på 4,5 °C for Trondheim og en dimensjonerende utetemperatur (dvs. den laveste gjennomsnittlige lufttemperaturen over tre døgn, i løpet av en tredveårsperiode) på -22,2 °C (Kvande, Lisø og Hygen, 2006).

I følge Blom (2000), er den optimale operative temperaturen for et klasserom $22,0 \pm 2,0$ °C om vinteren.

Alle dataene tatt i betraktning ble det derfor besluttet å stille inn romtemperaturen på 22 grader (avtrekkstemperaturen ble satt til å være 21 °C) og temperaturen utenfor ytterveggen på 5 grader. Kjøleanlegget som sørger for simulering av utetemperaturen har automatisk avriming, slik at den slår seg av og på med jevne mellomrom. Dette gjør at den innstilte temperaturen varierer med ca ± 1 °C.

Innstillingene førte imidlertid til at tilluftstemperaturen sank helt ned til 9,5 °C. Dermed fikk man en forskjell til romtemperaturen på hele 12,5 grader. Det store avviket, som tyder på at det er behov for ekstra kjøling i rommet, skyldes delvis varmeproduksjonen i rommet og delvis varmeovergangen fra resten av laboratoriet utenfor, hvor temperaturen er noen grader høyere (25 °C). For å unngå denne varmeovergangen ble det derfor besluttet å øke temperaturen i testrommet. Temperaturen utenfor ytterveggen ble økt med tilsvarende antall grader for at varmestrømmen til uteomgivelsene skulle forbli den samme. Men selv med disse justeringene viste tilluftstemperaturen seg å være 8,6 grader lavere. I følge produsenten av tilluftsventilene kan disse tilføre luft som er opptil 10 grader kaldere enn romluften uten å skape trekkproblemer (Systemair, 2007a). Likevel ble det foretatt en røyktest i rommet for å undersøke trekkeffekter. Luftstrømmen så ut til å bevege seg mot hjørnet ved ytterveggen, rett overfor inngangsdøren, før den falt ned med høy hastighet. Grunnen kan være at det er plassert svært få varmekilder som kan motvirke det bråe nedfallet av kald luft i dette området av rommet. Effekten forsterkes også fra de kalde vinduene. Trekket påvirket kun to av barna, de som er markert rødt i Figur 8-1. De to som står lengst til høyre i Figur 8-1, ble ikke

påvirket i like stor grad. Grunnen til dette kan være at strømmingen fra tilluftsventilen rett over døren motvirket noe av strømmingen som kom inn fra venstre.



Figur 8-1: Bildet viser en prinsipiell skisse av testrommet. De to barna som er utsatt for trekk under vintertilstanden er farget rødt

Det ble også foretatt målinger av lufthastigheter rundt de to utsatte barna ved hjelp av VelociCalc Plus, som viste at hastighetene her varierte mellom 0,2 og 0,5 m/s. I følge Blom (2000), bør lufthastighetene i oppholdssonen i et klasserom om vinteren ikke overstige 0,18 m/s.

En måte å øke tilluftstemperaturen på og likevel beholde samme romtemperatur er å minke temperaturen utenfor ytterveggen. Det ble derfor undersøkt hva som skjedde når utetemperaturen ble senket til 0, -10 og -20 °C. -20 grader ble imidlertid ikke oppnådd, kun -18 pga store varmetap fra testrommet gjennom ytterveggen. Ettersom ytterveggen og de fire vinduene i testrommet har svært dårlig isolasjonsevne og svært høy U-verdi (se Kapittel 6.2 for veggens oppbygning og varmekonduktivitet), ble det til sammenligning tatt med hvilke temperaturer det samme varmetapet ville tilsvare for vegger og vinduer laget i henhold til Teknisk forskrift fra 1997 (TEK '97) (Byggforsk Kunnskapssystemer, 1997d) og Teknisk forskrift fra 2007 (TEK '07) (BE, 2007b). Tabell 8-2 viser en oversikt over U-verdiene, mens Tabellene 8-3 til 8-6 viser resultatene.

Tabell 8-2: Oversikt over U-verdier for yttervegg og vinduer

U-verdi	På testrommet	TEK '97	TEK '07
Yttervegg	0,35	0,22	0,18
Vindu	2,7	1,6	1,2

U-verdiene for testrommets vinduer er de samme som i Kapittel 6.2, U-verdien for ytterveggen ble beregnet ved hjelp av veggens varmekonduktivitet (se Kapittel 6.2) og Ligning 8.1.

$$U = \frac{1}{R_{si} + \frac{l}{k} + R_{se}} + \Delta U \quad (8.1)$$

Hvor R_{si} og R_{se} henholdsvis representerer innvendig og utvendig varmeovergangstall, l er den samlede tykkelsen av veggen, k den gjennomsnittlige varmekonduktiviteten for alle sjikt og ΔU et korreksjonsledd for arbeidsutførelse som kan settes til $0,015 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Norsk Standard, 1987).

Tabell 8-3: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C

Temperatur	Testrommet	I virkeligheten	TEK '97	TEK '07	Temperaturdifferanse mellom romtemperaturen og tilluftstemperaturen
I rommet	25	22	22	22	8,6
Ute	8	5	-6,3	-14,9	

Tabell 8-4: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C

Temperatur	Testrommet	I virkeligheten	TEK '97	TEK '07	Temperaturdifferanse mellom romtemperaturen og tilluftstemperaturen
I rommet	25	22	22	22	7,5
Ute	0	-3	-19,6	-32,3	

Tabell 8-5: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C

Temperatur	Testrommet	I virkeligheten	TEK '97	TEK '07	Temperaturdifferanse mellom romtemperaturen og tilluftstemperaturen
I rommet	25	22	22	22	7
Ute	-10	-13	-36,2	-54	

Tabell 8-6: Tabellen viser temperaturforskjellene ved nedkjøling både for testrommet og hvilke temperaturnivå det samme varmetapet ville tilsvare dersom man overholdt krav til U-verdier i TEK '97 og TEK '07. Alle temperaturer er angitt i °C

Temperatur	Testrommet	I virkeligheten	TEK '97	TEK '07	Temperaturdifferanse mellom romtemperaturen og tilluftstemperaturen
I rommet	25	22	22	22	5,7
Ute	-18	-21	-49,6	-71,4	

Temperaturdifferanser for TEK '97 og TEK '07 ble beregnet ved å finne temperaturdifferanser som ville ha ført til samme varmetap som i testrommet. Til dette ble Ligning 8.2 benyttet.

$$Q_{\text{varmetap}} = (A \cdot U \cdot \Delta T)_{\text{vindu}} + (A \cdot U \cdot \Delta T)_{\text{vegg}} \quad (8.2)$$

A står for overflatearealene til henholdsvis vinduer og veggen, U for U-verdiene og ΔT for forskjellen mellom inne og utetemperaturen.

Ved å betrakte kolonnene lengst til høyre i Tabellene 8-3 til 8-6 ser man at differansen mellom tilluftstemperaturen og romtemperaturen synker sakte. Den endrer seg med ca 3 grader, selv om utetemperaturen blir senket 26 grader. Dette tilsier at man har behov for ekstra kjøling selv om utetemperaturene synker under det nivået som er sannsynlig for Trondheim for å unngå store differanser mellom romtemperatur og tilluftstemperatur som kan føre til trekk i oppholdssonen. Tilstandene i Tabell 8-5 og 8-6 angir en utetemperatur som er betydelig lavere enn den dimensjonerende utetemperaturen for Trondheim for alle skoler som er blitt bygget eller for de som har fått fasaden rehabilitert siden 1997.

Det ble besluttet å velge tilstanden i Tabell 8-3, som gjeldende vintertilstand for gjennomføring av forsøk (selv om tilstanden i Tabell 8-4 også ville vært plausibel for en

veldig kald dag). Grunnen til det er luftstrømningen i rommet allerede er blitt sjekket ved hjelp av røyk. Dessuten vil utetemperaturen omtrent tilsvare årsmiddeltemperaturen i Trondheim, dersom man har veldig dårlig isolerte vinduer og vegg, slik som i testrommet. Er bygningen bygget etter TEK '97, vil dette tilsvare en temperatur på $-6,3$ °C utendørs, noe som ikke er så usannsynlig for en vinterdag.

8.3 Kartlegging av spredningen av CO₂ i testrommet

Først ble det foretatt noen målinger for å kartlegge spredningen av CO₂ i testrommet ved både sommer og vintertilstand. I utgangspunktet var det meningen at man skulle få disse resultatene ved hjelp av simuleringene i AirPak, men siden det ikke fungerte, var det nødvendig å få gjennomført disse målingene.

Det var ønskelig å måle konsentrasjonene i pustesonen til alle barna, og finne ut hvor denne var høyest. Hvis man klarte å oppnå tilfredsstillende luftkvalitet her, så ville luften være av tilfredsstillende kvalitet også i resten av pustesonen. Måleinstrumentet ble da plassert midt på hvert bord i rommet i høyden med pustehullene til barna. For de to som står i lengst til høyre i Figur 8-1, ble måleinstrumentet hengt opp i en snor i taket i omtrent samme høyde og avstand fra forurensningskildene som de andre måleinstrumentene. Senere ble det foretatt målinger på forskjellige steder rundt omkring i testrommet hvor det ville ha vært logisk å sette en sensor i virkeligheten. Dette omfattet begge avtrekkene, flere punkter på begge sideveggene (dvs. på veggene til venstre og til høyre for døren), og på dørveggen mellom døren og det store vinduet, 1,3 m over gulvet (rett over den typiske plasseringen av en lysbryter). Det ble sett bort fra en mulighet til å plassere sensorer i taket pga. at ventilasjonen i rommet baserer seg på Coandaeffekten hvilket innebærer at ren luft vil strømme langs taket. Plassering på ytterveggen ble også antatt for å være uaktuell. Meningen var å finne et sted hvor konsentrasjonsvariasjonen samsvarte med konsentrasjonsvariasjonen i det punktet i pustesonen med høyest konsentrasjon. Derfor ble et måleinstrument beholdt som referanse i dette punktet under hver måleserie. Den samme prosedyren ble gjennomført for begge tilstander.

Etter at den første målingen ble gjennomført viste det seg, at en av de fem måleinstrumentene for CO₂ som ble stilt til rådighet måtte kalibreres, fordi det registrerte konsentrasjoner som var

betydelig høyere enn andre steder, se Figur V4-1, Vedlegg 4. Målingene for sommeren ble derfor gjennomført med kun 4 instrumenter, noe som resulterte i 9 måleserier, med 26 forskjellige målepunkter for å få kartlagt spredningen. Under vintermålingene ble instrumentet levert tilbake ferdigkalibrert, slik at man fikk 8 måleserier med 26 forskjellige målepunkter. Hver serie varte i en time, og instrumentene ble stilt inn slik at de lagret en verdi hvert minutt. Varigheten på en time ble valgt fordi man måtte velge et tidsintervall som gjorde det mulig å undersøke flest mulig punkter med kun fire eller fem måleinstrumenter, samtidig som det var ønskelig å betrakte utviklingen av konsentrasjonsøkningen av CO₂ lenge nok til å kunne trekke slutninger. Før hvert forsøk ble trykknivået i rommet og temperaturen undersøkt og stilt inn på nytt på instrumentet. På denne måten ble resultatene mer nøyaktige (Vaisala, 2001).

For å forsikre seg at temperaturforskjellene mellom testrommet og resten av laboratoriet var neglisjerbare under forsøkene, ble dataene fra termoelementene overvåket. Verdiene som ble registrert ble ikke evaluert under kartleggingsprosessen, men det ble observert at tilluftstemperaturen var hele 9 grader lavere enn romtemperaturen for sommertilstanden og 8,6 grader lavere for vintertilstanden, noe som tyder på at det kreves kjøling i rommet hele året gjennom. Det ble ikke undersøkt om det oppstod trekk i oppholdssonen under sommerforhold. I følge Blom (2000), blir både høyere romtemperaturer og høyere lufthastigheter bedre tolerert når det er varmt ute (den optimale operative temperaturen for et klasserom er $24,5 \pm 1,5$ °C om sommeren, og den maksimale lufthastigheten i rommet 0,22 m/s). Litt trekk på veldig varme sommerdager kan til og med oppleves som noe positivt.

8.4 Dagsmålinger

Etter at kartleggingen var ferdig ble en hel skoledag simulert for hver av de to tilstandene for å undersøke hvordan konsentrasjonsnivåene ville variere. Måleinstrumentene ble plassert i de punktene hvor det ved kartleggingen ble funnet størst samsvar med konsentrasjonsvariasjonene i det punktet i pustesonen med dårligst luftkvalitet. Sammenhengen ble vurdert ved å undersøke det prosentuelle avviket mellom konsentrasjonsforløpet i et punkt i forhold til det i referansepunktet. Fordi det var ønsket å finne det punktet hvor avviket var mest mulig konstant, ble variansen av avviket beregnet

etter Ligning 8.3. Punktet der avviket hadde minst varians ble regnet som det punktet hvor konsentrasjonsforløpet hadde best samsvar med konsentrasjonsforløpet i referansepunktet.

$$VAR = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1} \quad (8.3)$$

Hvor VAR står for variansen til avviket, n antall registrerte verdier, x_i avviket mellom to verdier i et punkt i, og \bar{x} avvikets gjennomsnitt.

Etter at de fire beste punktene for hver tilstand ble funnet, måtte det avgjøres hvordan selve forsøket skulle gjennomføres. Først ble det bestemt hva slags timeplan som skulle følges.

Skoledagen har forandret seg med den siste utdanningsreformen, slik at læringsperiodene nå ofte varer fra 1,5 – 2 timer, etterfulgt av lengre pauser. Det virker som om hver skole selv får bestemme lengden på undervisningsperiodene og hvordan dagene skal deles opp. Det er ofte ingen faste timeplaner for hele året, men ukeplaner hvor aktivitetene for hver dag står oppført. (Trondheim kommune, 2007)

Ved å studere flere av internettsidene til barneskolene i Trondheim, ble det besluttet at simuleringene skulle gjennomføres i følge undervisningsplanen ved Charlottenlund barneskole. Der er skoledagen regelmessig oppdelt med tre undervisningsøkter på 1,5 timer hver og to lengre pauser hver dag, se Tabell 8-7 nedenfor. Planen er gjeldende for alle klassetrinn, og lik hele året gjennom (Waagen, 2007).

Tabell 8-7: En dag på Charlottenlund barneskole

Klokkeslett	Aktivitet
Kl. 08.30 – 10.00	Første undervisningsøkt
Kl. 10.00 – 10.45	Pause
Kl 10.45 – 12.15	Andre undervisningsøkt
Kl 12.15 – 12.45	Pause
Kl 12.45 – 14.15	Tredje undervisningsøkt

Deretter var det viktig å undersøke hvor lang tid det tar for barnmodellene å varme seg opp og avkjøles når man slår lyspæren inne i dem på eller av, for å forsikre seg at modellenes pustefunksjon fungerte som den skulle, og at man dermed kunne slå varmen i barna av i

pausene. Dette ble gjort ved å registrere endringer i overflatetemperaturen på den ytre sylindere for to modeller, hvorav den ene var helt varm og den andre helt kald ved undersøkelsens start. I løpet av en periode på 45 minutter (som er varigheten av den lengste pausen) ble det tatt et termografisk bilde av hver modell hvert femte minutt. Bildene ble alltid tatt i samme avstand fra modellene og i samme punkt, for å kunne sammenligne dem etterpå. Forskjellen mellom kald og varm tilstand var 6 °C, og det ble observert at det tok ca 35 minutter for det kalde barnet å varmes helt opp, og for det varme å kjøles helt ned. Allerede etter et kvarter hadde ytterflatene til begge modellene oppnådd over 75 % av sluttverdiene.

Siden CO₂ gassen slippes ut rett over lyspæren i den innerste sylindere, som vil bli fortere varm enn den ytterste overflaten av modellen, ble det gjort nok et forsøk for å se hvor lang tid det tar før strømningshastigheten ut fra pustehullet på en kald modell som slås på, oppnår en verdi som gir den riktige volumstrømmen ut fra hullet (se Kapittel 7.1). Tiden ble målt fra varmen i modellen ble slått på og frem til den ønskede verdien ble oppnådd. Det tok kun 1 minutt og 20 sekunder.

På bakgrunn av de forsøk som ovenfor er beskrevet ble det besluttet å slå varmen i modellene av og på i pausene. Før starten på hver undervisningsøkt ble varmen i barna slått på, så belysningen i rommet, så CO₂ tilførselen. Rekkefølgen ble valgt for å gi modellene tid til å varme seg litt opp slik at de kunne puste ordentlig når gassen ble sluppet ut i dem.

8.4.1 Vinterdag

For simuleringen av en vinterdag ble det besluttet å kjøle ned ytterveggen til 8 °C om natten pga tregheten i systemet som gjør at det tar litt tid før den ønskede temperaturen utenfor ytterveggen stiller seg inn. Av samme grunn ble ventilasjonsanlegget også beholdt på utenom forsøktiden. For å oppnå en romtemperatur på 25 °C ved starten på den første undervisningsøkten skulle rommet varmes opp om natten ved hjelp av de elektriske ovnene som er installert under vinduene på ytterveggen. I begynnelsen var det problemer med å få ovnene til å fungere. På grunn av en feil i den elektriske koblingen gikk sikringen hver gang man prøvde å slå de på. Etter at denne feilen ble rettet opp av fagfolk, viste det seg at kun tre av fire ovner i rommet fungerte. De var i tillegg innstilt slik at de gav fra seg kun halvparten

av den maksimale effekten. Det vil si at man om natten hadde en varmeproduksjon i rommet på 1500 W.

Like før starten av skoledagen ble alle ovnene slått av. Varmen i barna, belysningen og tilførselen av CO₂ gassen ble slått på ved starten av hver undervisningsøkt, og slått av før hver pause. Måleinstrumentene for CO₂ ble stilt inn slik at de registrerte en verdi hver femte minutt gjennom hele skoledagen.

8.4.2 Sommerdag

For simuleringen av sommerdagen ble kjølingen av ytterveggen slått av slik at man fikk samme temperatur i testrommet og overalt utenfor. Naturlig nok ble varmeovnene heller ikke brukt. Det eneste som stod på om natten var ventilasjonsanlegget. Dagsmålingen ble så gjennomført på samme måte som for vinterdagen.

8.5 Arbeidets begrensninger

Det er her blitt antatt at klasserommet er i bruk av 30 personer, som er jevnt fordelt utover i rommet og oppholder seg på samme plass gjennom alle undervisningsøkter.

Forurensningskildene er konstante og gir ut like mye CO₂ under hele bruksperioden.

I virkeligheten vil hvert barns produksjon av CO₂ variere noe med barnets alder, vekt, kosthold og aktivitetsnivå. Dessuten er det etter den siste utdanningsreformen blitt lagt mer og mer vekt på at læring skal foregå gjennom andre arbeidsformer enn ren tavleundervisning og forelesninger, slik at det er grunn til å tro at en vanlig skoledag kan se noe annerledes ut.

Aktivitetsnivået i klasserommene har økt og sitteplassene kan arrangeres etter behov. I tillegg kan antall tilstedeværende personer være forskjellig fra dag til dag. Dermed kan man si at man i et virkelig klasserom ville ha fått en litt annerledes spredning av forurensningskilder. Både mengden av forurensningene og hvor i rommet de oppstår, kan forventes å variere i løpet av en moderne skoledag. Dette er ikke blitt tatt med i betraktning under gjennomføringen av forsøkene i laboratoriet.

9 Utstyr

I dette kapitlet finner man en beskrivelse av måleapparatene som ble brukt for å kartlegge verdier og finne resultatene.

9.1 VelociCalc Plus Modell 8388, lufthastighetsmåler fra TSI Incorporated

Ved hjelp av én probe som inneholder flere sensoren kan VelociCalc Plus måle lufthastighet, lufttemperatur, trykk og relativ luftfuktighet. Instrumentet kan beregne volumstrømmen, og ved hjelp av temperatur- og fuktighetssensoren også duggpunktet. I forbindelse med denne oppgaven ble det kun brukt til å måle lufthastighet.



Figur 9-1: VelociCalc Plus, Modell 8388

Måleprinsippet baserer seg på et termoanemometer med konstant temperatur. Når lufthastigheten øker trenges det mer effekt for å opprettholde temperaturen på sensoren. Denne effektøkningen er direkte proporsjonal med lufthastigheten, slik at dens verdi kan regnes om for å få en verdi for hastigheten. (TSI Incorporated, 2007)

VelociCalc Plus har en funksjon som gjør at man kan lagre måledata for så å beregne gjennomsnittet av målingene. Dette ble brukt ved alle målingene som ble foretatt fordi verdiene varierte mye pga turbulens.

Instrumentet kan måle lufthastigheter i området mellom 0,15 og 50 m/s med en usikkerhet på $\pm 3 \%$ av avlest verdi (temperaturkompensert innenfor et intervall for lufttemperaturer mellom 5 og 65 °C). Responstiden (tiden til verdien som vises på displayet har nådd 63 % av sluttverdien) er 200 millisekunder. (TSI Incorporated, 1998)

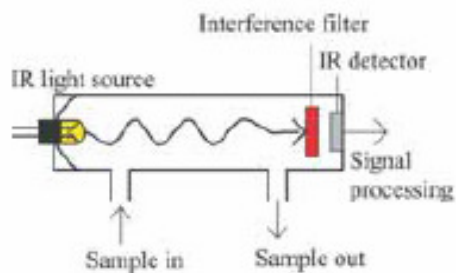
9.2 Vaisala GM70 CO₂ måler

GM70 består av to deler: en probe som inneholder en CARBOCAP sensor, og en indikator som sørger for grafisk og numerisk fremstilling av måleresultatene, se Figur 9-2. I tillegg kan apparatet lett kobles opp mot en datamaskin. Verdiene kan da logges direkte på datamaskinen, eller overføres fra indikatoren etter at målingene er avsluttet. Dataene behandles ved hjelp av programvaren MI70 Link som er kompatibel med Windows.



Figur 9-2: GM70 CO₂ måler

En CARBOCAP sensor måler CO₂ konsentrasjonen ved å detektere infrarød stråling. Sensoren består av et kammer som inneholder en luftprøve, en IR lyskilde, en interferens filter og en IR detektor, se Figur 9-3. CO₂ i luftprøven vil absorbere deler av strålingen fra IR kilden, og interferens filteret vil kun slippe gjennom lys med de bølgelengdene som kan absorberes av CO₂. Detektoren vil da måle lysintensiteten for disse bølgelengdene. (Vaisala, 2007a)



Figur 9-3: Oppbygging av en CARBOCAP sensor, (Vaisala, 2007a)

Filteret som benyttes i CARBOCAP er laget av silikon og kan reguleres elektrisk. Etter at den første målingen er tatt, blir filteret stilt inn til å slippe gjennom lys med bølgelengder som ikke absorberes. Slik får man en referansetilstand. Forholdet mellom lysintensiteten ved absorpsjons- og referansetilstanden angir hvor mye lys ble absorbert i gassen og dermed også gassens konsentrasjon. (Vaisala, 2007a)

For å få et mer nøyaktig resultat er det mulig å stille inn GM70 til riktig omgivelsestrykk og omgivelsestemperatur før instrumentet blir tatt i bruk. Fordi det blir funnet en ny referansetilstand etter hver måling, er apparatet mer stabilt over tid. Det er lite ømfintlig for forstyrrelser i form av støv og vanndamp, og ved 25 °C gir det målinger med en nøyaktighet på $\pm [1,5 \% \text{ av måleområdet} + 2 \% \text{ avlesning}]$, inkludert repeterbarhet, ulinearitet og kalibrerings usikkerhet. Det anbefales å kalibrere instrumentet annethvert år. (Vaisala, 2007b)

GM70 fra Vaisala er brukervennlig og har en kort oppvarmingsperiode som gjør at det kan raskt taes i bruk etter at det er blitt slått på.

9.3 Termoelementer for måling av temperatur

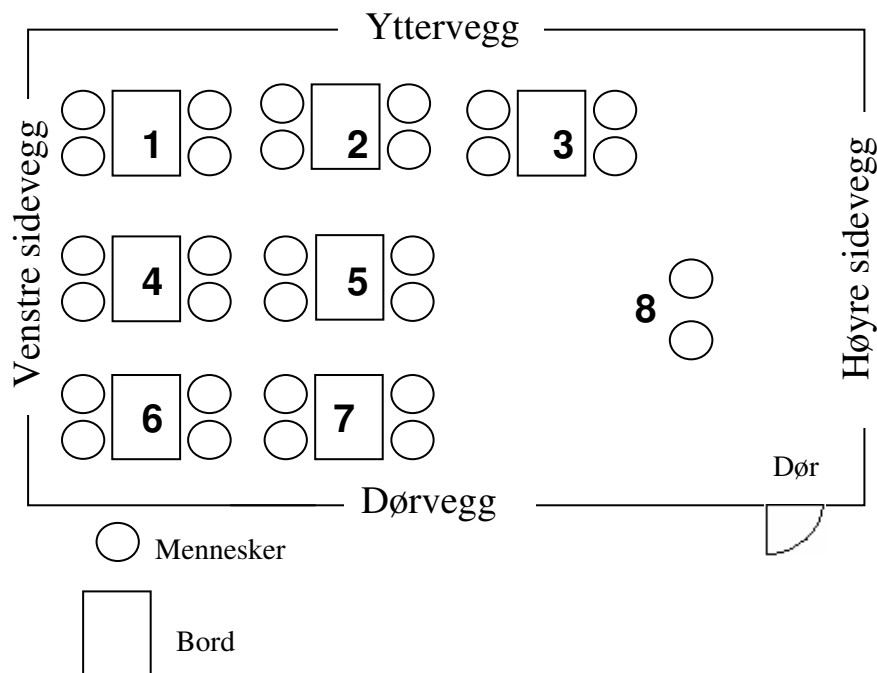
Termoelementer for måling av temperaturen i forskjellige punkter i rommet var allerede lagt ut i laboratoriet i følge skjemaene i Vedlegg 3. For å få et referansepunkt for temperaturendringene som ble registrert, ble den ene enden av alle termoelementer lagt i en termos fylt med en blanding av knust is og vann. På denne måten fikk man et referansepunkt som var 0 °C. Registrerte verdier ble ved hjelp av en logger overført til en datamaskin og behandlet ved hjelp av programvaren Agilent BenchLink Data Logger.

10 Resultater

I dette kapitlet blir de viktigste resultatene av måleseriene presentert, resten kan bli funnet i Vedlegg 4. Konsentrasjonsvariasjonene er blitt fremstilt grafisk.

10.1 Kartlegging av spredningen av CO₂ i testrommet

Figur 10-1 viser hvordan punktene i pustesonene til barna er blitt nummerert. Tabell 10-1 viser en oversikt over de resterende 18 målepunktene som ble undersøkt for å kartlegge spredningen. Selv om det mangler tavle i testrommet, så er det blitt antatt at en plausibel plassering ville ha vært på sideveggen til høyre for døren. Plasseringen av målepunktene på denne veggen er derfor blitt gjort rundt en imaginær tavle. På den venstre sideveggen er det blitt satt flest punkter fordi denne ligger nærmest forurensningskildene.



Figur 10-1: Målepunktene i pustesonene

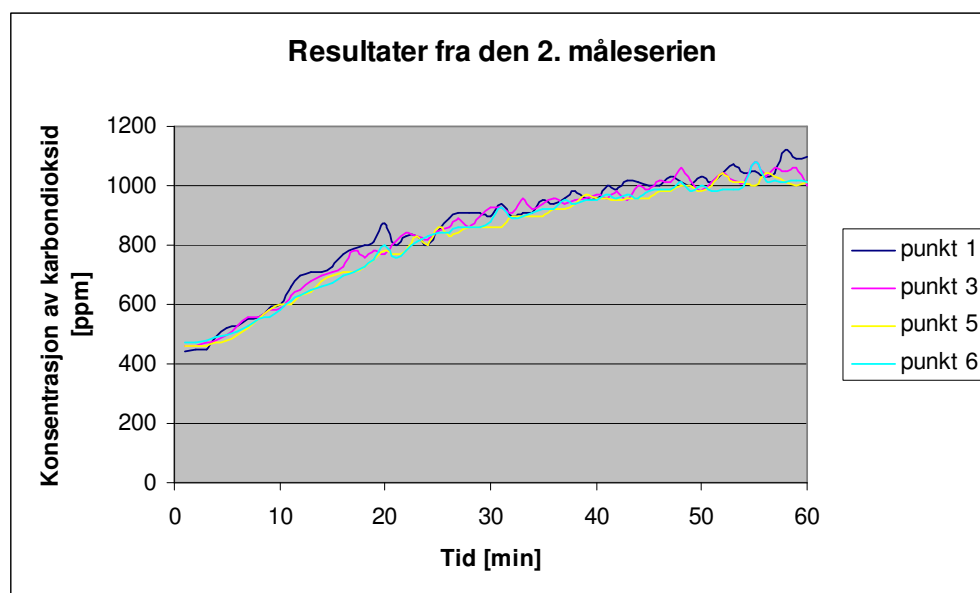
Tabell 10-1: Oversikt over hvor i rommet de resterende målepunktene befinner seg

Målepunkt	Hvor i rommet
9	Avtrekk over døren
10	Det andre avtrekket
11	På dørveggen, mellom døren og det store vinduet, 1,3 m over gulvet
12	Venstre sidevegg (veggen bak barna), 0,5 m fra ytterveggen, 1 m over gulvet
13	Midt på venstre sidevegg, 1 m over gulvet
14	Venstre sidevegg, 0,5 m fra dørveggen, 1 m over gulvet
15	Venstre sidevegg (veggen bak barna), 0,5 m fra ytterveggen, 1,3 m over gulvet
16	Midt på venstre sidevegg, 1,3 m over gulvet
17	Venstre sidevegg, 0,5 m fra dørveggen, 1,3 m over gulvet
18	Venstre sidevegg (veggen bak barna), 0,5 m fra ytterveggen, 1,6 m over gulvet
19	Midt på venstre sidevegg, 1,6 m over gulvet
20	Venstre sidevegg, 0,5 m fra dørveggen, 1,6 m over gulvet
21	Midt på venstre sidevegg, 0,5 m over gulvet
22	Midt på venstre sidevegg, 1,9 m over gulvet
23	Midt på venstre sidevegg, 2,6 m over gulvet
24	Høyre sidevegg, til venstre for tavlen, 1,3 m over gulvet
25	Rett over tavlen, på midten
26	Høyre sidevegg, til høyre for tavlen, 1,3 m over gulvet

10.1.1 Pustesonen

For kartlegging av spredningen i testrommet er det blitt foretatt tre måleserier for sommertilstanden (serie 1, 2 og 3) og tre for vintertilstanden (serie 10, 11 og 12) for å finne den plassen i pustesonen som er mest forurenset når rommet er i bruk. I hver serie ble det punktet med høyest konsentrasjon beholdt og tatt med som referanse i neste måleserie. Ved rangeringen av konsentrasjonene ble det sett på hvilket punkt som hadde den høyeste registrerte verdi, samt hvilket punkt som hadde den største gjennomsnittsverdien. For sommertilstanden var det alltid ett og samme punkt som hadde den høyeste konsentrasjonen, nemlig punkt 1. For vintertilstanden var mengden av CO₂ høyest og omtrent lik i punkt 1 og 2. Derfor ble begge disse beholdt som referanse gjennom de tre måleseriene.

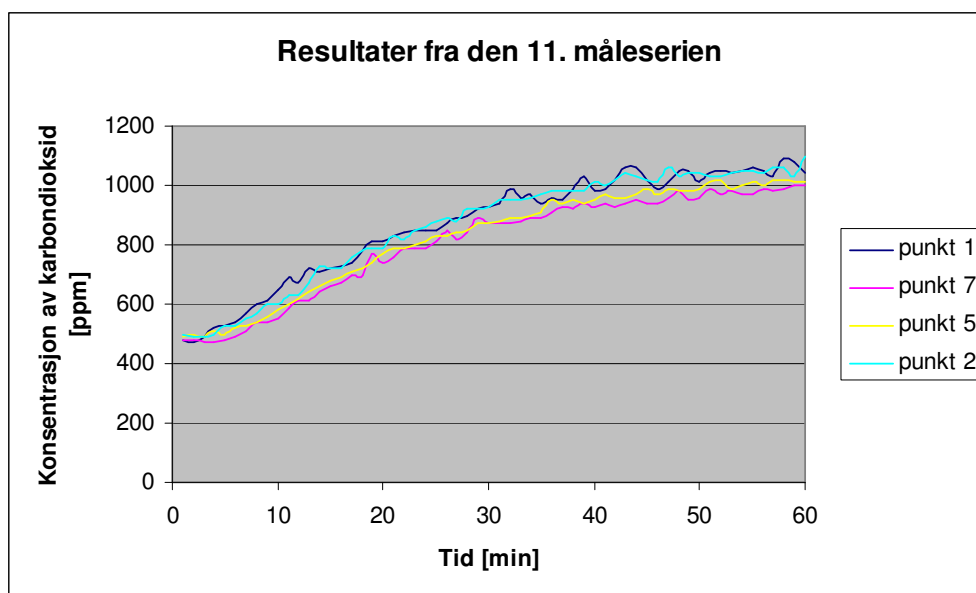
Figur 10-2 og 10-3 viser konsentrasjonsvariasjonene for noen punkter i pustesonen for henholdsvis sommeren og vinteren. Ut i fra grafene kan det være litt vanskelig å se hvilke punkter har høyest forurensning. Derfor er den høyeste registrerte konsentrasjonen og gjennomsnittet i alle punkter også blitt tatt med i Tabell 10-2 og 10-3. For resten av resultatene, se Vedlegg 4, Figur V4-1 til V4-4.



Figur 10-2: Et eksempel av konsentrasjonsvariasjonen i noen punkter i pustesonen under sommerforhold

Tabell 10-2: Opplysningene brukt til rangering av de registrerte CO2 verdiene i den 2. måleserien

Målepunkt	Høyeste registrerte verdi	Gjennomsnittsverdi
1	1120	858
3	1080	846
5	1040	823
6	1080	826



Figur 10-3: Et eksempel av konsentrasjonsvariasjonen i noen punkter i pustesonen under vinterforhold

Tabell 10-3: Opplysningene brukt til rangering av de registrerte CO₂ verdiene i den 11. måleserien

Målepunkt	Høyeste registrerte verdi	Gjennomsnittsverdi
1	1090	868
7	1000	805
5	1020	823
2	1100	864

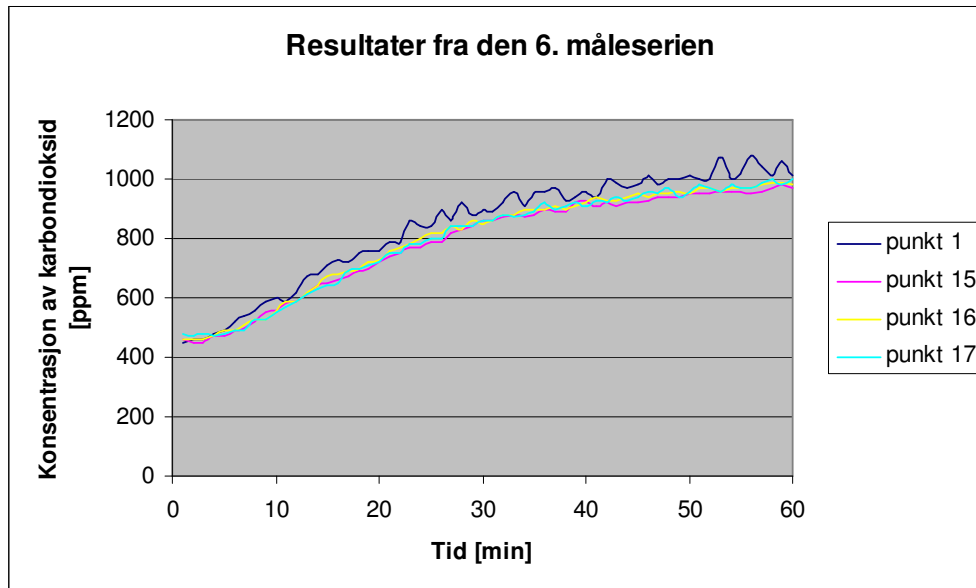
10.1.2 Andre punkter i rommet

Konsentrasjonsvariasjonen ble undersøkt i ytterligere 18 punkter rundt omkring i rommet i håp om å finne et sted hvor variasjonene av CO₂ konsentrasjonene kunne settes i sammenheng med forurensningsutviklingen i referansepunktet fra pustesonen. Dette ble gjort for både vinter og sommerforhold.

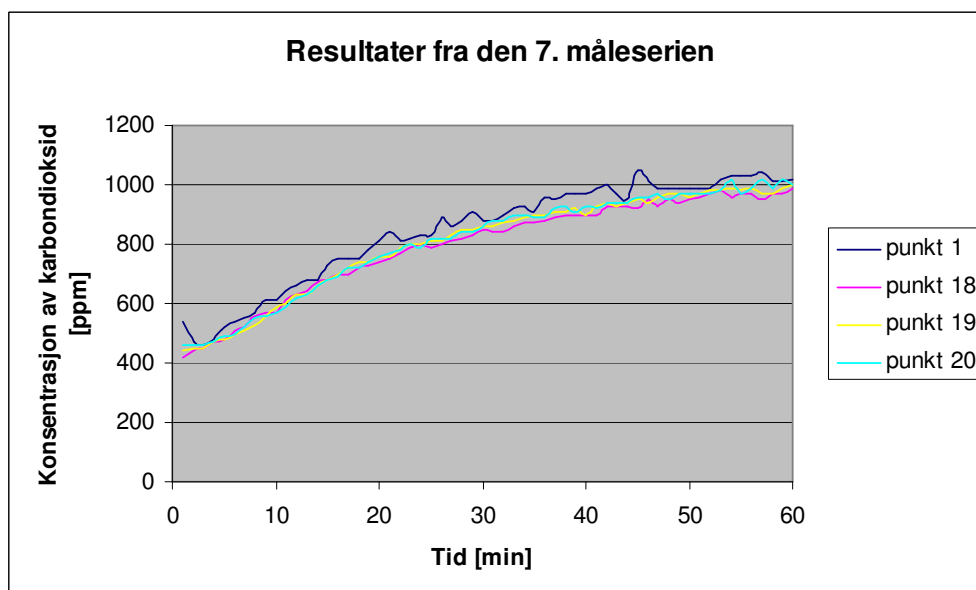
Figur 10-4 til 10-9 viser grafisk fremstilling av de måleseriene som inneholdt punkter hvor avviket fra referansepunktet har minst varians. Figur 10-4 til 10-6 viser resultatene for målingene tatt under sommerforhold, og Figur 10-7 til 10-9 for de tatt under vinterforhold. Punktene som hadde best samsvar med referansepunktet viste seg å være nummer 15, 21, 16 og 20 for sommeren, mens de beste for vinteren ble 23, 18, 15 og 12. Fire punkter ble valgt

for hver situasjon fordi man hadde fem måleinstrumenter for CO₂ til bruk under simuleringene av de to skoledagene.

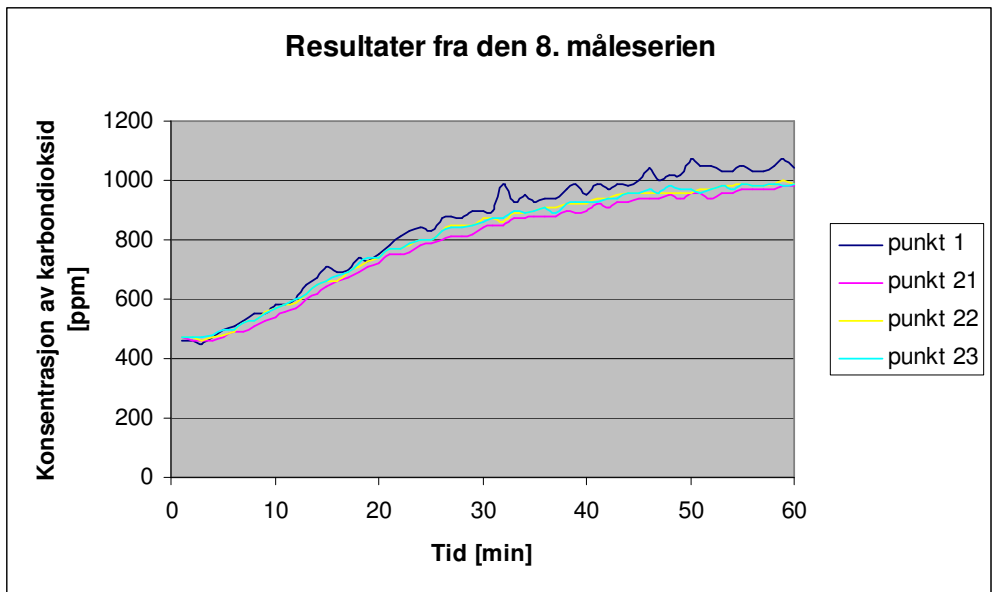
Grafisk fremstilling av de resterende måleseriene, så vel som en tabell med oversikt over variansene til avviket i de forskjellige punktene finnes i Vedlegg 4 (Figur V4-5 til V4-9, Tabell V4-1).



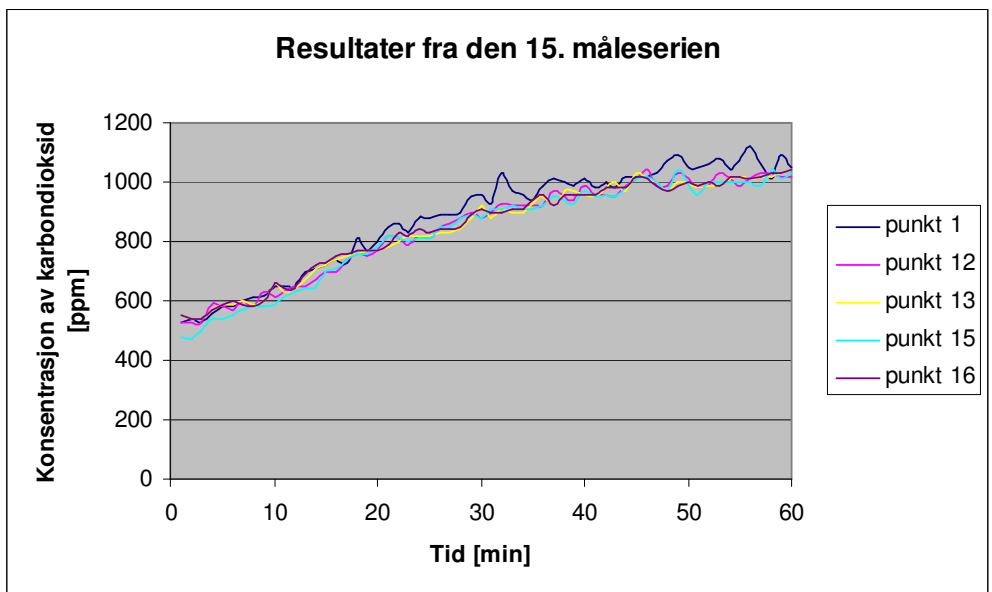
Figur 10-4: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 15 og i punkt 16 under sommerforhold



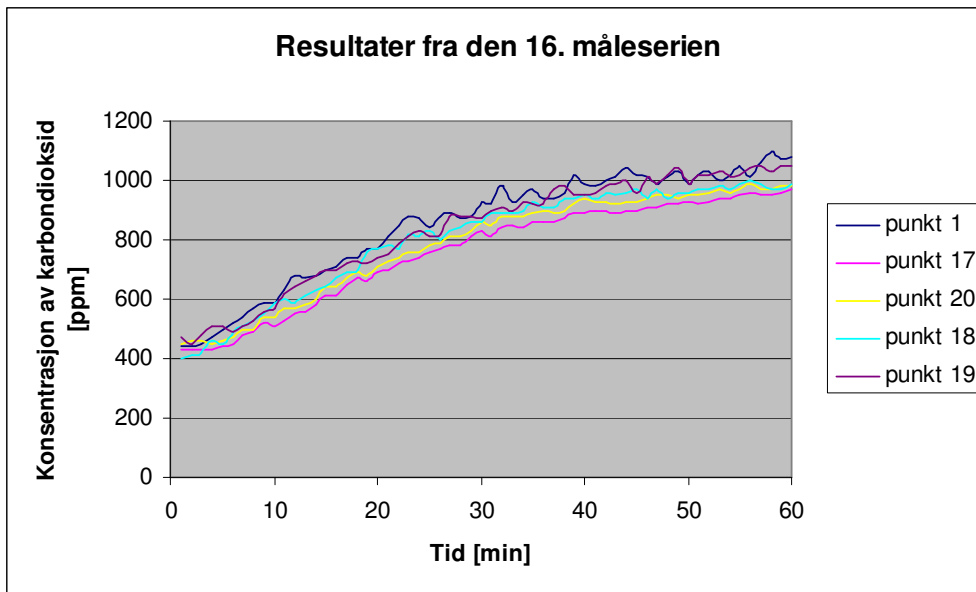
Figur 10-5: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 20 under sommerforhold



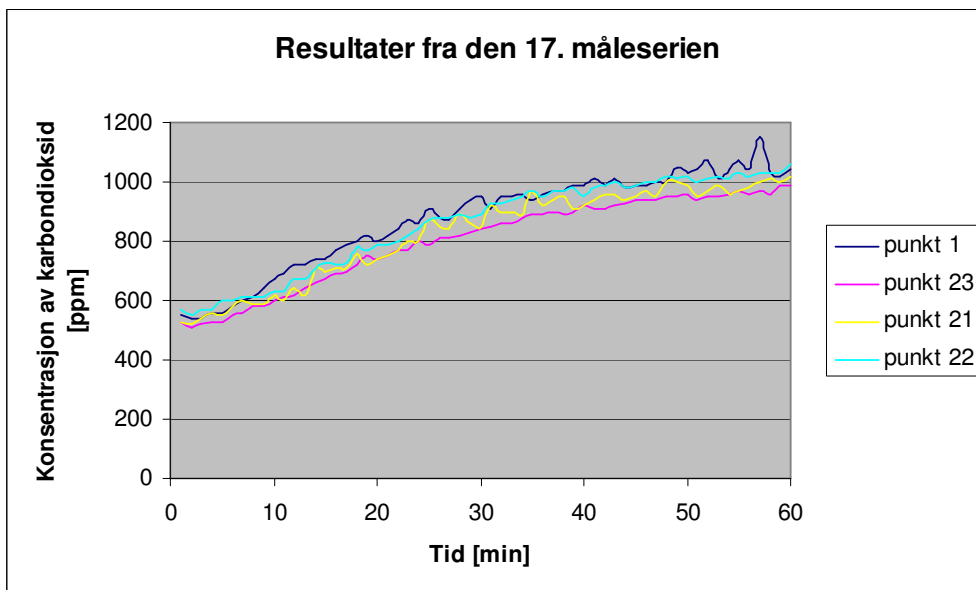
Figur 10-6: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 21 under sommerforhold



Figur 10-7: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 12 og i punkt 15 under vinterforhold



Figur 10-8: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 18 under vinterforhold

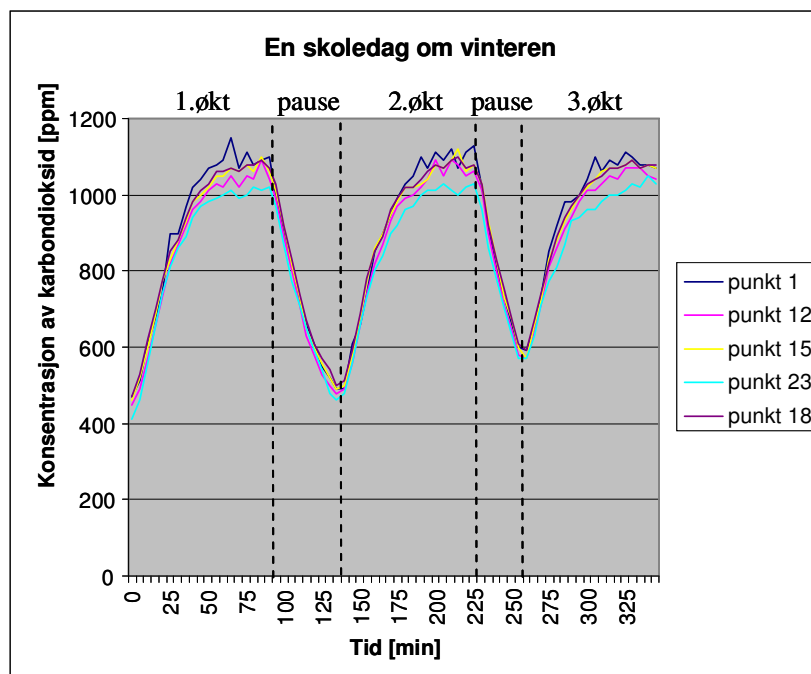


Figur 10-9: Konsentrasjonsvariasjon i punkt 23 under vinterforhold

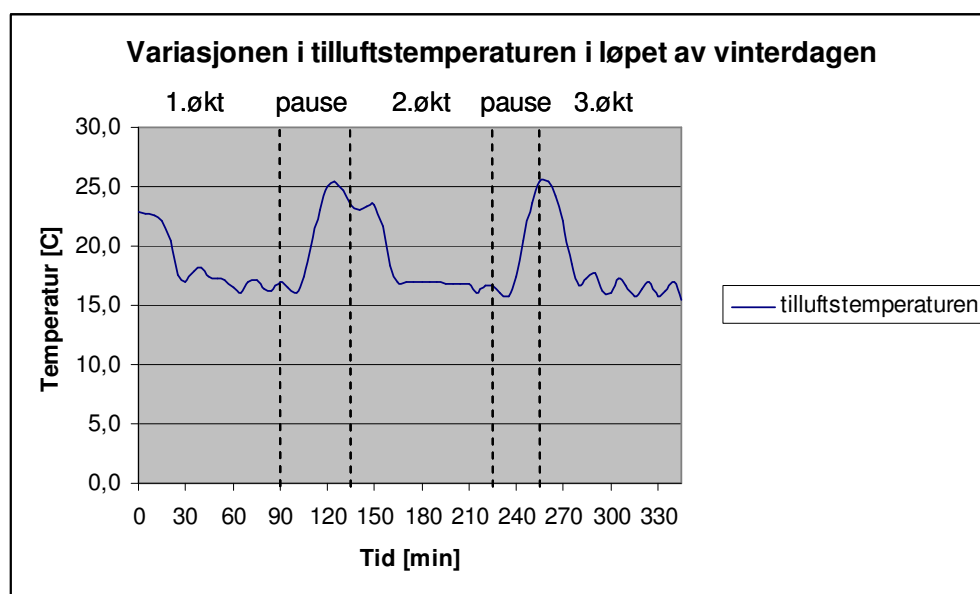
10.2 Dagsmålinger

Figur 10-10 og 10-12 viser henholdsvis resultatene for simuleringen av en skoledag om vinteren og en om sommeren.

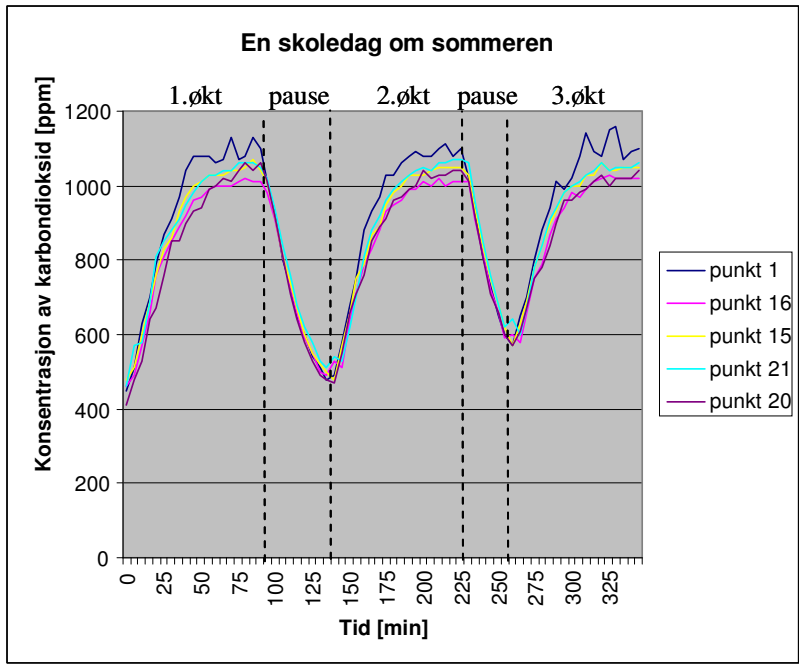
I Figur 10-11 og Figur 10-13 kan man også se svingningene i tilluftstemperaturen i løpet av skoledagene. Romtemperaturen var registrert til å variere mellom 24,5 og 25,5 °C under begge forsøksdagene.



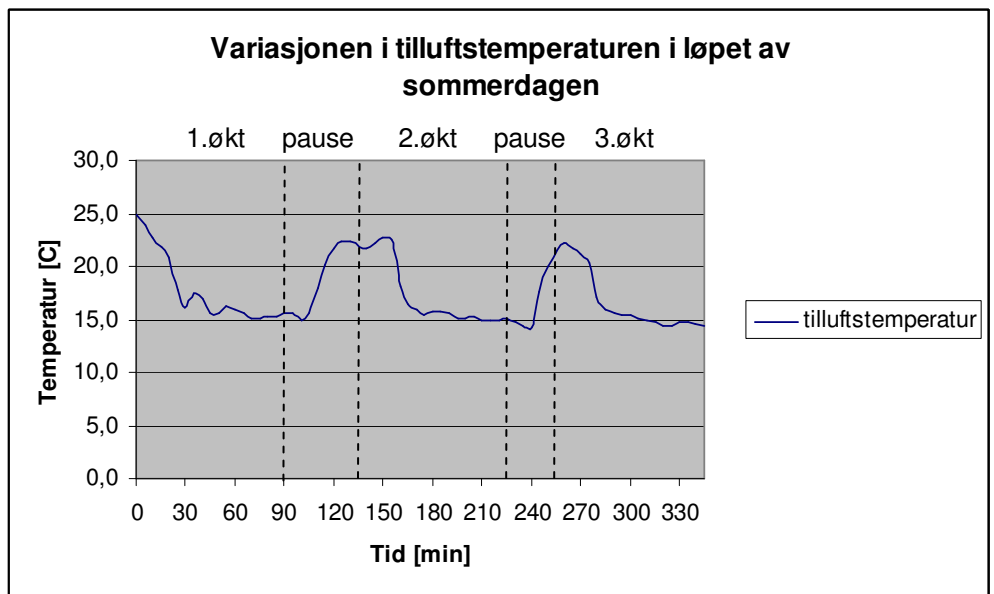
Figur 10-10: Konsentrasjonsvariasjonen i løpet av en skoledag om vinteren



Figur 10-11: Variasjon av tilluftstemperaturen under forsøket hvor en skoledag ble simulert under vinterforhold



Figur 10-12: Konsentrasjonsvariasjonen i løpet av en skoledag om sommeren



Figur 10-13: Variasjon av tilluftstemperaturen under forsøket hvor en skoledag ble simulert under sommerforhold

11 Diskusjon

Selv om mengden tilført luft var innstilt etter forskrifter, så oversteg konsentrasjonen i noen punkter grenseverdien på 1000 ppm (1160 ppm var den høyeste observerte verdi). Dette var tilfellet både under målinger som er blitt foretatt under kartleggingen av spredningen og under dagsmålingene for både sommer- og vinterforhold. En årsak til altfor høye konsentrasjoner kan være at fullstendig omrøring av luften ikke ble oppnådd. Grenseverdien ble alltid oversteget omtrent 45 min etter at gasstilførselen var blitt slått på.

Den oppgitte måleusikkerheten fra produsenten av måleinstrumentene for CO₂ representerer hovedusikkerheten i de resultatene som er blitt presentert i Kapittel 10. Det ble undersøkt hvorvidt måleinstrumentene er blitt kalibrert i forhold til hverandre slik at de viser det samme dersom de måler i samme punkt. En variasjon på ± 20 ppm mellom instrumentene ble oppdaget.

I dette arbeidet betegnes resultatene i et punkt som ”tilfredsstillende” dersom variasjonen av CO₂ konsentrasjonen i punktet kan settes i sammenheng med forurensningsutviklingen i det gitte referansepunktet i pustesonen. Sammenhengen ble undersøkt ved å beregne variansen til det prosentuelle avviket mellom punktene. De ”beste” resultatene finnes i punkter hvor avvik har minst varians, dvs. hvor avviket til referansetilstanden er mest mulig konstant.

11.1 Kartlegging av spredningen av CO₂ i testrommet

11.1.1 Pustesonen

For sommertilstanden viste det seg at den høyeste konsentrasjonen av CO₂ alltid ble funnet i et og samme punkt i pustesonen, nemlig punkt 1, mens det for vintertilstanden var litt vanskeligere å avgjøre hvilket punkt som hadde den høyeste konsentrasjonen, siden resultatene i punkt 1, 2 og 3 var omtrent like. Disse punktene ligger imidlertid på de bordene som er nærmest ytterveggen. Denne veggen har dårlig isolasjonsevne og temperaturforskjellen mellom inne og ute var stilt inn til å være hele 17 grader, noe som har

ført til store varmetap. Det er trolig at konveksjonsstrømmene forårsaket av varmetapet førte med seg luften i rommet og dermed også forurensningene i retning ytterveggen.

11.1.2 Andre punkter i rommet

Alle punkter hvor konsentrasjonsvariasjonen hadde best samsvar med konsentrasjonsvariasjonen i referansepunktet i pustesonen, lå på den venstre sideveggen. Dette viste seg å være tilfelle for både sommer- og vintertilstanden. Av alle målepunkter som er blitt valgt rundt omkring i rommet er punktene på denne veggen nærmest forurensningskildene og derfor virker resultatet logisk.

Blant de fire beste for hver tilstand var det kun ett punkt som var med for både vinteren og sommeren, nemlig punkt 15. Det befinner seg på venstre sideveggen, 0,5 m fra ytterveggen, 1,3 m over gulvet. Under sommerforhold var verdiene i dette punktet i gjennomsnitt 94 % av verdiene i referansepunktet, og under vinterforhold 94,7 %. Standardavviket ble beregnet til å være henholdsvis 2,6 %, og 3 %.

11.2 Dagsmålinger

Under simuleringen av sommerdagen sluttet displayet på måleinstrumentet i punkt 20 å virke. Dette ble lagt merke til ved begynnelsen av den første pausen. Etter at forsøket ble gjennomført ble dette instrumentet lever tilbake til instrumentrommet på laboratoriet for nærmere undersøkelser. Omsider lyktes det for en fagperson å reparere det. Det viste seg at instrumentet fortsatte å logge data selv om ikke alt fungerte som det skulle, slik at også verdiene fra dette måleinstrumentet ble tatt med i Kapittel 10. Den grafiske fremstillingen av disse resultatene ser ut til å være som forventet, men likevel er det usikkert hvorvidt man kan stole på verdiene registrert av dette måleinstrumentet.

Resultatene fra dagsmålingene viste at det var kommet til endring i rangeringen av de beste punktene. Tabell 11-1 gir en oversikt.

Tabell 11-1: Rangering av de fire beste punktene under kartleggingsmålingen og under dagsmålingene. De beste punktene står øverst

	Kartlegging	Dagsmålinger		Kartlegging	Dagsmålinger
	Sommer	punkt 15		punkt 15	Vinter
punkt 21		punkt 20	punkt 18	punkt 15	
punkt 16		punkt 16	punkt 15	punkt 18	
punkt 20		punkt 21	punkt 12	punkt 23	

Ikke bare variansene, men også de gjennomsnittlige verdiene av andelen av referanseverdiene hadde endret seg med noen prosent. Under dagsmålinger ble det observert at verdiene under sommerforhold i punkt 15 utgjorde i gjennomsnitt 97 % av verdiene i referansepunktet, og under vinterforhold 98,7 %. Standardavviket ble beregnet til å være henholdsvis 3,4 %, og 2,6 %.

Hvis man studerer Figur 10-10 og 10-12, så kan det virke som om de registrerte konsentrasjonene er omtrent like i alle punkter under pausene når CO₂ tilførselen er slått av. Dette kan føre til at den prosentuelle avviket for en hel dag minker, og variansen (og dermed også standardavviket) til avviket endrer seg. Det at konsentrasjonsvariasjonene stemmer så godt overens er et tegn på god, men ikke fullstendig omrøring. Ved fullstendig omrøring ville de ha falt helt sammen. Grunnen til at det samme ikke skjer også under undervisningsøktene kan være at det finnes konsentrasjonsgradienter i rommet som skyldes kildene.

Figurene 10-11 og 10-13 viser variasjonene i tilluftstemperaturene i løpet av de to skoledagene som er blitt simulert. Temperatursvingingene skyldes at romtemperaturen hele tiden ble forsøkt holdt konstant, mens varmereproduksjonen i rommet varierte i løpet av forsøket fordi belysningen og varmen i barna ble slått av etter hver undervisningsøkt og slått på igjen etter pausene.

Det er grunn til å tro at luftstrømningen i rommet kommer til å endre seg når differansen mellom romtemperaturen og tilluftstemperaturen endrer seg. For vintertilstanden kan dette medføre at man unngår trekk som ble registrert ved gjennomføringen av røyktesten (se Kapittel 8.2), når tilluftstemperaturen øker. Men øker den for mye, slik at den blir lik romtemperaturen vil man ikke få dårligere omrøring mellom frisk luft og luften i rommet. I

Figur 10-11 kan man se at tilluftstemperaturen blir lik romtemperaturen mot slutten av pausene fordi da har varmekildene vært avslått en stund. Samtidig viser Figur 10-10 at linjene for konsentrasjonsvariasjon ikke vil stemme så godt overens i løpet av denne tiden, noe som tyder på dårligere omrøring.

12 Konklusjon

Forsøkene har vist at de tradisjonelle plassene for montering av sensorene som f. eks i avtrekk eller under lysbryteren i rommet, ikke gav tilfredsstillende resultater for testrommet. Årsaken er at man ikke oppnådde fullstendig omrøring av luften. For både sommer- og vinterforhold ble punkter med best samsvar funnet på venstre sidevegg, som er den veggen som ligger nærmest forurensningskildene. Å plassere sensoren et sted på denne veggen vil derfor virke fornuftig. Det er grunn til å tro at monteringen av sensorer på et sted som ikke er i veien for brukere, og ligger nærme oppholdssonen og forurensningskildene kan være fornuftig også i andre rom med omrøringsventilasjon.

På basis av målingene som er blitt foretatt i forbindelse med dette arbeidet kan man konkludere at det punktet i testrommet som egner seg best for plassering av sensoren er punkt 15 (venstre sidevegg, 0,5 m fra ytterveggen, 1,3 m over gulvet), siden det viste seg å være blant de fire beste både for sommer- og vinterforhold. Under målingene som representerte en sommerdag på skolen utgjorde konsentrasjonen i gjennomsnitt 97 % av konsentrasjonen i referansepunktet. For vinterdagen lå konsentrasjonsverdiene på 98,7 % i gjennomsnitt. Avviket kan reguleres ved hjelp av en proporsjonalregulator som multipliserer den målte verdien med 1,03 før den sender signaler videre til ventilasjonsanlegget om å justere luftmengder. Tallet 1,03 er valgt fordi det gjennomsnittlige avviket fra referanseverdier er 3 % om sommeren. Om vinteren er den kun 1,3 %, og ved å velge 1,013 i stedet for 1,03 ville man om sommeren ha fått litt dårligere luftkvalitet i pustesonen enn det som sensoren registrerer.

Punkt 15 kan altså være en mulig plass for plassering av sensoren, men før man kan ta en endelig beslutning så kreves det flere dagsmålinger og nærmere undersøkelse med måleinstrumenter som er kalibrert i henhold til hverandre.

Det er også mulig at en bedre løsning finnes i et punkt hvor konsentrasjonsvariasjonen ikke er blitt undersøkt.

Temperaturmålingene har vist at det i testrommet er behov for kjøling hele året gjennom. Med ekstra kjøleanlegg som ikke er tilknyttet ventilasjonsanlegget kan man oppnå konstant differanse mellom tilluftstemperaturen og romtemperaturen. Ved nøye prosjektering kan dette

gjøre at man får god omrøring mellom den friske luften som tilføres rommet og romluften, samtidig som man kan unngå trekk i oppholdssonen.

13 Anbefalinger til videreføring av arbeidet

En del ting som var blitt planlagt gjennomført innenfor rammer av dette arbeidet ble dessverre aldri gjort. Det er hovedsakelig to årsaker til dette:

1. Ting tok lengre tid enn planlagt
2. Det er ikke blitt undersøkt hvorvidt utstyret i laboratoriet fungerte som det skulle før forsøkene var satt i gang, slik at målingene måtte utsettes et par ganger mens man ventet på at ting skulle bli reparert.

Som en videreføring av arbeidet er det ønskelig å gjøre ferdig simuleringsmodellen i AirPak, for å sammenligne resultatene programmet gir med resultatene fra målingene som her er blitt gjennomført for kartleggingen av spredningen. Dersom de stemmer overens vil simuleringen vise hvorvidt noen punkter for mulig plassering av sensoren i rommet er blitt oversett. Det kan hende at løsningen finnes i et punkt som ikke er blitt undersøkt.

Det ville også vært å anbefale å gjennomføre flere dagsmålinger, både under samme forhold som de to som her er blitt gjennomført, og med noen variasjoner, for å undersøke hvordan endringene ville påvirke konsentrasjonsforløpet i de forskjellige punktene. Man kan f. eks variere utetemperaturen, den tilførte CO₂ mengden og varmeproduksjonen fra barna (dvs. variere antall tilstedeværende), og for sommerforhold kan man også vurdere å ta i bruk gulvvarmen og på denne måten simulere solinnstrålingen.

Under gjennomføringen av dette arbeidet var differansen mellom tilluftstemperaturen og romtemperaturen omtrent 9 grader, noe som under simuleringen av vinterforhold førte til trekk i en del av rommet. Det hadde vært interessant å gjennomføre flere forsøk med ekstra kjøling i rommet for å minke differansen mellom tilluftstemperaturen og romtemperaturen slik at man ikke får noe trekk, for å se hvordan dette ville påvirke spredningen og mengden av CO₂ i rommet.

For videre forskning kan det anbefales å undersøke hvordan forurensningsspredningen vil utvikle seg ved bruk av andre typer ventilasjonssystemer. Det anbefales å undersøke fortrenningsventilasjon og omrøringsventilasjon med forskjellige tillufts- og avtrekksventiler, samt hvordan plasseringen av ventilen i rommet vil påvirke spredningen.

14 Referanseliste

- Bakken, J., Senioringeniør ved SINTEF Energiforskning AS. Privat kommunikasjon, 09.05.2007
- BE (Statens bygningstekniske etat), 2007a. *Revisjon av REN* [internett]. Tilgjengelig på: <http://www.be.no/beweb/regler/ren06/%A4%A4%208-35,%2036,%2038%20%20ren.pdf> [Lest: 12.02.2007]
- BE (Statens bygningstekniske etat), 2007b. *Forskrift om endringer i forskrift 22.1.1997nr. 33 til Plan- og bygningsloven om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK)* [internett]. Tilgjengelig på: <http://www.be.no/PDFs/forskriftSAKTEKendr2007.pdf> [Lest: 12.02.2007]
- Blom, P., Norges byggforskningsinstitutt, 1999a. *Krav til luftmengder i ventilasjonsanlegg, Blad 421.503* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 01.02.2007]
- Blom, P., Norges byggforskningsinstitutt, 1999b. *Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort, Blad 421.501* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 01.02.2007]
- Blom, P., Norges byggforskningsinstitutt, 2000. *Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger, Blad 421.505* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 01.02.2007]
- Brooks Instrument, *Installation and Operation Manual*, 2000
- Brunk, M. F., *Grundlagen der Gebäudetechnik*. (Kompendium, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2006)
- Bustadmo, Martin, Ingeniør ved Varmeteknisk Laboratorium, NTNU. Privat kommunikasjon, 07.05.2007
- Byggforsk Kunnskapssystemer, 1997a. *Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven, Innemiljø, § 8-34 Ventilasjon* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 12.02.2007]
- Byggforsk Kunnskapssystemer, 1997b. *Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven, Innemiljø, § 8-36 Termisk inneklime* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 12.02.2007]
- Byggforsk Kunnskapssystemer, 1997c. *Veiledning til Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven, Innemiljø, § 8-34 Ventilasjon* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 12.02.2007]
- Byggforsk Kunnskapssystemer, 1997d. *Teknisk forskrift til Plan- og bygningsloven, Energibruk, § 8-21 Energi og effekt* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 12.02.2007]
- Danell, D., *Närvarodetektering*. (Håndbok, Extronic, 2002)

Emmerich, S. J., Persily, A. K., State-of-the-Art Review of CO₂, Demand Controlled Ventilation, *National Institute of Standards and technology*, NISTIR 6729. USA, 2001

Fluent Inc., 2002. *AirPak 2.1 User's Guide* [CD-ROM]

Glava, 2007. *GLAVA Rull A 37, Produktdata* [internett]. Tilgjengelig på: http://www.glava.no/filesystem/2003/05/glava_rull_a_37_2978.pdf [Lest: 20.03.2007]

Hartmann, A., ASIM Technologies, Inc. Sensors, 2003. *PIR Detectors for Security* [internett]. Tilgjengelig på: <http://sensorsmag.com/sensors/article/articleDetail.jsp?id=361363> [Lest: 14.11.2006]

Jurelionis, A., 2006, *CFD Prediction of Air Distribution in Classrooms*. Presented at Healthy Buildings conference, Lisboa, Portugal, juni 4-8, 2006

Kristensen, T., Norges byggforskningsinstitutt, 2001. *Sponplater. Typer og egenskaper, Blad 571.046* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 19.03.2007]

Krohn, J. Chr., Norges byggforskningsinstitutt, 2002. *Parkett. Typer og egenskaper, Blad 573.204* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 19.03.2007]

Kvande, T., Lisø, K.R., Hygen, R.O., Norges Byggforskningsinstitutt, 2006. *Klimadata for termiskdimensjonering og frostsikring, Blad 451.021* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 15.05.2007]

Liddament, M. W., *A Guide to Energy Efficient Ventilation*. (IEA Annex 5, University of Warwick Science Park, 1996)

Mathisen, H. M., *DKL – Tilluft til prøverom-simulering*. (Notat, SINTEF, 2007)

Meteorologisk Institutt, 2006. *Beaufortskalaen* [internett]. Tilgjengelig på: http://met.no/met/met_lex/v_a/vind/beaufortskalaen.html [Lest: 28.04.2007]

Meteorologisk Institutt, 2007. *Temperaturnormaler for Trondheim i perioden 1961- 1990* [internett]. Tilgjengelig på: http://met.no/observasjoner/sor-trondelag/normaler_for_kommune_1601.html?kommuner [Lest: 15.05.2007]

Musum Interiør A/S, Leverandør av tepper og gulvbelegg. Privat kommunikasjon, 19.03.2007

Mysen, M., Ventilation Systems and their Impact on Indoor Climate and Energy Use in Schools, Studies of air filters and ventilation control. (Doktoravhandling, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2005a)

Mysen, M., Norges byggforskningsinstitutt, 2005b. *Behovsstyrt ventilasjon, Blad 552.323* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 01.02.2007]

Mysen, M., Norges byggforskningsinstitutt, 2005c. *Inneklimate og ventilasjon i skoler, Blad 552.311* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 30.01.2007]

Nasjonalt folkehelseinstitutt, 1998. *Anbefalte faglige normer for inneklime* [internett]. Tilgjengelig på: <http://www.fhi.no/dav/249C03CEC6614E87862368DA175E7A31.pdf> [Lest: 30.01.2007]

Nilsen, F., Produktsjef for himlingsavdelingen ved Glava i Oslo. Privat kommunikasjon, 19.03.2007

Norsk Standard, *NS 3031 Varmeisolering. Beregning av bygningers energi- og effektbehov til oppvarming og ventilasjon*. 1987

Norsk Standard, *NS-EN ISO 6946 Bygningskomponenter og -elementer. Varmemotstand og varmegjennomgangskoeffisient. Beregningsmetode*. 1997

Norsk Standard, *NS-EN 12524 Byggematerialer og -produkter, Hygrotermiske egenskaper, Tabulerte dimensjonerende verdier*. 2000

Norsk Standard, *NS-EN ISO 8996 Ergonomi for termisk miljø. Bestemmelse av metabolisk varmeproduksjon*. 2004

NVE (Norges vassdrags- og energidirektorat), 2007. *Nye energikrav til bygninger* [internett]. Tilgjengelig på: http://nve.no/modules/module_111/news_item_view.asp?iNewsId=30813&iCategoryId=1543 [Lest: 12.02.2007]

Prepan, 2004. *Miljøvaredeklarasjon, Prefabrikkerte paneler* [internett]. Tilgjengelig på: [http://www.prepan.no/akershus/asker/prepan_norge.nsf/0/6F8F216150873A51C1256EC8002B1795/\\$FILE/MiljødeklarasjonPaneler.pdf](http://www.prepan.no/akershus/asker/prepan_norge.nsf/0/6F8F216150873A51C1256EC8002B1795/$FILE/MiljødeklarasjonPaneler.pdf) [Lest: 07.03.2007]

Schjetne, A., Prosjektleder ved Prepan Norge AS i Trondheim. Privat kommunikasjon, 07.03.2007

Seppänen, O. A., Fisk, W. J., Mendell, M. J., Association of Ventilation Rates and CO₂ Concentrations with Health and Other Responses in Commercial and Institutional Buildings. *Indoor Air 1999*, 9: 226-252

Skåret, E., *Ventilasjonsteknikk*. (Kompendium, Norges Tekniske Høgskole (institusjonen har skiftet navn og heter i dag: Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet), 1986)

Skåret, E., Norges byggforskningsinstitutt, 1996. *Fordeling av ventilasjonsluft i rom*, *Blad 552.351* [internett]. Tilgjengelig på: <http://bks.byggforsk.no/> [Lest: 30.01.2007]

Swegon, 2006. *Commissioning guide* [internett]. Tilgjengelig på: <http://www.swegon.com/upload/Commissioning/K-factors2006-03.pdf> [Lest: 26.03.2007]

Swegon, 2007. *GRLc, Rectangular egg crate grille* [internett]. Tilgjengelig på: http://www.swegon.com/swegon/templates/ClusterPage_40214.aspx [Lest: 26.03.2007]

Systemair, 2007a. *Teori* [internett]. Tilgjengelig på: <http://www.systemair.no/newsread/ReadImage.aspx?DOCID=9998&IMAGEID=1025> [Lest: 21.03.2007]

Systemair, 2007b. *Tilluft og avtrekksventiler, Sinus-B* [internett]. Tilgjengelig på:
<http://www.systemair.no/newsread/ReadImage.aspx?DOCID=9998&IMAGEID=1025>
[Lest: 26.01.2007]

Systemair, 2007c. *Sinus-B, Installation instructions* [internett]. Tilgjengelig
på: <http://www.systemair.com/techsupp/Installation%20instructions/207%20Air%20Terminal%20Devices/Sinus-B%20IMO.pdf>

Sætren, T., Rehabilitering av skolebygg. Funksjonskontroll av ulike ventilasjonsløsninger i klasserom. (Masteroppgave, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2005)

Sørensen, B. R., Applications and Energy Consumption of Demand Controlled Ventilation Systems. (Doktoravhandling, Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet, 2002)

Sørensen, H. H., Stampe, O. B., Ludvigsen, F. H., *Ventilation Ståbi*. 2. utgave, 3. opplag
København: Teknisk Forlag, 2004

Trondheim kommune, 2007. *Grunnskoler* [internett]. Tilgjengelig på:
<http://www.trondheim.kommune.no/content.ap?thisId=1061793495> [Lest: 11.05.2007]

TSI Incorporated, 1998. *Modell 8360/8382/8383/8388 VelociCalc Plus. Air Velocity Meters. Operation and Service Manual*. [internett]. Tilgjengelig på:
<http://www.tsi.com/documents/1980253c.pdf> [Lest: 03.05.2007]

TSI Incorporated, 2007. *Constant Temperature Thermal Anemometer Theory*. [internett].
Tilgjengelig på: <http://www.tsi.com/documents/TI-105.pdf> [Lest: 03.05.2007]

Ulverud, S. E., Håndbokserien energi- og miljøriktige bygg. Ventilasjon. (Rembra as, 2002)

Vaisala 2006. *USER'S GUIDE. Vaisala CARBOCAP Hand-Held Carbon Dioxide Meter GM70* [internet]. Tilgjengelig på:
<http://www.vaisala.fr/domainesdactivites/instruments/serviceetassistance/manueldutilisation/dioxydedecarbone/gm70%20user%20guide%20in%20english.pdf>
[Lest: 30.01.2007]

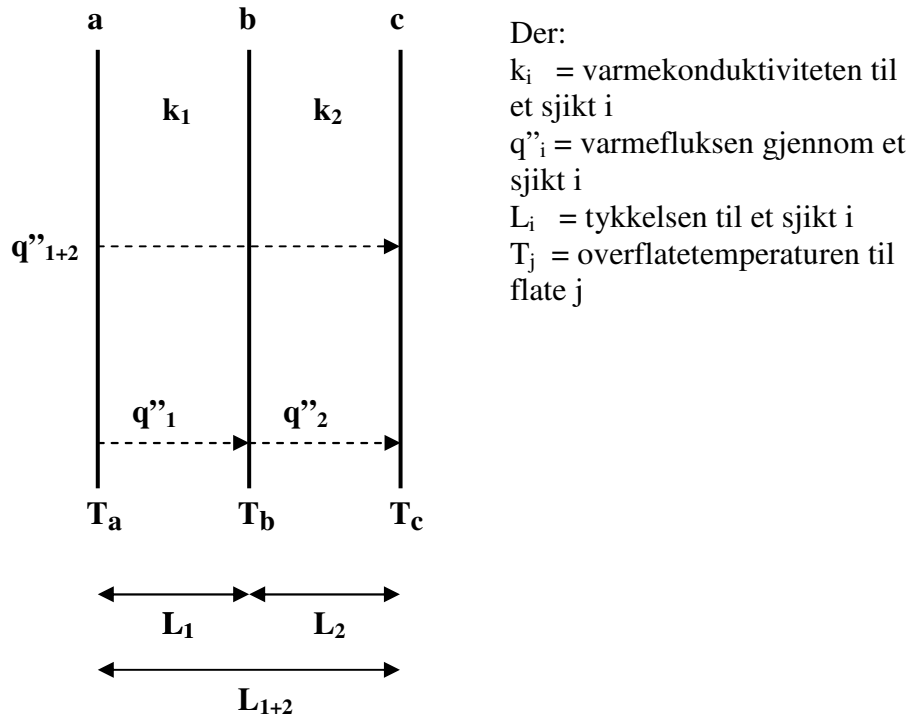
Vaisala, 2007a. *Vaisala CARBOCAP Sensor Technology for Stable Carbon Dioxide Measurement* [internett].Tilgjengelig på:
<http://www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/carbondioxide/vaisala%20carbocap%20c2%ae%20brochure.pdf> [Lest: 30.01.2007]

Vaisala, 2007b. *GM70 Hand-Held Carbon Dioxide Meter for Spot-Checking Applications* [internett]. Tilgjengelig på:
<http://www.vaisala.com/businessareas/instruments/products/carbondioxide/gm70/product%20documentation/brochures/gm70%20brochure%20in%20english.pdf?SectionUri=%2fbusinessareas%2finstruments%2fproducts%2fcarbondioxide%2fgm70%2fproduct%2520documentation&TabDoc=open> [Lest: 30.01.2007]

Waagen, E. S., Førstesekretær ved Charlottenlund barneskole i Trondheim. Privat kommunikasjon, 21.05.2007

Vedlegg 1

Varmekonduktivitet for en vegg som består av flere sjikt



Figur V1-1: Varmefluks gjennom en vegg med flere sjikt

For å beregne en midlere konduktivitet for en vegg som består av flere sjikt kan man benytte Figur V1-1 og utlede sammenhengen nedenfor:

$$q''_{1+2} = q''_1 = q''_2 \quad (1)$$

Som er det samme som:

$$\frac{k_{1+2}}{L_{1+2}} \cdot (T_a - T_c) = \frac{k_1}{L_1} (T_a - T_b) = \frac{k_2}{L_2} (T_b - T_c) \quad (2)$$

Hvilket kan skrives på denne måten:

$$\frac{(T_a - T_c)}{L_{1+2}/k_{1+2}} = \frac{(T_a - T_b)}{L_1/k_1} = \frac{(T_b - T_c)}{L_2/k_2} \quad (3)$$

Ved hjelp av sammenhengen som sier at $a/b = c/d = (a + b)/(c + d)$, kan man skrive (3) på denne måten:

$$\frac{(T_a - T_c)}{L_{1+2}/k_{1+2}} = \frac{(T_a - T_c)}{L_1/k_1 + L_2/k_2} \quad (4)$$

Hvilket gir:

$$\frac{L_{1+2}}{k_{1+2}} = \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} \quad (5)$$

Ved hjelp av (5) kan man nå regne ut en midlere konduktivitet for hele veggen ved å vite tykkelsen og konduktiviteten for hvert enkelt sjikt. Denne sammenhengen gjelder også for vegger med flere enn to sjikt.

Dette vedlegget ble utviklet i samråd med førsteamanuensis Ole Melhus ved Institutt for energi- og prosesssteknikk ved NTNU.

Vedlegg 2

Måling av lufthastigheter i forskjellige avstander fra tilluftsventilen

Verdiene som ble registrert av hastighetsmåleren i ett og samme punkt varierte mye på grunn av turbulens, derfor er verdiene i tabellene basert på en middelvei av 15 registrerte målinger i hvert punkt. Målingene ble foretatt i mørket for å unngå innvirkning av konveksjonsstrømmer fra den varme belysningen. Punktene ble lokalisert ved hjelp av to stykker hyssing. Den ene ble markert for hvert 15 cm og limt fast i taket i 1 m og senere 2 m avstand fra tilluftsventilen. Den andre ble markert i 10 cm avstander og forflyttet for hver 15 cm markering langs den andre hyssingen.

Tabell V2-1: Lufthastigheter i ulike punkter, i avstand 1m fra tilluftsventilen

Horisontal avstand fra strålens senterlinje [cm]	Avstand fra taket [cm]				
	0	10	20	30	40
30	1,04	0,33	0,09	0,07	0,06
15	1,94	1,04	0,13	0,06	0,05
0	2,07	1,34	0,18	0,06	0,06
15	1,64	0,73	0,11	0,05	0,07
30	1,07	0,32	0,10	0,08	0,07

Tabell V2-2: Lufthastigheter i ulike punkter, i avstand 2 m fra tilluftsventilen

Horisontal avstand fra strålens senterlinje [cm]	Avstand fra taket [cm]				
	0	10	20	30	40
30	0,74	0,72	0,37	0,13	0,06
15	1,07	1,04	0,55	0,17	0,05
0	1,21	1,42	0,88	0,18	0,07
15	1,07	1,12	0,49	0,18	0,06
30	0,77	0,7	0,27	0,13	0,06

Den avstanden fra taket som i Tabellene V2-1 og V2-2 er markert med 0 cm, er i virkeligheten litt større (1-2 cm). Dette fordi hastigheten rett under taket i avstand 0 cm vil være 0 m/s, på grunn av heftbetingelsen.

For å få et bedre inntrykk av strålens spredning ble det foretatt ytterligere målinger i horisontal avstand fra strålens senterlinje, 10 cm under taket. Tabell 3 viser resultatene.

Tabell V2-3: Lufthastigheter i ulike avstander horisontalt ut i fra strålens senterlinje

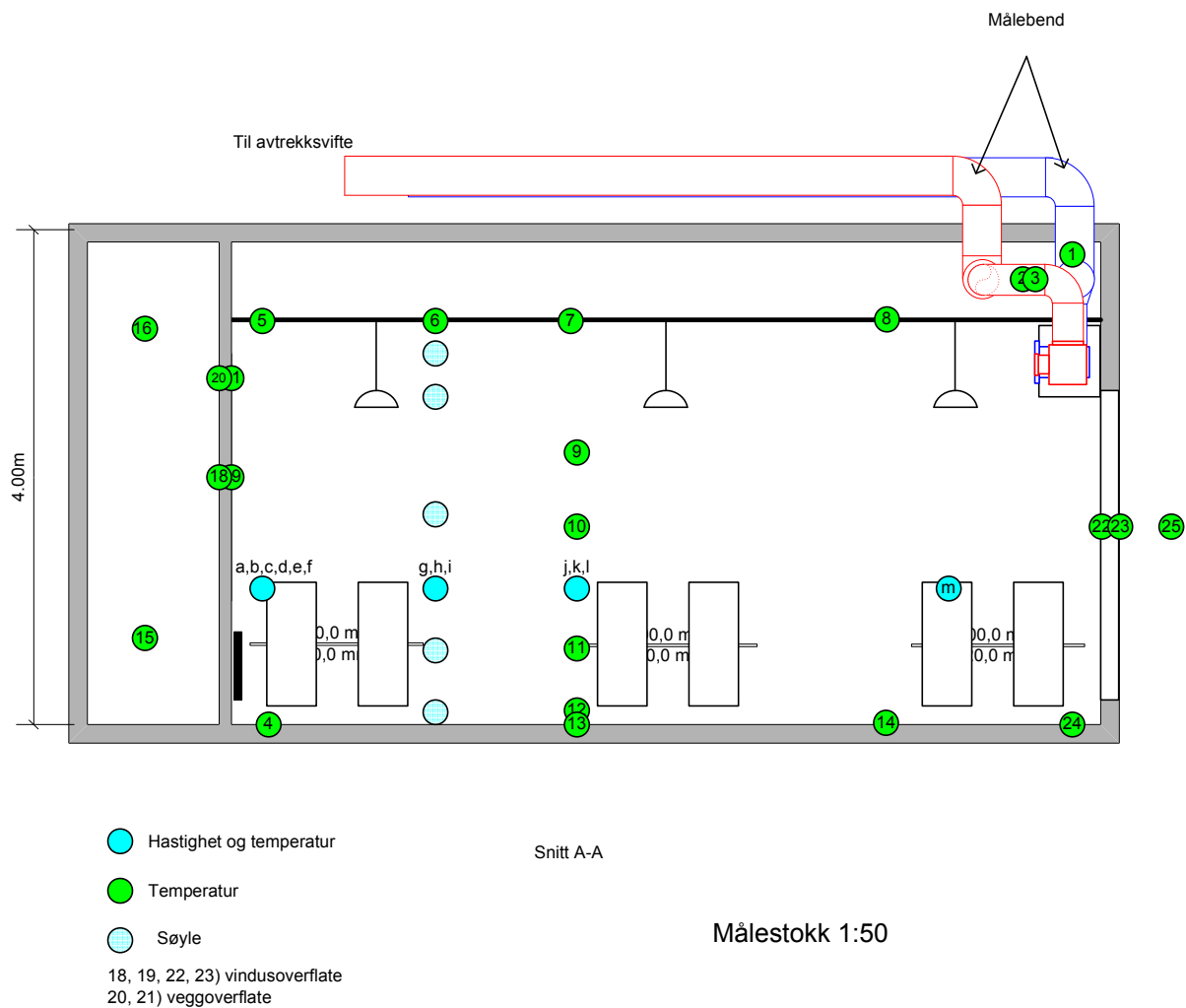
Horisontal avstand fra strålens senterlinje [cm]	1 m fra tilluftsventilen	2 m fra tilluftsventilen
45	0,24	0,66
60	0,1	0,44
75	0,08	0,34
90	0,08	0,28
105	0,08	0,17
120		0,15

Verdiene som ble notert lengst unna strålens senterlinje kan være påvirket fra lufttilførsel fra de to andre ventilene i rommet.

Vedlegg 3

Oversikt over plasseringen av termoelementer i testrommet

Termoelementene er blitt plassert i testrommet ved et tidligere tidspunkt og ikke i forbindelse med denne oppgaven. Figurene V3-1 og V3-2 nedenfor, som viser oversikten for målepunktene sett fra to forskjellige perspektiver er også blitt laget før. De er blitt tatt med her fordi den samme oppstillingen ble brukt i denne oppgaven for å måle temperaturer på forskjellige steder i rommet.



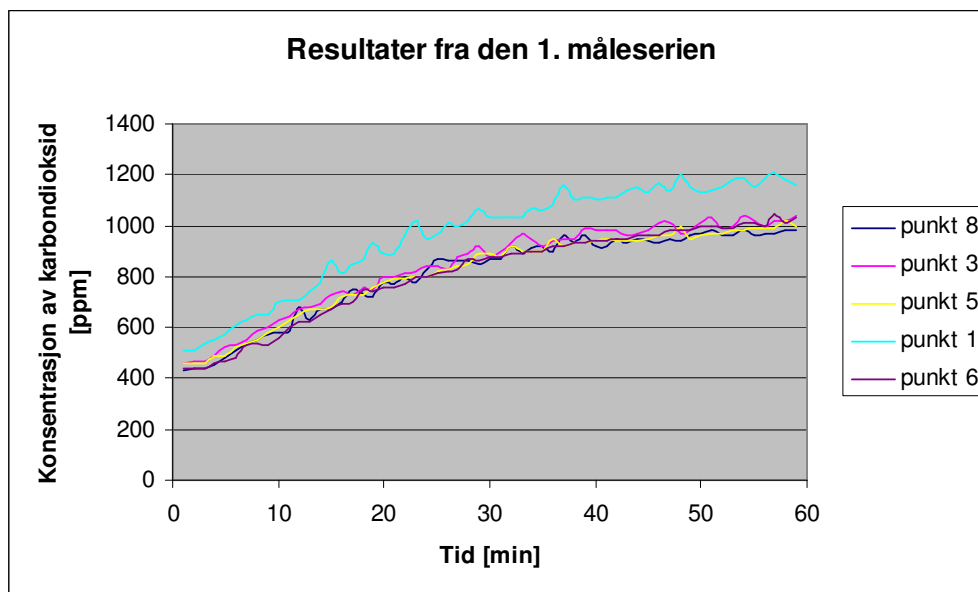
Figur V3-1: Oversikt over målepunkter for temperatur i testrommet, sett fra døren og inn i rommet

Vedlegg 4

Figurene nedenfor viser resultater fra måleserier som ikke ble tatt med i Kapittel 9.

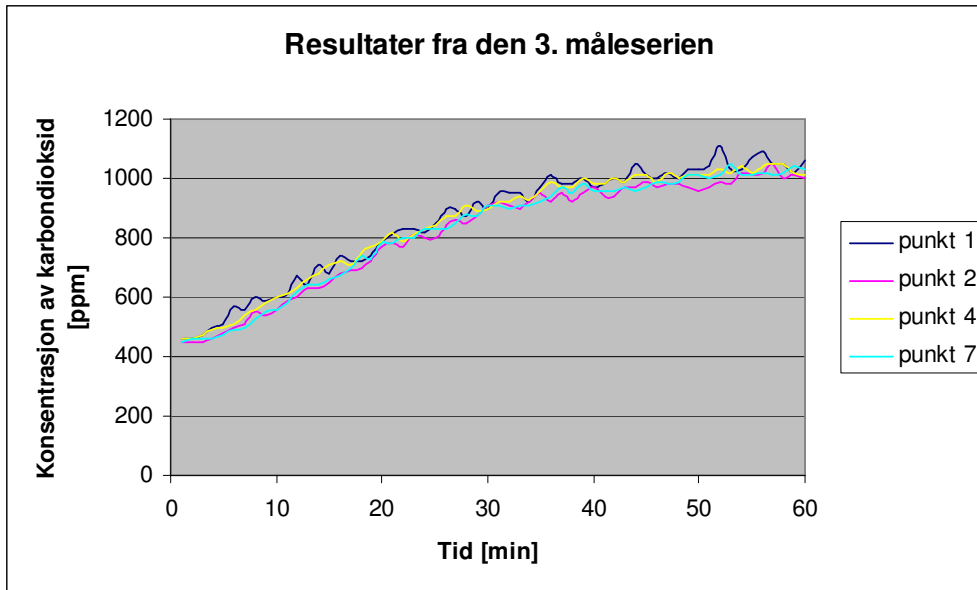
Kartlegging av spredningen av CO₂ i testrommet

Pustesonen

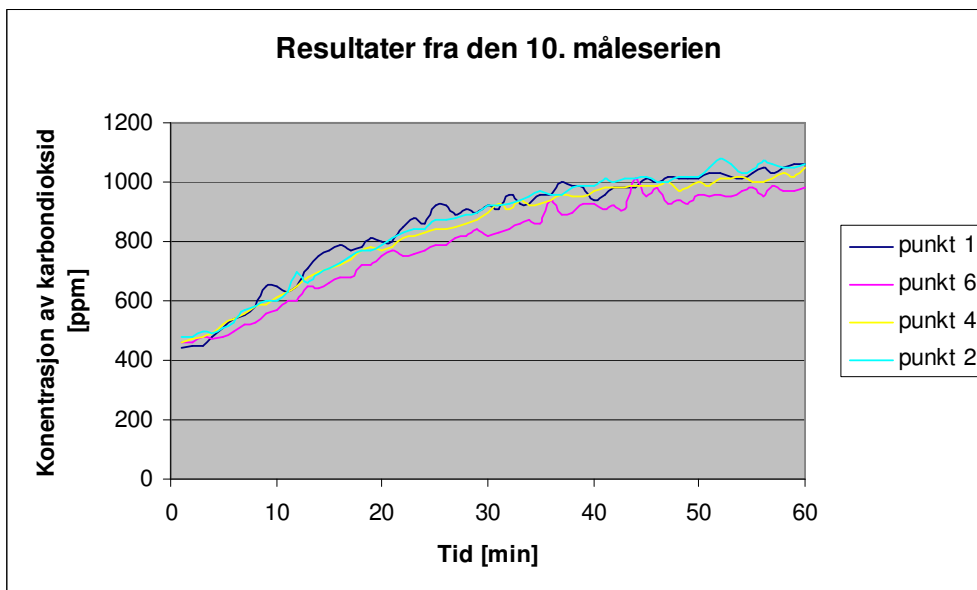


Figur V4-1: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, sommertilstand

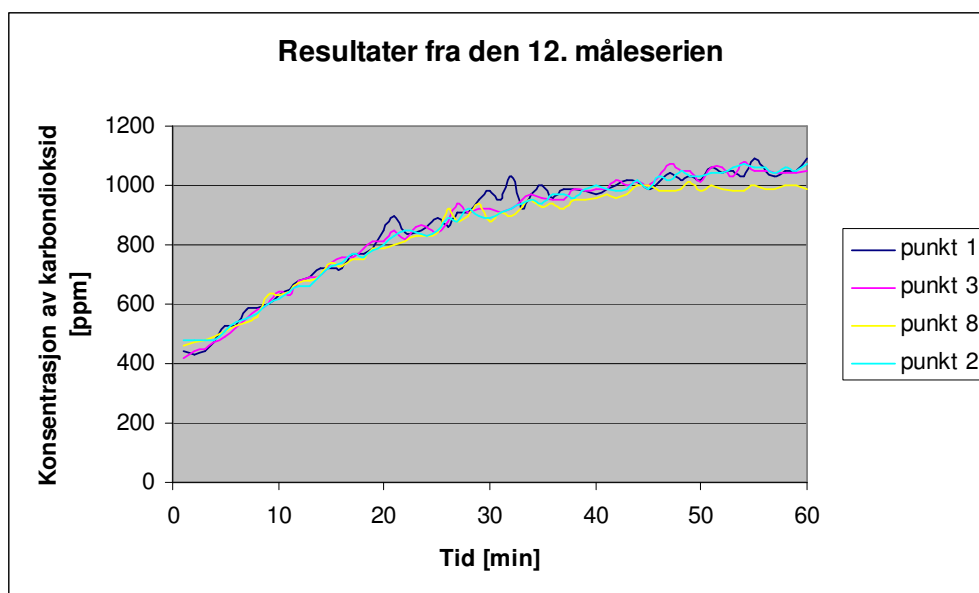
Figur V4-1 viser resultatene fra den første måleserien. Ved å betrakte grafen ble det konkludert at det var noe som ikke stemte med måleinstrumentet i punkt 1, siden de registrerte verdiene var betydelig høyere enn i de andre punktene. Derfor ble dette instrumentet levert inn for kalibrering.



Figur V4-2: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, sommertilstand



Figur V4-3: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, vintertilstand



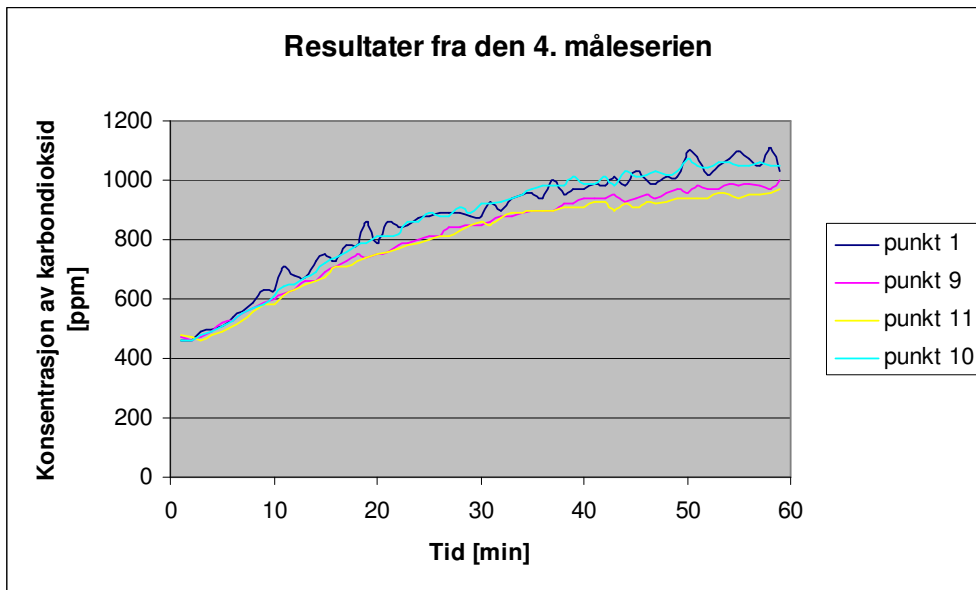
Figur V4-4: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i pustesonen, vintertilstand

Andre punkter i rommet

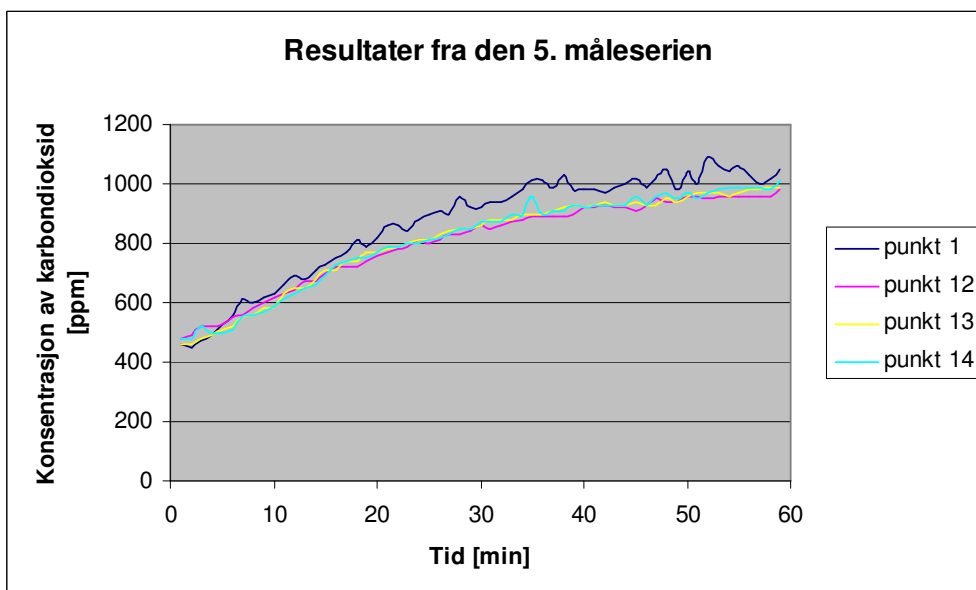
Tabell V4-1: Oversikt over variansen til det prosentuelle avviket til konsentrasjonsvariasjonen i et punkt i forhold til referansepunktet i pustesonen med dårligst luftkvalitet

	Punkt	Måleserie	Varians		Punkt	Måleserie	Varians
	Sommer	9	4		0,00116	Vinter	9
10		4	0,00105	10	14		0,00167
11		4	0,00137	11	13		0,00132
12		5	0,00239	12	15		0,00091
13		5	0,00094	13	15		0,00134
14		5	0,00157	14	14		0,00255
15		6	0,00069	15	15		0,00088
16		6	0,00077	16	15		0,00132
17		6	0,00122	17	16		0,00111
18		7	0,00096	18	16		0,00080
19		7	0,00083	19	16		0,00136
20		7	0,00077	20	16		0,00138
21		8	0,00075	21	17		0,00141
22		8	0,00079	22	17		0,00128
23	8	0,00090	23	17	0,00072		
24	9	0,00118	24	13	0,00154		
25	9	0,00095	25	13	0,00194		
26	9	0,00096	26	14	0,00160		

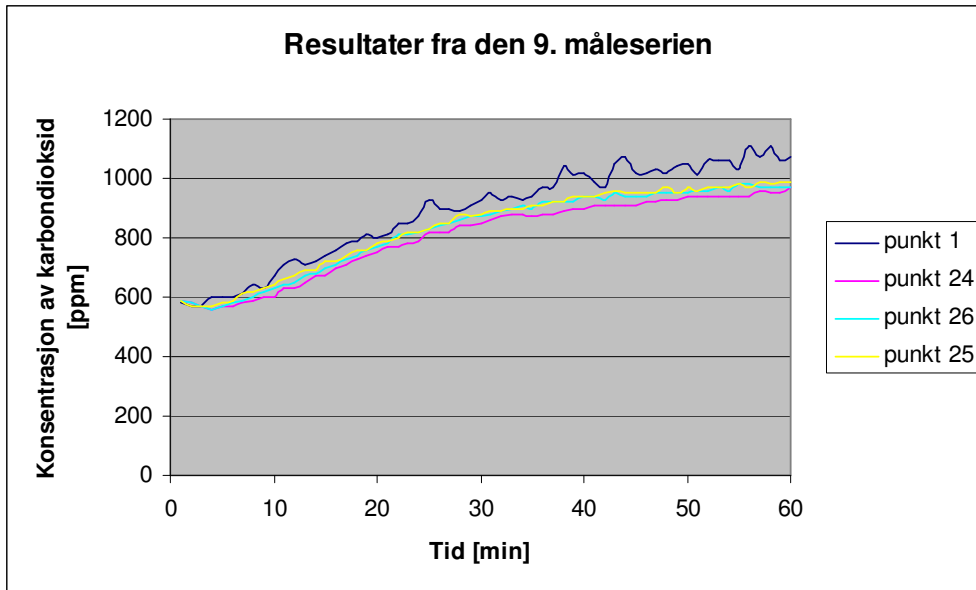
Verdiene som er skrevet med rødt i Tabell V4-1 markerer de punktene hvor avviket er mest konstant.



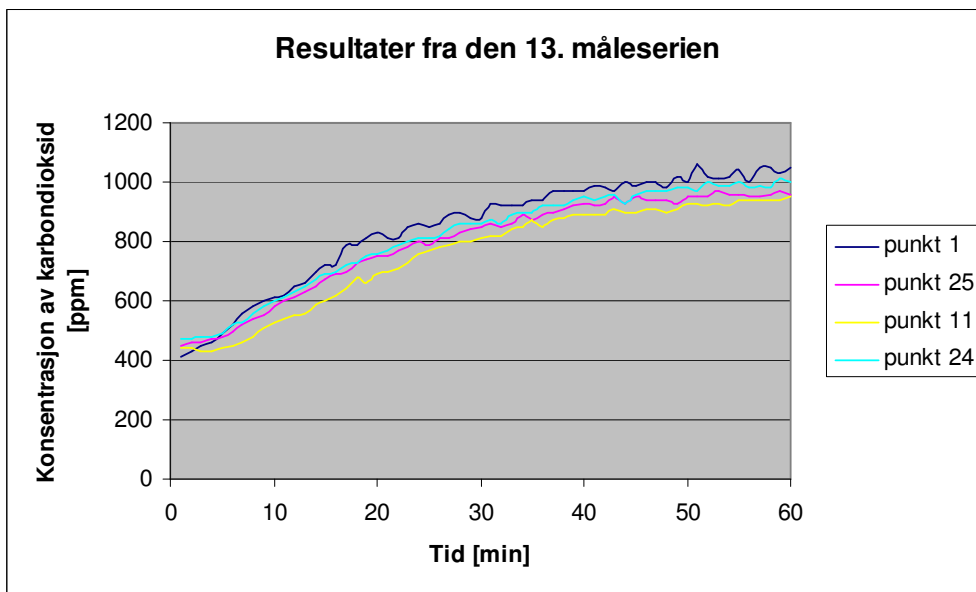
Figur V4-5: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand



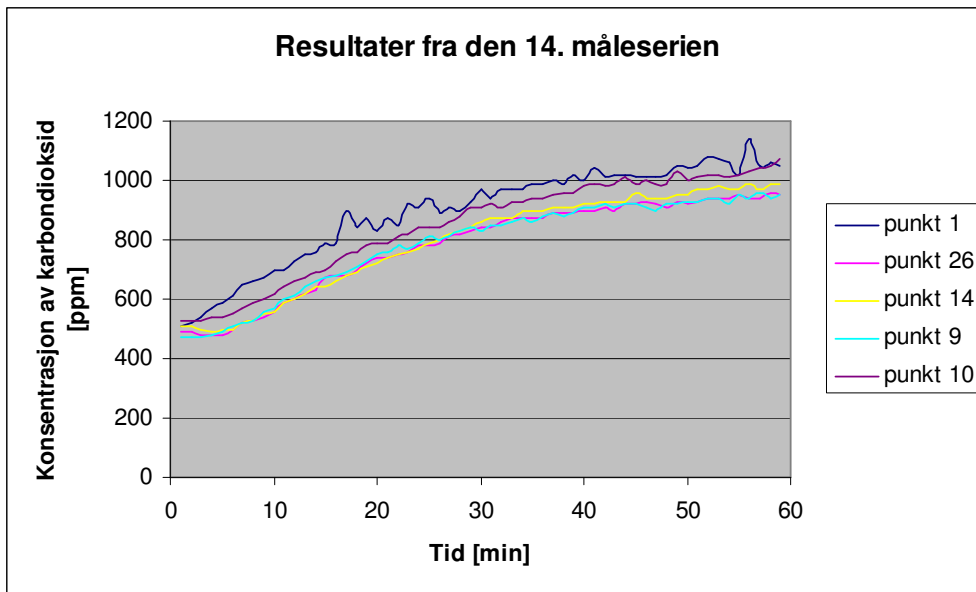
Figur V4-6: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand



Figur V4-7: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, sommertilstand



Figur V4-8: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, vintertilstand



Figur V4-9: Konsentrasjonsvariasjon i forskjellige punkter i rommet, vintertilstand