

Undersøkelse av aktiv fortrengningsventilasjon for bruk i klasserom

Hanne Liland Bottolfsen

Master i energi og miljø

Innlevert: juni 2014

Hovedveileder: Per Olaf Tjelflaat, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for energi- og prosesseteknikk

EPT-M-2014-18

MASTEROPPGAVE

for

Student Hanne Liland Bottolfsen

Våren 2014

Undersøkelse av aktiv fortrenningsventilasjon for bruk i klasserom*Investigation of active displacement ventilation for use in class rooms***Bakgrunn og målsetting**

Klasserom karakteriseres ved relativt høy personbelastning mesteparten av skoledagen og at det ellers er svært lav belastning av forurensninger og varmeavgivelse.

I dag bygges de fleste skoler som passivhus, og varmetransmisjon gjennom fasaden blir dermed svært. Selv i vinterhalvåret er det derfor en viktig oppgave for ventilasjonen å fjerne den varmen som produseres av de tilstedeværende i klasserommet.

For at læremiljøet skal være best mulig må opplevd luftkvalitet og termisk komfort være tilfredsstillende for elevene.

Visjonen er å oppnå tilfredsstillende inneklimate med lavest mulig resulterende klimagassutslipp for ventilasjon, oppvarming og kjøling ved klimatisering av klasserom. Bruk av behovsstyrt av ventilasjon og lavemitterende materialer er forutsatt.

Klimagassutslipp er relatert til oppvarming, kjøling og transport av ventilasjonsluft. Luftmengdebehovet er sentralt når resulterende klimagassutslipp skal minimaliseres.

Målet med oppgaven er å analysere hvordan ventilasjon av klasserom med lav tilluftmengde og lav tillufttemperatur kan gi tilfredsstillende luftkvalitet og termisk komfort. Hypotesen er at aktiv fortrenningsventilasjon vil være den beste løsningen for å oppnå dette.

Aktuelle scenarier for tilluftløsninger for ventilasjon i naturlig ventilerte klasserom skal utarbeides ut fra teori og litteraturstudier. Scenariene skal så analyseres ved bruk av et CFD-verktøy. Det skal primært fokuseres på termiske forhold, luftfuktighet og konsentrasjon av utåndet CO₂. Det fokuseres på scenarier med vinterforhold, dvs. utetemperatur under 17°C.

Oppgaven bearbeides ut fra følgende punkter

- 1 Lage en oversikt over, og karakterisering av, ulike ventilasjonsløsninger for klasserom basert på teori og litteraturundersøkelser.
- 2 Uarbeide aktuelle scenarier for klasseromsventilasjon.
- 3 Analysere noen scenarier for romventilasjon ved hjelp av CFD og eksisterende empiriske metoder.

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

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

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

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

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

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

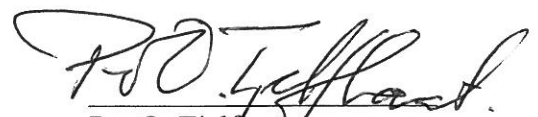
Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, institutt navn, og NTNUs logo og navn, leveres til instituttet som en separat pdf-fil. Etter avtale leveres besvarelse og evt. annet materiale til veileder i digitalt format.

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

NTNU, Institutt for energi- og prosesssteknikk, 27. januar 2014



Olav Bolland
Instituttleder



Per O. Tjellaa
Faglig ansvarlig/veileder

Forord

Denne masteroppgaven ble skrevet ved Institutt for Energi- og Prosessteknikk ved Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim våren 2014. Oppgaven er skrevet som en spesialisering innen Energibruk i bygninger ved sivilingeniørstudiet Energi og miljø.

Temaet for oppgaven omfatter inneklime i skoler og hvordan et godt resultat kan oppnås ved å benytte en ventilasjonsløsning hvor lavt energibruk står i fokus. Deler av oppgaven bygger på prosjektoppgave som ble skrevet høsten 2013.

Jeg vil benytte anledningen til å takke veilederen min Per Olaf Tjelflaat for god veiledning, hjelp til å finne litteratur og for å ha bidratt med sin faglige kunnskap innen ventilasjonsfaget. Jeg ønsker også å takke familien som har bidratt med motiverende ord og støtte underveis i masteroppgaven og studietiden. Og ikke minst vil jeg takke alle venner som jeg har fått i løpet av mine fem år på NTNU for mange minnerike opplevelser. Trondheim har virkelig levd opp til ryktet som Norges beste studentby.



Hanne Liland Bottolfsen

Trondheim 19.06.2014

Sammendrag

For å skape et best mulig læremiljø i skolen spiller inneklimate i klasserommet en viktig rolle. I denne oppgaven er inneklimate knyttet til termiske forhold som temperatur og trekk samt atmosfæriske forhold hvor luftkvalitet er definert ut fra CO₂-konsentrasjonen i rommet.

Oppgaven tar for seg en ventilasjonsløsning som kan defineres som et hybrid, bygningsintegret ventilasjonsanlegg hvor tilluften føres inn i bygget via en kulvert. For å oppnå høy ventilasjonseffektivitet benyttes fortreningsprinsippet i form av aktiv fortrenning. Målet er å oppnå et tilfredsstillende inneklimate ved å benytte en lav tilluftsmengde og lav tilluftstemperatur. Simuleringer for et klasserom er utført med CFD-verktøyet ANSYS Fluent. Resultatene fra simuleringen er benyttet til å studere om ventilasjonsløsningen fungerer som forventet og er sammenlignet med beregningsmodeller for samme klasserom. For en ventilasjonsløsning som denne er det hovedsakelig vinterforhold som er av interesse da erfaringer viser at problemer i forhold til trekk og høye konsentrasjoner av CO₂ kan forventes.

Resultater fra simuleringene viste blant annet at:

- Den vertikale temperaturgradienten fra ankel til hodehøyde er liten.
- CO₂-konsentrasjonen er under maksverdien på 600 ppm over utendørsnivå for samtlige simuleringer.
- Ventilasjonseffektiviteten har en gjennomsnittsverdi på 1,18 og samtlige simuleringer kommer bedre ut enn ideell omrøring.
- Det er en risiko for trekk dersom nærsone ikke er tilstrekkelig.
- Lavere tilluftstemperatur kan benyttes uten betydelig økning i trekkfaren sammenlignet med ideell omrøring og fortrenning ved gulv. Dette er en fordel ved kjølebehov.

Abstract

The indoor climate in a classroom plays an important role in creating a good learning environment for the students. For this thesis indoor climate is related to thermal indoor climate conditions such as temperature and draught and atmospheric conditions where air quality is defined from the CO₂ concentration in the room.

A ventilation system which can be defined as a hybrid, building integrated ventilation system where the supply air enters the building through a culvert is studied. To achieve high ventilation efficiency displacement in terms of active displacement is used for air supply in the classrooms. The goal is to achieve a satisfactory indoor environment using a low supply airflow and low supply air temperature. Simulations of a classroom are performed with the CFD tool ANSYS Fluent. The results of the simulation are compared with calculated values for the same situation. This way an evaluation of the ventilation efficiency can be done and a validation of whether or not the ventilation will perform as expected. For this type of ventilation a focus on the winter conditions will be of great importance due to experiences related to problems such as draught and high concentrations of CO₂.

Results from the simulations showed that:

- The vertical temperature gradient from ankle to head height is small.
- CO₂ concentrations are less than 600 ppm above outdoor level for all simulations.
- The ventilation efficiency has an average value of 1,18 and all simulations shows a better efficiency compared to ideal mixing.
- There is a risk of draught if the distance from the supply wall is not sufficient.
- A lower supply air temperature can be used without increasing the risk of draught compared to ideal mixing and displacement flow supplied at floor level. This can be an advantage for cooling load.

Innhold

1	Introduksjon	1
2	Teori	3
2.1	Inneklima	3
2.1.1	Termisk komfort	3
2.1.2	Innendørs forurensing	4
2.1.3	Internt varmetilskudd	6
2.1.4	Kaldras	7
2.1.5	Luftmengder i henhold til TEK10	8
2.1.6	PMV/PPD	8
2.1.7	Krav til inneklima i klasserom	9
2.2	Ventilasjonsmodeller	10
2.2.1	Generelle krav til ventilasjon	10
2.2.2	Behovsstyrt ventilasjon (DCV)	12
2.2.3	Sensorer	13
2.2.4	Balansert ventilasjon	13
2.2.5	To-sone modell	13
2.2.6	Fortrengningsventilasjon	14
2.2.7	Omrøringsventilasjon	14
2.2.8	Nærsone	16
2.2.9	Naturlig ventilasjon	16
2.2.10	Mekanisk ventilasjon	16
2.2.11	Hybrid ventilasjon	17
2.3	Luftstrømmer	18
2.3.1	Fri konveksjonsstrøm/termisk stråle	18
2.3.2	Konveksjonsstrømmer langs varme/kalde flater	21
2.3.3	Vertikal stråle med oppdrift	22
2.3.4	Archimdestallet	23
2.4	Ventilasjonseffektivitet	24
2.4.1	Ventilasjonseffektivitet for termiske forhold	24
2.5	Ventilering av skoler	25
2.5.1	Kulvertventilasjon	25

2.5.2	Fasadeventilasjon	28
2.6	Computational Fluid Dynamics (CFD).....	28
2.6.1	CFD i denne oppgaven	28
2.6.2	Hva er CFD?.....	28
2.6.3	Energilikningen	29
2.6.4	k-ε turbulens modell	29
2.6.5	Mach nummer.....	30
2.6.6	Strålingsmodell – Surface to surface.....	31
3	Modell	35
3.1	Valgt løsning.....	35
3.1.1	Kulvert.....	35
3.1.2	Vifter.....	36
3.1.3	Filter	36
3.1.4	Varmegjenvinning	36
3.1.5	Tilluftsventiler	37
3.1.6	Avtrekk	37
3.1.7	Strømning	37
3.1.8	To sone-modell.....	37
3.1.9	Regulering	38
3.1.10	Energiltak	38
3.1.11	Oppvarming	39
3.1.12	Klimagassutslipp	39
3.1.13	Begrensninger.....	40
3.1.14	Eksempler på liknende ventilasjonsløsninger.....	41
3.2	Personmodell	47
3.3	Modell i ANSYS Fluent	49
3.3.1	Geometri	49
3.3.2	Meshing	50
3.3.3	Set up	51
4	Dimensjonering	53
4.1	Beregningsmodeller	53
4.1.1	Varmebalance	53
4.1.2	Tilluft.....	54

4.1.3	Massebalanse for CO ₂	58
4.1.4	Temperaturgradienter	58
4.2	Ventilasjonsdesign	59
4.2.1	Plassering av tilluftsventiler	61
4.3	Scenarier	62
4.3.1	Variierende tilluftstemperatur.....	63
4.3.2	Redusert personbelastning.....	64
5	Resultater.....	67
5.1	Simuleringsbetingelser.....	67
5.2	Variierende tilluftstemperatur	67
5.2.1	Hastighetsvektor	68
5.2.2	Temperaturfordeling.....	69
5.2.3	Fordeling av CO ₂ -konsentrasjon	72
5.2.4	Hastighetslinjer.....	75
5.3	Redusert personbelastning	78
5.3.1	Luftmengde for fullt klasserom	79
5.3.2	Redusert luftmengde.....	80
6	Diskusjon.....	83
6.1	Vurdering av simuleringsresultater.....	83
6.1.1	Ventilasjonseffektivitet.....	83
6.1.2	Termisk komfort.....	83
6.1.3	Atmosfærisk miljø.....	84
6.2	Sammenligning med andre ventilasjonsløsninger	85
6.2.1	Fordeling av forurensning	85
6.2.2	Temperaturfordeling.....	89
6.2.3	Strømningsmønster for forurensning rundt person.....	91
6.3	Utelatte elementer	93
6.3.1	Bevegelse i rommet	93
6.3.2	Varmetap og varmetilskudd.....	93
6.3.3	Forurensning fra materialer	93
6.4	Kvalitet på simuleringsmodellen	94
7	Konklusjon	95
8	Framtidig arbeid	97

Litteraturliste	98
Vedlegg.....	i
A. Konveksjonsstrøm over personer	i
B. Verdier og sammenhenger for dimensjonering	iv
C. Input i Fluent	v
D. Plassering av målepunkt	x

Tabeller

Tabell 2-1 Innemiljøkrav i klasserom	9
Tabell 2-2 Eksempler på lokaler og aktuelle styringsparametere.....	13
Tabell 2-3 Fordeler og ulemper ved fortrennings- og omrøringsventilasjon	15
Tabell 2-4 Naturlig og mekanisk ventilasjon - fordeler og ulemper	17
Tabell 2-5 Målte og eksperimentelle verdier for konveksjonsstrøm fra en person	20
Tabell 2-6 Konveksjonsstrøm beregnet ut fra valgt personmodell.....	20
Tabell 2-7 Emissivitet, absorptans og reflektans for noen materialer	31
Tabell 3-1 Dimensjonering av filtre	36
Tabell 3-2 Anbefalte dimensjoneringsverdier fra Byggforsk	36
Tabell 3-3 Verdier bruk for sittende personer i Fluent.....	48
Tabell 3-4 Isoleringverdi for typiske beklædninger.....	48
Tabell 3-5 Overflatearealer i Fluent-modell.....	50
Tabell 3-6 Inndeling av elementer etter navn og type.....	50
Tabell 4-1 Dimensjoneringsparametere.....	60
Tabell 4-2 Beregnede luftmengder for tilluft	63
Tabell 4-3 Beregnede verdier for temperatur og CO ₂ med varierende tilluftstemperatur.....	63
Tabell 4-4 Luftmengder ved halv personbelastning	64
Tabell 4-5 Beregnede verdier for temperatur og CO ₂ ved redusert person belastning..	65
Tabell 5-1 Simuleringsresultater: massestrøm og volumstrøm for tilluft og avtrekk.....	67
Tabell 5-2 Simuleringsresultater: temperatur og CO ₂	68
Tabell 5-3 Simuleringsresultater ved redusert personbelastning: massestrøm og volumstrøm for tilluft og avtrekk	78
Tabell 5-4 Simuleringsresultater ved redusert personbelastning: temperatur og CO ₂ ..	78
Tabell 6-1 Ventilasjons- og temperatureffektiviteter	83
Tabell 6-2 CO ₂ - konsentrasjoner over utendørsnivå	84
Tabell 6-3 Størrelse nettet lagt i Fluent	94
Tabell 6-4 Skjevhet i nettet.....	94
Tabell 6-5 Ortogonal kvalitet	94

Figurer

Figur 2-1 Termisk balanse	3
Figur 2-2 Kaldras langs vindusvegg	7
Figur 2-3 Sammenheng mellom PMV og PPD	8
Figur 2-4 Sammenheng mellom antall misfornøyde og CO ₂ over utendørsnivå	10
Figur 2-5 Hierarkisk design for ventilasjonssystemer	11
Figur 2-6 Konstante- og behovsstyrteluftmengder	12
Figur 2-7 Fortrengningsventilasjon med tilførsel ved gulv	14
Figur 2-8 Omrøringsventilasjon	15
Figur 2-9 Fri konveksjonsstrøm/ termisk stråle	18
Figur 2-10 Konveksjonsstrøm fra stillesittende person	21
Figur 2-11 Konveksjonsstrøm langs vertikalflate	22
Figur 2-12 Vertikal stråle tilført fra tak	22
Figur 2-13 Den svenske modellen	26
Figur 2-14 Den norske modellen	27
Figur 2-15 Temperaturkontur uten strålingsmodell	33
Figur 2-16 Temperaturkontur ved bruk av strålingsmodell	33
Figur 3-1 To-sone modell	38
Figur 3-2 Aktiv fortrengning for industriell ventilering	41
Figur 3-3 Trox Technik fortrengningsventil	42
Figur 3-4 Ventilasjonsprinsipp brukt i Fredkulla- og Risebergsskolen	43
Figur 3-5 Løsning for hybrid ventilasjonsanlegg ved Kvernhuset ungdomsskole	45
Figur 4-1 Modell av klasserom	54
Figur 4-2 Halv konveksjonsstrøm fra en kald punktkilde plassert i taket	55
Figur 4-3 Luftmengder gitt av kjøleeffekten fra en kald punktkilde, 5 ventiler	56
Figur 4-4 Luftmengder gitt av kjøleeffekten fra en kald punktkilde, 3 ventiler	57
Figur 5-1 Hastighetsvektor. T _s = 12 °C	69
Figur 5-2 T _s = 10 °C: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer	70
Figur 5-3 T _s = 12 °C: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer	70
Figur 5-4 T _s = 14 °C: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer	71
Figur 5-5 T _s = 16 °C: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer	71
Figur 5-6 T _s = 10 °C: CO ₂ -konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer	72
Figur 5-7 T _s = 12 °C: CO ₂ -konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer	73
Figur 5-8 T _s = 14 °C: CO ₂ -konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer	73
Figur 5-9 T _s = 16 °C: CO ₂ -konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer	74
Figur 5-10 T _s = 12 °C: CO ₂ - konsentrasjon. Tverrsnitt bakerst i rommet	74
Figur 5-11 T _s = 10 °C: Hastighetsfordeling i rommet	76
Figur 5-12 T _s = 12 °C: Hastighetsfordeling i rommet	76
Figur 5-13 T _s = 14 °C: Hastighetsfordeling i rommet	77
Figur 5-14 T _s = 16 °C: Hastighetsfordeling i rommet	77
Figur 5-15 Redusert personbelastning, luftmengde ikke justert. Temperaturfordeling	79
Figur 5-16 Redusert personbelastning, luftmengde ikke justert. Hastighetsfordeling	80
Figur 5-17 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned. Temperaturfordeling	81

Figur 5-18 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned. CO ₂ - konsentrasjon. ...	81
Figur 5-19 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned. Hastighetsfordeling. ...	82
Figur 6-1 Resultat fra eksperiment med to ulike forurensningskilder:	
temperatur- og forurensningsfordeling	85
Figur 6-2 T _s = 10 °C: Forurensningsgrad.....	87
Figur 6-3 T _s = 12 °C: Forurensningsgrad	87
Figur 6-4 T _s = 14 °C: Forurensningsgrad	88
Figur 6-5 T _s = 16 °C: Forurensningsgrad	88
Figur 6-6 Temperaturfordeling.....	89
Figur 6-7 Strømningsmønster for forurensning: aktiv fortregning med en tilluftsmengde på 7 l/s/person.....	91
Figur 6-8 Strømningsmønster for forurensning: fortregningsventilasjon ved gulvnivå	92
Figur 6-9 Strømningsmønster for forurensning: omrøringsventilasjon	92

1 Introduksjon

Barn i skolealder tilbringer store deler av hverdagen inne i klasserom og dette krever et inneklima som bidrar til økt produktivitet og læringsutbytte for elevene.

Opplæringsloven sier at alle elever i grunnskoler og videregående skoler har rett til et god fysisk miljø som fremmer helse, trivsel og læring [2]. For et optimalt inneklima må krav knyttet til termisk, atmosfærisk og mekanisk miljø i tillegg til lyd- og lysforhold være opprettholdt.

Ventilasjonsanlegg for et klasserom må dimensjoneres for å skape et tilfredsstillende termisk klima, opprettholde luftfuktigheten og sørge for en god luftkvalitet. Et mål på luftkvalitet som ofte benyttes i klasserom er konsentrasjon av utåndet CO₂.

Kjøleeffekten til ventilasjonssystemet er en viktig funksjon da klasserom karakteriseres ved høy personbelastning og høyt internt varmetilskudd. Med strengere krav i tekniske forskrifter til bygningers tetthet og varmetransmisjon gjennom fasader blir oppgaven med å fjerne varmen som produseres av tilstedeværende personer viktig både vinter og sommer.

Et alternativt ventilasjonssystem med lav tilluftsmengde og lav tilluftstemperatur er blitt tatt for seg. Løsningen kan defineres som et hybrid ventilasjonsanlegg hvor ventilasjonsluften tas inn via en kulvert. Med fokus på å redusere trykktapet i alle ledd av systemet er målet å redusere behovet for energi til viftedrift uten at det går på bekostning av kvaliteten på inneklimaet. Luften blir tilført klasserommet ved takhøyde og faller mot gulvet som en form for fortreningsventilasjon. Prinsippet er omtalt som aktiv fortrenning og benyttes for å øke ventilasjonseffektiviteten. Lav tilluftsmengde og lav hastighet gjør at interne varmekilder og konveksjonsstrømmer har større betydning for strømningsbildet i rommet og ved dimensjonering er dette viktig å ta hensyn til.

Simuleringer er blitt utført med ANSYS Fluent som er et computational fluid dynamics (CFD) simuleringsprogram. Resultatene benyttes til å vurdere termisk komfort, luftkvalitet og hastighetsvektorer i et klasserom. Et sammenligningsgrunnlag for kvaliteten på simuleringen er formet gjennom å utføre beregninger for aktuelle scenarier. Resultater fra simuleringene viste at det største problemet i forhold til inneklima er risikoen for trekk.

Første del av oppgaven består av generell bakgrunnsinformasjon og teori knyttet til inneklima, luftstrømmer, ventilasjonsmodeller og ventiler av skoler. En introduksjon til CFD og ANSYS Fluent er også inkludert. Oppbyggingen og elementene til den valgte ventilasjonsløsningen er presentert og for å definere aktuelle fokusområder for simuleringsresultatene er det sett på erfaringer fra skoler som benytter liknende løsninger. Videre følger en del om framgangsmåten for modellen og valg av grensebetingelser i ANSYS Fluent.

Beregningene bygger på varmebalansen og massebalanser for rommet og forslag til eventuelle dimensjoneringsparametere ved bruk av aktiv fortregning er gitt. Simuleringer er utført for ulike temperaturer på tilluften og for et tilfelle med redusert personbelastningen. De viktigste resultatene fra simuleringen er vurdert opp mot beregningsmodeller og anbefalte verdier for inneklime. Løsningen er også sammenlignet opp mot ideell omrøringsventilasjon og tradisjonell fortregning med tilførsel ved gulv.

2 Teori

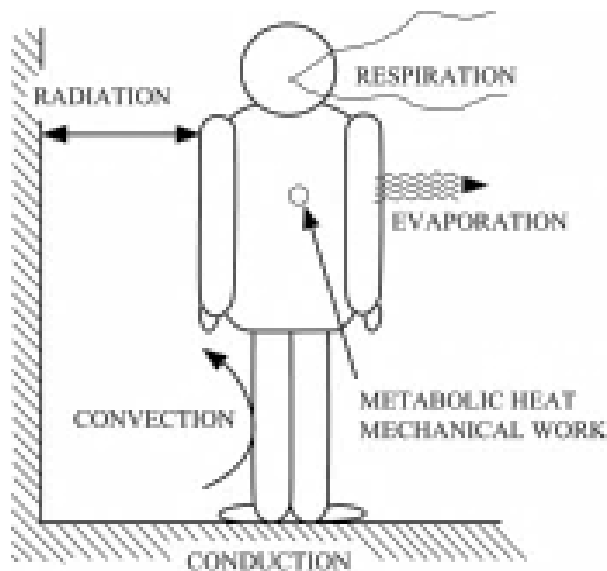
Da oppgaven bygger på prosjektoppgave fra høsten 2013 består deler av kapittel 2 av samme teori som ble benyttet der.

2.1 Inneklima

Inneklima er i denne oppgaven knyttet til termiske forhold som temperatur, trekk og fukt og atmosfæriske forhold som luftkvalitet, luftmengder og konsentrasjon av forurensning. Generelt vil definisjonen av et godt inneklima i et klasserom inkludere flere faktorer i tillegg til termiske og atmosfæriske. For eksempel vil det atmosfæriske miljøet avhenge av både det termiske og aktiniske miljøet (belysning, radon, stråling etc.). Når det gjelder akustikk og lydforhold kan dette knyttes opp mot ventilasjon i form av støy fra anlegget. Et ventilasjonsanlegg som gir minimalt med støy er viktig.

2.1.1 Termisk komfort

En generell definisjon av termisk komfort er gitt som «en sinnstilstand der man uttrykker full tilfredshet med termiske omgivelser» [3]. Typiske parametere som har innvirkning på termisk komfort er luftens tørrkuletemperatur, hastighet, turbulens, vandampinnhold, termisk stråling i rommet og personers aktivitetsnivå (antall Met). I tillegg kan faktorer som oppholdstid, oppholdssted, termiske egenskaper for bygningen og møblement, påkledning (i clo), alder, kjønn, metthetsfølelse og sinnstilstand påvirke hvordan de termiske omgivelsene oppfattes.



Figur 2-1 Termisk balanse[4]

For at de de termiske omgivelsene skal føles behagelig må varmeavgivelsen fra kroppen til omgivelsene være like stor som kroppens varmeproduksjon. Forskyves kroppstemperaturen med mer enn 0,5 °C kan det oppleves som ubehag. En annen betingelse er termisk nøytralitet med omgivelsene som vil si at man ikke har noe ønske om høyere eller lavere temperatur. At kroppen som helhet er termisk nøytral er likevel ikke alltid tilstrekkelig.

Lokal avkjøling i form av trekk og store temperaturgradienter som for eksempel kan oppstå ved for kaldt gulv, kan også gjøre personer utilfreds med omgivelsene. Følelsen av komfort oppstår når kroppen ikke utsettes for stress i form av kulde eller varme og bestemmes ut fra fysiologiske kriterier. De fysiologiske kriteriene som må overholdes er en overflatetemperatur for huden på 32 til 34 °C, en kjernetemperatur på 37 °C og at svette eller graden av våt hud er $< 0,25$.

2.1.2 Innendørs forurensing

I henhold til *Forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler* [5] er luftkvaliteten tilfredsstillende når luften ikke inneholder forurensninger i skadelige konsentrasjoner samt når den oppleves som frisk, behagelig og ikke føles gammel, tung og irriterende [5]. For et klasserom er det først og fremst forurensninger fra innendørskilder som vil gi dårlig luftkvalitet.

Forskjellige enheter er innført for å kunne utføre mål på luftkvalitet og hvordan den oppfattes. *Byggetaljer 421.503 Krav til luftmengder i ventilasjonsanlegg* [6] definerer blant annet måleenhetene olf og decipol:

- 1 olf kan defineres som emisjonsraten av forurensninger, også kalt bioeffluenter, fra en person i stillesittende aktivitet. Ut fra dette kan kildestyrken til andre former for emisjoner uttrykkes, for eksempel fra bygningsmaterialer.
- 1 decipol er definert som luftforurensningen fra 1 standardperson (1 olf) når det ventileres med 10 l/s ren luft og er et mål på opplevd luftkvalitet.

Selv om disse enhetene gir et tall eller mål på luftkvaliteten er det andre verdier og måleenheter som er mer vanlig å undersøke for luftkvalitet i klasserom.

2.1.2.1 Lukt

Klasserom kjennetegnes ved stor personbelastning hvor mennesker vil være den dominerende forurensningskilden i form av lukt produsert gjennom svette, tarmgass, utånding og skitt fra klær og hud [3]. Hvordan lukt oppfattes er individuelt og det er derfor en vanskelig parameter å ventilere etter. Over tid vil lukt kunne tilvennes og oppleves som nøytral, mens personer som kommer inn i rommet vil oppleve den sterkere. Lukt har ikke negative effekter knyttet til helse, men bidrar til negativ oppfatning av omgivelsene.

2.1.2.2 Karbondioksid

Regulering av luftmengder i forhold til CO₂ benyttes ofte som et mål på lukt og forurensninger avgitt fra personer. CO₂ måles i ppm (parts per million) og inkluderer både mengden som blir tilført gjennom friskluft og mengden produsert internt i rommet. Utelufts nivå for CO₂ i Norge har en middelvei på 400 ppm [3]. Innendørskilder i et klasserom vil være utåndingsluften fra personer som oppholder seg i rommet og produserer gjennomsnittlig 15 til 20 liter per time hver. Normen for CO₂-konsentrasjon i et klasserom er satt til 1000 ppm [2] og tilsvarer en grense fra innendørskilder på 600 ppm over utendørsnivå.

Mengdene i et klasserom er små i den forstand at de ikke forårsaker helseskader, men måling av CO₂ blir benyttet da det er gir en god indikasjon på hvordan luftkvaliteten oppleves. I klasserom med stor personbelastning vil mengder over fastsatte krav føre til tung og ubehagelig luft. Produksjon av CO₂ fra mennesker gjennom utånding henger sammen med den metabolske raten og kan uttrykkes ved [7]:

$$G = 4 * 10^{-5}MA$$

G: CO₂ produksjon [l/s]

M: Metabolisme (aktivitetsnivå) [W/m²]

A: Areal av mennesket [m²]

En gjennomsnittlig voksen person som gjør kontorarbeid vil ha et aktivitets nivå på rundt 1,2 met som tilsvarer M = 70 W/m². Med et overflateareal på ca. 1,8 m² vil en person produsere rundt 18 liter CO₂ per time [3].

2.1.2.3 Bygningsmaterialer

Valg av materialer bør være en del av planleggingsfasen ved utbygging av skoler og klasserom. Materialer for gulv, vegger, møbler og andre deler av bygget kan forurense innklimaet i form av støvpartikler og gasser, også kalt emisjon. Minimumskravet for ventilasjonsmengde i TEK10 [8] er blant annet avhengig av om det benyttes lavemitterende materialer eller ikke. Det eksisterer ikke en klar definisjon av begrepet lavemitterende materialer [9].

Materialene kan ha utslipp som kommer direkte fra materialet, primære utslipp. Dette er utslipp som på forhånd kan bli kartlagt og bør undersøkes før valg av materialtype blir tatt. Sekundære utslipp fra materialer skjer som følge av en kjemisk eller fysisk prosess, for eksempel ved vedlikehold, og kan føre til utslipp av forurensninger som ikke var forutsett. Fukt er også en faktor som kan skape sekundære utslipp i tillegg til å svekke materialer og konstruksjoner. Ved valg av materialer i skoler er det derfor viktig med lav emisjon av kjemiske gasser for å hindre et dårligere innklima. Det er også viktig med slitesterke materialer som er enkle å vedlikeholde og muligheter for støvoppsamling og avgassing bør unngås. Bruk av vegg-til-vegg tepper i skoler og barnehager frarådes selv om de gir god lyddemping. Tepper har en stor sinkeffekt for gasser og stor deponeringsevne for støv som betyr at de lett fanger opp forurensninger som kan avgis ved en senere anledning. Flyktige organiske forbindelser (VOC) er et samlebegrep for stoffer som blir produsert fra innendørskilder. En definisjon er at forbindelsene har et kokepunkt mellom 50 og 160 °C [7]. Klassifisering av disse stoffene er som oftest angitt som totalemisjon av flyktige organiske forbindelser (TVOC) som er summen av konsentrasjonen til de forskjellige stoffene.

I denne oppgaven er det forutsatt at lavemitterende materialer blir benyttet.

Forutsetningen gjør at minimumsverdien for ventilasjon gitt i TEK10 kan benyttes samt anta at forurensninger produsert i klasserommet hovedsakelig avhenger av personbelastning.

2.1.2.4 Fukt

Fukt oppstår som følge av både innendørs og utendørs kilder. I et klasserom vil fuktkilder være fra personers utånding eller fra ytterklær som blir tatt med inn.

Mengden fukt fra en voksen person i aktivitet vil være rundt 0,05 kg/time [7].

Utendørskilder kan være regn og snø som trekker inn i bygningskonstruksjoner og fukt fra grunnen. En mye bruk verdi for å angi mengde fukt i luften er relativ fuktighet (RF) som ved et nivå på 20-60 % vil ha liten innvirkning på innemiljøet[9]. I skoler er for tørr luft, RF under 20 %, sjeldent et problem. Anbefaling for relativ fuktighet er under 40 % om vinteren og under 70 % på sommerstid [2].

Det foreligger ikke noe tallfestet krav for mengder fukt eller spor av muggsopp i luften for skoler. I *Forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler* [5] §19 står det at: «Den relative luftfuktigheten i rommene skal ligge på et slikt nivå at fare for muggdannelser ikke forekommer». I TEK10 [8] er det gitt veiledning om fukt hvor §13-14 gir generelle krav: «Grunnvann, overflatevann, nedbør, bruksvann og luftfuktighet skal ikke trenge inn og gi fuktskader, mugg- og soppdannelse eller andre hygieniske problemer». For fukt fra inneluft står det i §13-18 «Bygningsdeler og konstruksjoner skal prosjekteres og utføres slik at de ikke blir skadelig oppfuktet av kondensert vanddamp fra inneluften». Mens §13-19 gir veiledning for nye konstruksjoner: «Materialer og konstruksjoner skal være så tørre ved innbygging/forsegling at det ikke oppstår problemer med mugg- og soppdannelse, nedbrytning av organiske materialer eller økt avgassing».

Mugg- og fuktskader er et kjent problem i flere norske skoler og er ofte en konsekvens av dårlig vedlikehold som fører til at nedbør trenger inn i bygningskonstruksjonene. Med for høy fuktighet og spesielt ved fuktskader som leder til mugg- og bakterievekst, er det fare for økt hyppighet av SBS og andre plager som luftveisirritasjoner, allergi og astma. En konsekvens er også mindre konsentrerte elever og redusert læringsutbytte.

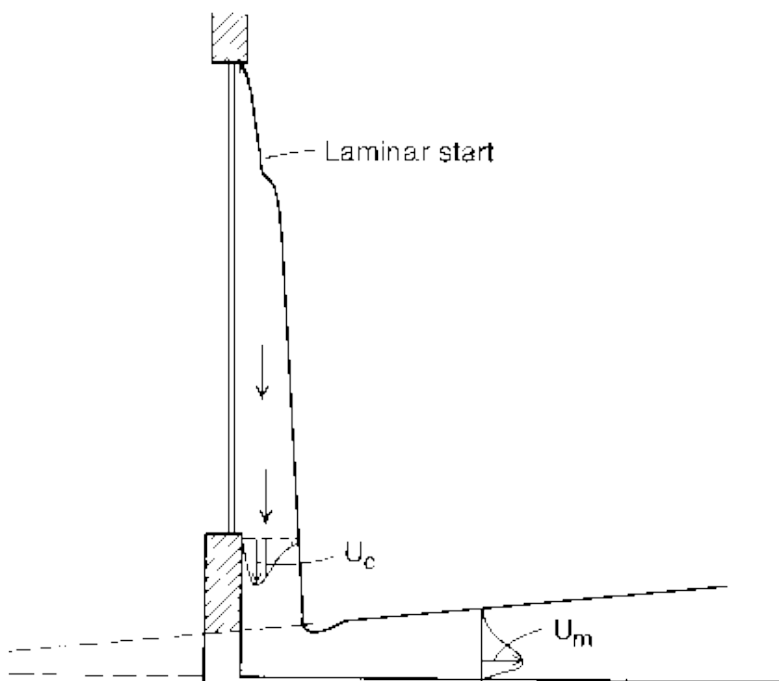
2.1.3 Internt varmetilskudd

Internt varmetilskudd kommer i tillegg til installert oppvarming og er varme avgitt fra lys, teknisk utstyr og personer som oppholder seg i bygningen. Dette varmetilskuddet kan ha en merkbar betydning og får større betydning i tettere og godt isolerte bygg. I NS3031[10] er varmetilskudd fra belysning, utstyr og personer gitt som henholdsvis 10, 6 og 12 W/m² gulvareal. I et klasserom er varmetilskudd fra personer dominerende og varmen som oppstår fra kroppens forbrenning blir avgitt ved konveksjon, stråling, delvis gjennom utånding og fra huden gjennom vanddamp. Fra elever er det avgitt tørr varme som blir benyttet og det interne varmetilskuddet vil da være tilnærmet lik 100 W per person [3]. Avgitt tørr varme kan også angis ut fra aktivitetsnivå som for en skoleelev er ca. 1,2 Met.

2.1.4 Kaldras

Et godt inneklima i klasserom krever at det ikke oppstår trekk eller kaldras fra vinduer og yttervegger. Kaldras oppstår ved vinduer eller vegger som holder en lavere temperatur enn romtemperaturen slik at luftsjiktet nær flaten kjøles ned. Dette fører til at det avkjølte luftsjiktet strømmer nedover langs flaten som en følge av at den kalde luften er tyngre enn romluften. I Figur 2-2 er et kaldras langs en glassvegg illustrert. Luften strømmer langs veggen og helt ned til gulvet hvor den avbøyes og fortsetter langs gulvet. Kaldras skaper en uønsket situasjon på grunn av faren for trekk fra luftstrømmer med høy hastighet og lav temperatur. Lav temperatur ved gulvnivå kan gi diskomfort som en følge av høy vertikal temperaturgradient.

Den vanligste måten å motvirke kaldras på er å plassere et varmelegeme i form av panelovner eller radiatorer under vinduet. I tillegg til å motvirke kaldraset bidrar det til økt temperatur på luftstrømmen. En annen metode for å motvirke kaldras uten bruk av ekstra energi er vinduer med horisontale sprosser som avbøyer kaldraset og motvirker at det skaper trekk.



Figur 2-2 Kaldras langs vindusvegg [1]

2.1.5 Luftmengder i henhold til TEK10

Det er tre forhold som påvirker behovet for tilført luftmengde (A) personbelastning, (B) materialbelastning og (C) forurensning fra aktiviteter og prosesser. For et klasserom vil personbelastning være det dominerende forholdet. Beregning av uteluftmengder kan gjøres ut fra følgende formler [9]:

$$v = A + B = \frac{p}{n} + B \left(\frac{l}{sm^2} \right)$$

$$V = v * A_g \left(\frac{l}{s} \right)$$

p: personfaktor (l/s pr. pers.)

n: personbelastning (m² gulvflate pr. pers.)

B: materialbelastning (l/s pr. m²)

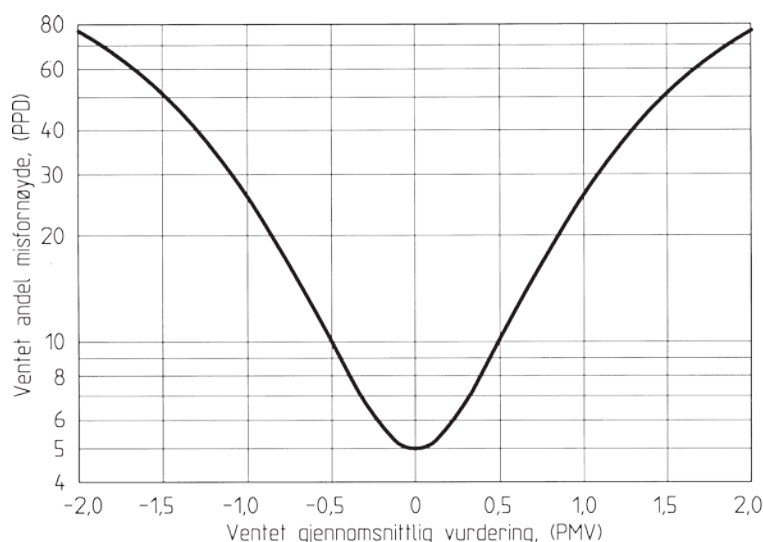
A_g: netto gulvareal

2.1.6 PMV/PPD

PMV står for Predicted Mean Vote og PPD for Predicted Percentage of Dissatisfied.

Det vil si den forventede middelvoteringen for en gruppe personer og forventet prosent andel misnøyde [3]. PMV-indeksen benytter en skala fra -3 til +3 for å angi hvordan det termiske miljøet oppfattes. En verdi lik 0 tilsvarer nøytralitet. PPD-indeksen er gitt i prosent og gir et mål på hvor mange i en gruppe mennesker som er misfornøyd ved et gitt termisk klima. Sammenhengen mellom de to indeksene er vist i Figur 2-3 og er gitt ved følgende uttrykk:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0,03352*PMV^4 - 0,2179*PMV^2)} \text{ [%]}$$



Figur 2-3 Sammenheng mellom PMV og PPD[11]

En PMV-verdi på 0 tilsvarer nøytralitet med termiske omgivelser og gir PPD lik 5 %. Ut fra dette ser man at for en gruppe kan det maksimalt oppnås et tilfelle med 95 % fornøyde [3].

2.1.7 Krav til inneklime i klasserom

I *Forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler* [5] fastslår §1 at formålet er å bidra til at miljøet i barnehager, skoler og andre virksomheter fremmer helse, trivsel, gode sosiale og miljømessige forhold samt forebygge sykdom og skade.

Under §19 er bestemmelser for inneklime og luftkvalitet gitt ved:

«Virksomheten skal ha tilfredsstillende inneklime, herunder luftkvalitet.

Temperaturregulering og ventilasjon skal være tilpasset bruksområdet og årstidsvariasjoner. Den relative luftfuktighet i rommene må ligge på et slikt nivå at fare for muggdannelse ikke forekommer. Ioniserende stråling skal ikke overskride et allment akseptert nivå.»

I Byggeforskerien, *Byggedetaljer 421.505 Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger* [9] er innemiljøkrav for klasserom gitt i tre kategorier. Kategori 2 vil si et middels ambisjonsnivå med mindre enn 20 % misnøyde, tilsvarende nivået brukt i TEK10. Kategori 1 og 3 tilsvarer henholdsvis høyt ambisjonsnivå (mindre enn 15 %) og moderat ambisjonsnivå (mindre enn 30 %).

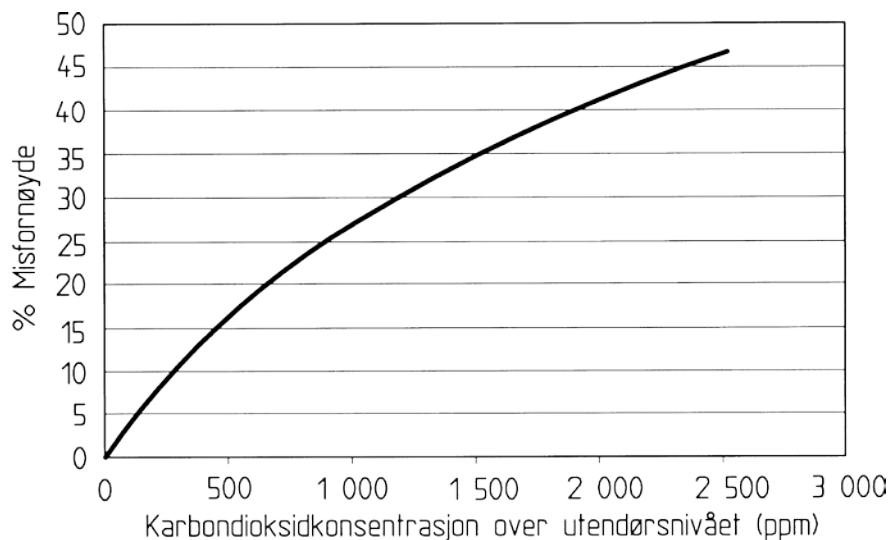
Parametere som er relevant for denne oppgaven er presentert i Tabell 2-1.

		Enhet	Kategori		
			1	2	3
Operativ temperatur	Vinter	°C	22 ± 1	22 ± 2	22 ± 3
	Sommer		24,5 ± 0,5	24,5 ± 1,5	24,5 ± 2,5
Gulvtemperatur		°C	19-29	19-29	17-31
Vertikal temperaturgradient		°C/m	< 2	< 3	< 4
Relativ fuktighet	Vinter	%	20 – 40	< 40	< 40
	Sommer		< 60	< 70	< 70
Lufthastighet	Vinter	m/s	< 0,15	< 0,18	< 0,21
	Sommer		< 0,18	< 0,22	< 0,25
Tilført luftmengde (lavemitterende materialer)		l/s per m ²	1	0,7	0,4
Tilluftsmengde for personbelastning		l/s per person	10	7	4
CO₂-konsentrasjon	Over utendørsnivå	ppm	500	600	1200

Tabell 2-1 Innemiljøkrav i klasserom [5, 9]

For sittende personer er det tre referanse høyder som benyttes for måling av termisk komfort. Punktene er ved 0,1, 0,6 og 1,1 meter over gulvet og tilsvarer ankler, personens tyngdepunkt og hodet [11]. Den vertikale temperaturgradienten i et klasserom vil si at differansen mellom hode- og ankelhøyde for en sittende person ikke overskrider 3 °C.

Kravet for CO₂ i kategori 2 er satt ut fra normen på 1800 mg/m³ som tilsvarer 1000 ppm. Med et nivå på 400 ppm i uteluften vil grensen fra innendørskilder være 600 ppm. CO₂- krav for de tre kategoriene kan også leses av fra Figur 2-4 hvor sammenhengen mellom antall misfornøyde og konsentrasjon over utendørnivå er gitt.



Figur 2-4 Sammenheng mellom antall misfornøyde og CO₂ over utendørnivå [6]

2.2 Ventilasjonsmodeller

2.2.1 Generelle krav til ventilasjon

I henhold til TEK10 skal en bygning ha ventilasjon som er tilpasset rommenes forurensnings- og fuktbelastning slik at tilfredsstillende luftkvalitet sikres. §13-1 og §13-3 er relevante for skolebygg. I henhold til §13-1 Generelle krav til ventilasjon skal følgende minst være oppfylt:

- Bygget skal utformes og ventilasjonsanlegget plasseres slik at tilluftskvaliteten sikres. Ved utilfredsstillende kvalitet på uteluften skal den renses før den tilføres bygningen, for å forebygge helserisiko og tilsmussing av ventilasjonsinstallasjoner.
- Forurensningsbelastning fra personer skal tas hensyn til.
- Luftføring skal være fra rom med høyere krav til luftkvalitet til rom med lavere krav.
- Plassering av luftinntak og avkast: forurensning fra avkast må ikke tilbakeføres til inntak og sørge for at luften ved inntaket er minst mulig forurenset.
- Omluft skal ikke benyttes dersom dette fører til overføring av forurensning mellom rom.

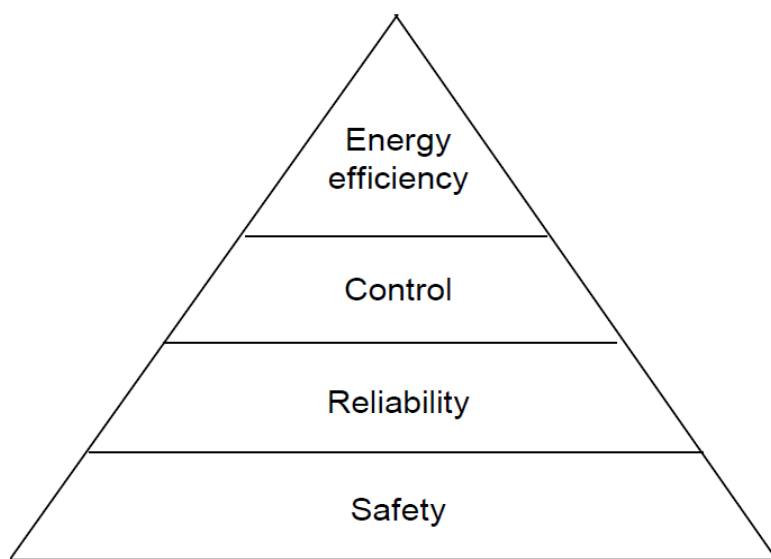
§13-3 Ventilasjon i byggverk for publikum og arbeidsbygning sier at:

- Gjennomsnittlig frisklufttilførsel på grunn av forurensning fra personer med lett aktivitet skal være minimum 26 m^3 per time per person. Ved høyere aktivitet skal friskluft tilførsel økes slik at luftkvaliteten blir tilfredsstillende.
- Gjennomsnittlig frisklufttilførsel skal være minimum $2,5 \text{ m}^3$ per time per m^2 gulvareal når bygningen eller rommene er i bruk og minimum $0,7 \text{ m}^3$ per time per m^2 gulvareal når bygningen eller rommene ikke er i bruk. Kravet skal ivareta behov for å ventilere bort lukt og emisjoner fra bygningsmaterialer og inventar.

Ved udokumenterte materialer eller materialer som er høyt emitterende økes kravet fra $2,5 \text{ m}^3/\text{tm}^2$ til $3,6 \text{ m}^3/\text{tm}^2$.

Hensikten med funksjonskravene som blir stilt til ventilasjonen er at den skal sørge for at de som oppholder seg i et rom ikke blir eksponert for store mengder forurensning og dårlig luft. Den skal sørge for at det er tilstrekkelig mengde frisk luft og oksygen i rommet og at temperaturen holder seg innenfor et akseptabelt nivå. Ved dimensjonering av anlegget skal dette oppnås så effektivt som mulig med lavt energibruk og ved å fange opp eller begrense spredningen av forurensninger. Det er også viktig at anlegget ikke gir plagsomt støy eller ubehagelig trekk som følge av for høy hastighet.

Ventilasjonsdesign kan illustreres hierarkisk ved Figur 2-5. Først og fremst prioriteres ett sikkert system som ikke kan forårsake skade eller farlige situasjoner. Videre prioriteres et stabilt system som vil si at systemet er til å stole på og at det leverer nok kapasiteten på det tidspunktet behovet er der. Kontroll av systemet går på evnen til å regulere parameter som temperatur, forurensninger, lufthastigheter og luftmengder i rommet. Når disse tre kriteriene er oppfylt kan mer energieffektive løsninger studeres hvor målet er å redusere energibruken samtidig som det ikke påvirke de foregående designparameterne.



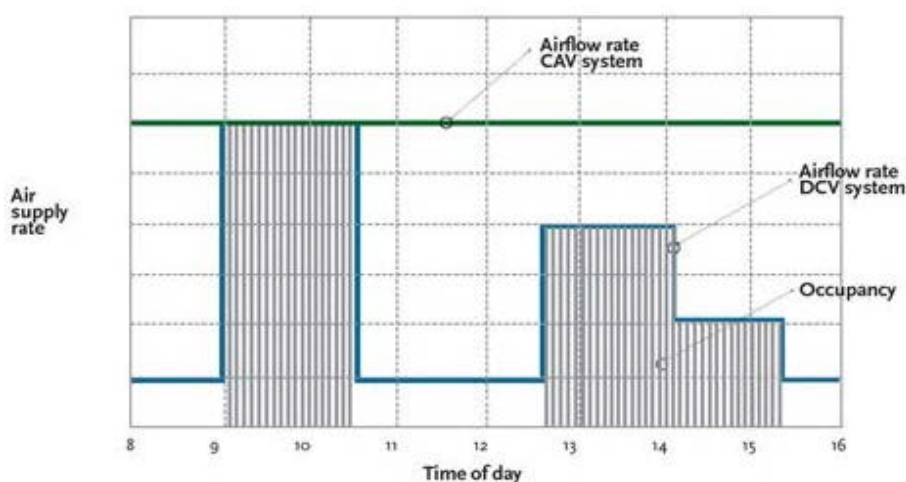
Figur 2-5 Hierarkisk design for ventilasjonssystemer [12]

Spørsmål om hvilken type ventilasjonssystem som skal benyttes i skoler bør inkluderes allerede i planleggings- og prosjekteringsfasen både ved rehabilitering og for nybygg. Valg av ventilasjonssystem kan ha betydning både for kostnadsrammen og utformingen av bygget. Plassering av bygg og tilførselskanaler/ventiler er viktig da det kan være avgjørende for luftkvaliteten i rommet. Forurensninger i uteluften kan bli dratt inn gjennom friskluftinntaket og inntaket bør derfor plasseres der uteluften er renest mulig. Avtrekkets plassering i forhold til tilluftsventiler er også av betydning da en situasjon hvor avtrekket trekker inn den friske luften før den blir spredd ut i rommet, kalt kortslutning, ikke er ønskelig. Andre funksjoner som bør bli tatt hensyn til ved utforming og valg av system er at det ikke er en årsak til støvoppsamling samt at det er tilgjengelig for renhold, inspeksjon og vedlikehold.

2.2.2 Behovsstyrt ventilasjon (DCV)

Det er forutsatt i oppgaven at ventilasjonsanlegget er behovsstyrt. Behovsstyrt ventilasjon vil si at luftmengden kan reguleres manuelt av brukerne eller ved hjelp av sensorer som registrerer for eksempel tilstedeværelse eller temperatur. Sammenlignet med ventilasjon som kjøres med konstant luftmengde (CAV) bidrar dette til redusert energibruk og reduserte driftskostnader. Figur 2-6 viser luftmengder ved bruk av DCV og CAV for en typisk driftstid fra 0800 til 1600. For DCV reduseres luftmengden når rommet ikke er i bruk eller når personbelastningen er redusert.

Energibesparelsen ved bruk av behovsstyring avhenger blant annet av belastning og driftstid og er derfor godt egnet i skoler hvor disse parameterne vil variere. Ved bruk av CAV blir en forhåndsbestemt, konstant luftmengde levert og kjørt gjennom hele driftstiden. Utenfor driftstiden kjøres anlegget ofte med en lavere luftmengde. Den enkleste formen for behovsstyring er å la brukere av et bygg styre luftmengdene manuelt. Automatisk og mer avansert regulering kan gjøres ved å installere sensorer som registrerer og regulerer luftmengder i forhold til forurensningskonsentrasjon, temperatur, luftfuktighet eller ved å registrere tilstedeværelse av personer. En kombinasjon av manuell og automatisk styring kan også benyttes.



Figur 2-6 Konstante- og behovsstyrteluftmengder[13]

2.2.3 Sensorer

De mest aktuelle styringsparameterne for klasserom er CO₂, temperatur og tilstedeværelse [14]. Luftkvalitetssensorer som CO₂-målere er sett på som et dyrt alternativ sammenlignet med tilstedeværelsessensorer. Eksempler på styringsparametere som er aktuelle for forskjellige type lokaler er gitt i Tabell 2-2.

Plassering av luftkvalitetssensorene er spesielt viktig for å oppnå optimal ventilering og bør velges ut i fra ventilasjonsprinsipp som benyttes. Følsomheten, eventuelle avvik i målinger og treghet i sensorene er også viktig å ta med i vurderingen. Ved bruk av omrøringsventilasjon kan sensoren plasseres hvor som helst i rommet fordi det ideelt sett er en uniform forurensningskonsentrasjon og temperatur. Dødsoner som kan oppstå bør likevel kartlegges for å unngå plassering av sensoren i en slik sone. For rom hvor fortreningsprinsippet blir benyttet bør sensoren plasseres i oppholdssonen hvor en bestemt temperatur eller en lav konsentrasjonen av forurensning skal opprettholdes. Sensoren må ikke plasseres i direkte kontakt med forurensningskilder eller for nære tilluftsventilene. Plassering på yttervegger bør unngås da det kan resultere i feil temperaturmåling.

Type lokale	Styringsparametere
Skoler	CO ₂ , temperatur, tilstedeværelse
Auditorier, idrettshaller, butikker	CO ₂ , RF (%), temperatur, VOC
Restauranter, kafeer	VOC, CO ₂ , temperatur
Grafisk industri	Løsemidler, støv
Lokaler med glassfiber-/polyesterstøping	Styren, acetone
Sykehus	Narkosegasser, trykkforskjeller
Laboratorier	Trykkforskjeller
Svømmehaller	RF (%), trykkforskjeller
Boliger	RF (%), CO ₂

Tabell 2-2 Eksempler på lokaler og aktuelle styringsparametere[14]

2.2.4 Balansert ventilasjon

Balansert ventilasjon vil si at luftmengden i tillufts- og avtrekksventiler er omtrentlig like store og er det som vanligvis benyttes i skoler i dag.

2.2.5 To-sone modell

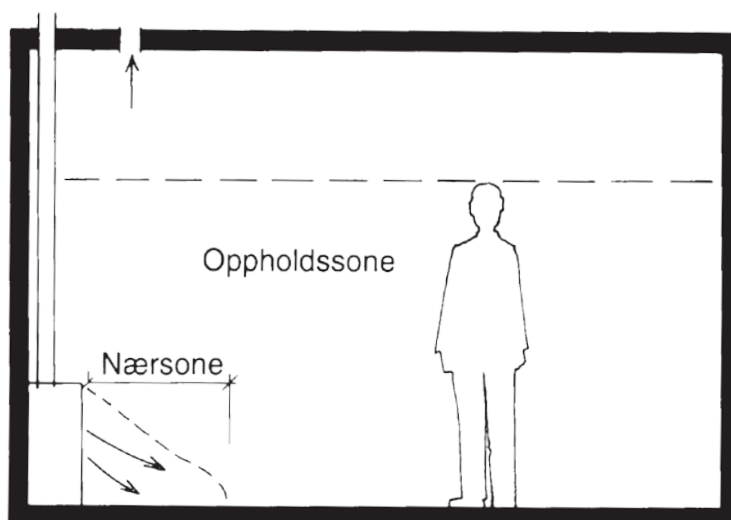
I en to-sone modell vil rommet ha en oppdeling som består av to soner, en primær og en sekundær sone. Primærsonen vil som regel være tilførselssonen hvor tilluft og romluft blandes, mens sekundærsonen tilsvarer resten av rommet. Figur 2-7 viser hvordan oppdelingen av rommet blir ved bruk av fortreningsventilasjon med lufttilførsel ved gulvet.

Oppholdssonen tilsvarer primærsonen hvor frisk luft blir tilført, blander seg med romluften og stiger som følge av varme konveksjonsstrømmer. Over oppholdssonen vil det oppstå en forurenset sone hvor avtrekket er plassert.

Ved bruk av aktiv fortreningsventilasjon vil luften tilføres i den øvre og forurensete sonen. Luften vil falle ned mot oppholdssonen og samtidig blande seg med romluften. I oppholdssonen vil tilluften bre seg utover lang gulvet, forurenset og varm luft vil stige og suges ut av avtrekksventilene plassert i den øverste sonen. Tilførsel og avtrekk skjer altså i samme sone.

2.2.6 Fortreningsventilasjon

Fortreningsventilasjon utnytter prinsippet om at varmluft stiger i forhold til kaldluft fordi tettheten er lavere. Det er vanlig at luften tilføres et rom ved gulvnivå, men tilførsel fra ventiler høyt på veggen eller fra taket er også mulig. Luften tilføres rommet har lav hastighet og holder en temperatur et par grader lavere enn ønsket romtemperatur [2]. Når luften tilføres ved gulvet blir den gradvis oppvarmet av varme fra mennesker og omgivelsesluft. Luften stiger samtidig som den drar med seg forurensninger som produseres til sonen over. Ved tilførsel nær taket faller luften ned mot oppholdssonen og ved gulvnivå brer den seg utover rommet. Luften tar med noe av forurensningen i den øvre sonen ned til oppholdssonen.

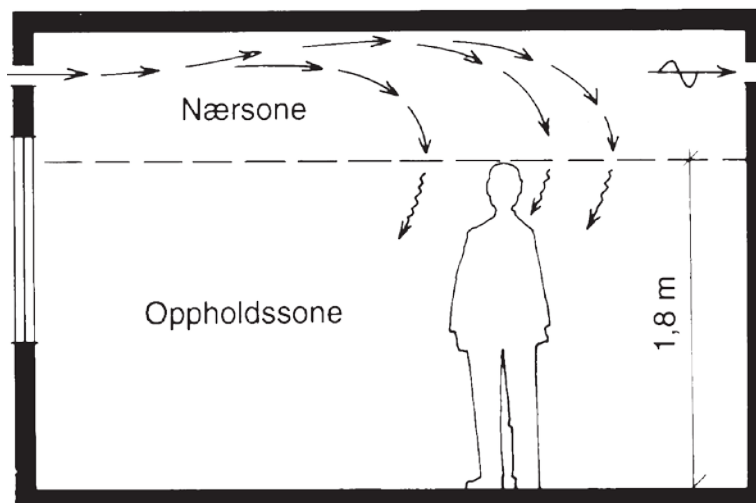


Figur 2-7 Fortreningsventilasjon med tilførsel ved gulv[15]

2.2.7 Omrøringsventilasjon

Med omrøringsventilasjon er det ideelt sett en homogen luftkvalitet i oppholdssonen som vil være lik luftkvaliteten i avtrekket. Luften blir tilført nær taket med høy hastighet og med en temperatur på 1-2 grader lavere enn ønsket romtemperatur. Coanda-effekten blir utnyttet som vil si at luften klebrer seg til taket en stund før den slipper og faller nedover. Figur 2-8 viser prinsippet for omrøringsventilering. For at det ikke skal oppstå trekk på personer i oppholdssonen må luften som blåses inn dimensjoneres etter en kastelengde. Kastelengden er den avstanden som kreves for at luften skal oppnå ønsket hastighet og temperatur før den når oppholdssonen.

Hvis både avtrekk og tilluft er plassert nær taket/høyt på veggen er det viktig å sørge for at hastigheten på tilluften høy nok og at temperaturen ikke er for høy for å unngå kortslutning.



Figur 2-8 Omrøringsventilasjon[15]

Tabell 2-3 viser noen fordeler og ulemper ved de to ventilasjonsløsningene.

	Fordeler	Ulemper
Fortrengningsventilasjon	<ul style="list-style-type: none"> - Lavere lufthastigheter - Godt egnet til hybrid/naturlig ventilasjon - Høyere ventilasjonseffektivitet - Mer effektiv ved store kjølebehov - Kan tilføre store luftmengder trekkfritt - Godt egnet for behovsstyring 	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til møblering og oppholdssone/nærsone - Mindre egnet i mange små rom (f.eks. cellekontorer) - Plasskrevende ventiler
Omrøringsventilasjon	<ul style="list-style-type: none"> - Ingen begrensninger for møblering - Ingen tilførsel av luft direkte i oppholdssonen gir liten sjanse for trekk - Jevn lufttilførsel og temperaturfordeling - Egnet i store rom hvor man skal tilføre store luftmengder - Mye brukt løsning 	<ul style="list-style-type: none"> - Krav til lufthastighet i tilluftsventiler gjør at bruk av hybrid og naturlig ventilering er ugunstig - Innblåsing øverst på veggen kan øke trekkfaren fra vindu

Tabell 2-3 Fordeler og ulemper ved fortrengnings- og omrøringsventilasjon[2, 16]

2.2.8 Nærsoner

I prinsippene for fortrennings- og omrøringsventilasjon, Figur 2-7 og Figur 2-8, er det i tillegg tilfeller et område kalt nærsoner.

Nærsonen vil si den avstanden eller området hvor ventilasjonsluften enda ikke har oppnådd tilfredsstillende temperatur eller hastighet. Et mye brukt krav er en hastighet på 0,2 m/s da det ligger mellom kravene for vinter og sommer på henholdsvis 0,18 og 0,22 m/s. Bredden og lengden for nærsonen benevnes som $B_{0,2}$ og $L_{0,2}$.

2.2.9 Naturlig ventilasjon

Naturlig ventilasjon utnytter naturlige drivkrefter som oppdrift og vind.

Oppdriftskreftene, også kalt skorsteinseffekt, oppstår fordi varm luft har lavere tetthet enn kald luft. Dette drivtrykket kan forsterkes ved å øke temperaturforskjellen eller ved å øke høydeforskjellen mellom punktet hvor luften slippes inn og punktet hvor luften slippes ut.

De enkleste formene for naturlig ventilasjon kan være enkle ventiler i ytterveggen som styres manuelt kombinert med lufting gjennom å åpne vinduer. Mer avanserte løsninger kan inkludere forvarming av tilluften. Utskifte av luft vil også skje gjennom utettheter i bygningskonstruksjonen ved lekkasje og infiltrasjon. I Norge krever kalde vintertemperaturer forvarming og helst varmegjenvinning av luften, varmegjenvinning er generelt ikke mulig ved bruk av naturlig ventilasjon.

2.2.10 Mekanisk ventilasjon

Mekanisk ventilasjon skaper drivtrykk gjennom mekanisk drevne vifter og er dermed uavhengig av eksterne faktorer. Mulighetene for forvarming og varmegjenvinning av avtrekksluft er gode. Luften blir vanligvis transportert gjennom kanalsystemer installert over himlinger og ved balansert, mekanisk ventilasjon vil viftene sørge for like store luftmengder i tilførsel og avtrekk.

Fordeler og ulemper for naturlig og mekanisk drevet ventilasjon er gitt i Tabell 2-4.

	Fordeler	Ulemper
Naturlig ventilasjon	<ul style="list-style-type: none"> - Ingen store tekniske installasjoner - Lite behov for vedlikehold - Billigere løsning enn mekanisk - Ingen behov for strøm 	<ul style="list-style-type: none"> - Ofte utilstrekkelig ved stor personbelastning - Ingen varmegjenvinning - Tilførsel av tilstrekkelig friskluft avhenger av utetemperatur og vindforhold - Ingen filtrering av partikler
Mekanisk, balansert ventilasjon	<ul style="list-style-type: none"> - Sikrer tilstrekkelig luftskifte - Ikke avhengig av klimaforhold ute - Mulig å regulere - Filtrering av partikler - Mulighet for forvarming og gjenvinning 	<ul style="list-style-type: none"> - Krever at installasjoner og kanaler er rett dimensjonert og installert for å fungere optimalt - Krever mer vedlikehold, f.eks utskifting av filtre - Avhengig av strøm - Høyere energibruk - Høyere kostnader - Fare for støy

Tabell 2-4 Naturlig og mekanisk ventilasjon - fordeler og ulemper [17]

2.2.11 Hybrid ventilasjon

Hybrid ventilasjon blir definert som et mekanisk, balansert ventilasjonssystem hvor naturlige drivkrefter blir utnyttet så lenge det gir tilstrekkelig ventilering. Ved behov vil mekanisk drevne vifter bli benyttet for å kunne opprettholde kravene for et godt inneklima. Tanken er å kunne utnytte de beste egenskapene fra naturlig og mekanisk ventilering og dermed oppnå tilstrekkelig ventilering samtidig som energibruken reduseres.

Generelt kan hybride ventilasjonssystemer karakteriseres ut fra tre egenskaper [18].

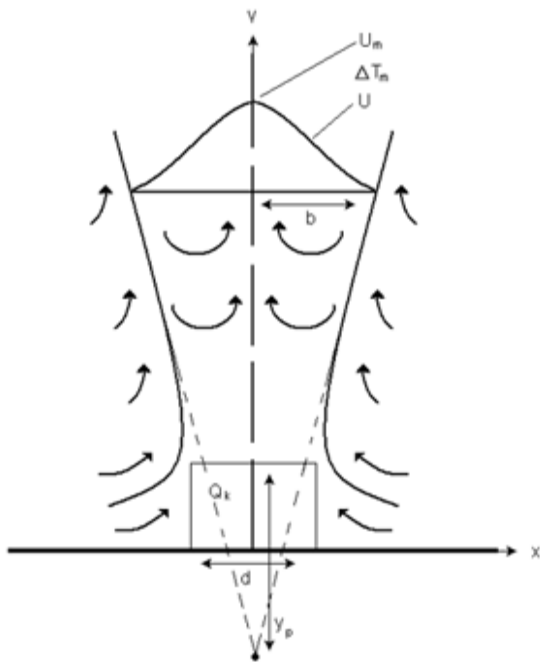
1. Luftføring og eventuell luftbehandling er i større eller mindre grad integrert i bygningskroppen. Eventuelle eksponerte flater i tunge materialer bidrar til passiv kjøling.
2. Anlegget er utført som et lavtrykk-tapsanlegg. Trykkfallene i luftføringsveier, lufttilførselsåpninger og over luftbehandlingskomponentene er minimerte.
3. Bevisst utnyttelse av naturlige drivkrefter i større eller mindre grad.

De tre punktene henger sammen i den forstand at punkt 1. ofte er en forutsetning for punkt 2. Lav trykkfall er igjen en nødvendighet for å utnytte naturlige drivkrefter.

2.3 Luftstrømmer

2.3.1 Fri konveksjonsstrøm/termisk stråle

Konveksjonsstrømmer oppstår ved en flate eller rundt et legeme som har lavere eller høyere temperatur enn omgivelsesluften. Strømningen vil påvirke bevegelsesmønsteret til romluften, i tillegg til påvirkningen fra ventilasjonen, og har betydning ved dimensjonering av ventilasjonsanlegget. Dette gjelder spesielt i tilfeller hvor fortreningsprinsippet blir benyttet.



Figur 2-9 Fri konveksjonsstrøm/
termisk stråle [1]

Personer i et klasserom vil være varmekilder som ved å avgi varme, varmer opp luften rundt slik at den stiger mot taket. Dette kalles en fri konveksjonsstrøm eller en termisk stråle. Strålen vil ha en vinkel tilnærmet lik $12,5^\circ$ fra midtlinjen. I en slik konveksjonsstrøm vil bevegelsesmengden til strålen ikke være bevart, men på grunn av oppdriftskrefter være økende. Masse og energi blir bevart i strålen og har samme hastighets- og temperaturprofil som en vanlig jetstrøm.

Avgitt konvektiv effekt kan uttrykkes ved følgende likning [1]:

$$\dot{Q}_k = \rho c_p U_m \Delta T_m A_s I_3$$

\dot{Q}_k : avgitt konvektiv effekt [kW]

ρ : tetthet [kg/m^3]

U_m : maksimal hastighet [m/s]

ΔT_m : maksimal temperaturforskjell mellom stålen og omgivelsene [K]

A_s : tversnitt av strålen [m^2]

I_3 : Integral av $\int_0^1 \frac{U \Delta T}{U_m \Delta T_m} \frac{dA}{A_s}$, med verdi lik 0,1782

Andre varmekilder i et rom kan være lys og datamaskiner, disse kan bli sett på som punktkilder (aksesyrrisk strømning) og har et stråletverrsnitt lik:

$$A_s = \pi C_b^2 (y + y_p)^2$$

C_b : konstant lik 0,235

y_p : avstanden fra kilden til konveksjonsstrålens pol. Tilnærmet lik $0,7 \cdot d$.

Følgende konstanter er antatt for vanlige temperaturer og små temperaturforskjeller, $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$, $\beta = 1/300 \text{ 1/K}$, $c_p = 1 \text{ kJ/kgK}$.

Det gir følgende uttrykk for sentralhastighet og sentraltemperatur:

$$U_m = 1,28 \left(\frac{\dot{Q}_k}{y + y_p} \right)^{1/3} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\Delta T_m = 20,9 \dot{Q}_k^{2/3} (y + y_p)^{-5/3} [K]$$

Volumstrømmen kan uttrykkes ved:

$$q_{vk} = 0,055 \dot{Q}_k^{1/3} (y + y_p)^{5/3} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

2.3.1.1 Konveksjonsstrømmer fra personer

Personer kan i en enkel modell framstilles som punktkilder, men i virkeligheten vil konveksjonsstrømmer rundt og over en person være mer kompleks enn dette. Da avgitt varme fra personer vil være den dominerende varmekilden i et klasserom er konveksjonsstrømmen rundt dem spesielt viktig.

En forenklet metode for å beregne konveksjonsstrømmer over personer er gitt i *A simplified model for human induced convective air flows* av T.H. Dokka og P.O. Tjelflaat [19]. Utledning av formelene benyttet til beregning av konveksjonsstrøm rundt personer er gitt i vedlegg A.

Konveksjonsstrømmen fra en person er gitt ved:

$$\dot{V}_{per} = 8,61 \left(\frac{P_{per}}{A_{per}} \right)^{0,3} z^{1,2} d_{per}$$

P_{per} : konvektiv varmeavgivelse fra person

A_{per} : overfalte areal av person

z : avstand fra gulvet

d_{per} : diameter av person = $2 \left(-h_{per} + \sqrt{h_{per}^2 + \frac{A_{per}}{\pi}} \right)$

h_{per} : høyde på person

Figur 2-10 viser hvordan konveksjonsstrømmen fra en stillesittende person stiger i forhold til avstand fra gulvet. Den konvektive varmeavgivelsen er satt til 50 W. Grafen viser at i området under 1 meter over gulvet har konveksjonsstrømmen ikke stabilisert seg helt. Konveksjonsstrømmen vil ikke starte helt nede ved gulvnivå og avstanden til det virtuelle midt/startpunkt, Z_p , kan beregnes. Avstanden er avhengig av diameteren av personen og i dette tilfellet er avstanden 0,75 m.

Resultater av eksperimenter og beregninger gitt i [20] er gjengitt i Tabell 2-5 hvor verdier for forskjellige temperaturgradienter er gitt. Eksperimentell data er hentet fra forsøk gjort med en person formet som en sylinder med målene $h = 1 \text{ m}$, $d = 0,4 \text{ m}$, $A = 1,38 \text{ m}^2$. Med en høyde på 1 meter kan det antas at eksperimentet er utført for en sittende person. Det er gjort beregninger med en nedre og en øvre grenseverdi på henholdsvis $a = 1,7$ og $a = 2,5$. Basert på resultater kan en verdi på $a = 1,9$ benyttes for beregninger.

Temperaturgradient		Høyde over gulv [m]				
		1,25	1,5	1,75	2,0	2,25
0 - 0,1 [K/m]	Eksperiment, Kofoed	17 l/s	32 l/s	39 l/s	52 l/s	56 l/s
	Gradient modell, Mundt	20 l/s	29 l/s	39 l/s	50 l/s	62 l/s
0,3 [K/m]	Eksperiment, Kofoed	23 l/s	29 l/s	33 l/s	43 l/s	52 l/s
	Gradient modell, Mundt	20 l/s	29 l/s	39 l/s	50 l/s	62 l/s
		Høyde over gulv [m]				
		1,1	1,4	1,8	2,2	
0,6 [K/m]	Målt, Mundt*	23-32 l/s	32-44 l/s	35-47 l/s	46-68 l/s	
	Gradient modell, Mundt	16 l/s	26 l/s	41 l/s	59 l/s	
1,2 - 1,5 [K/m]	Målt, Mundt*	21-26 l/s	27-37 l/s	31-52 l/s	-	
	Gradient modell, Mundt	16 l/s	26 l/s	41 l/s	59 l/s	

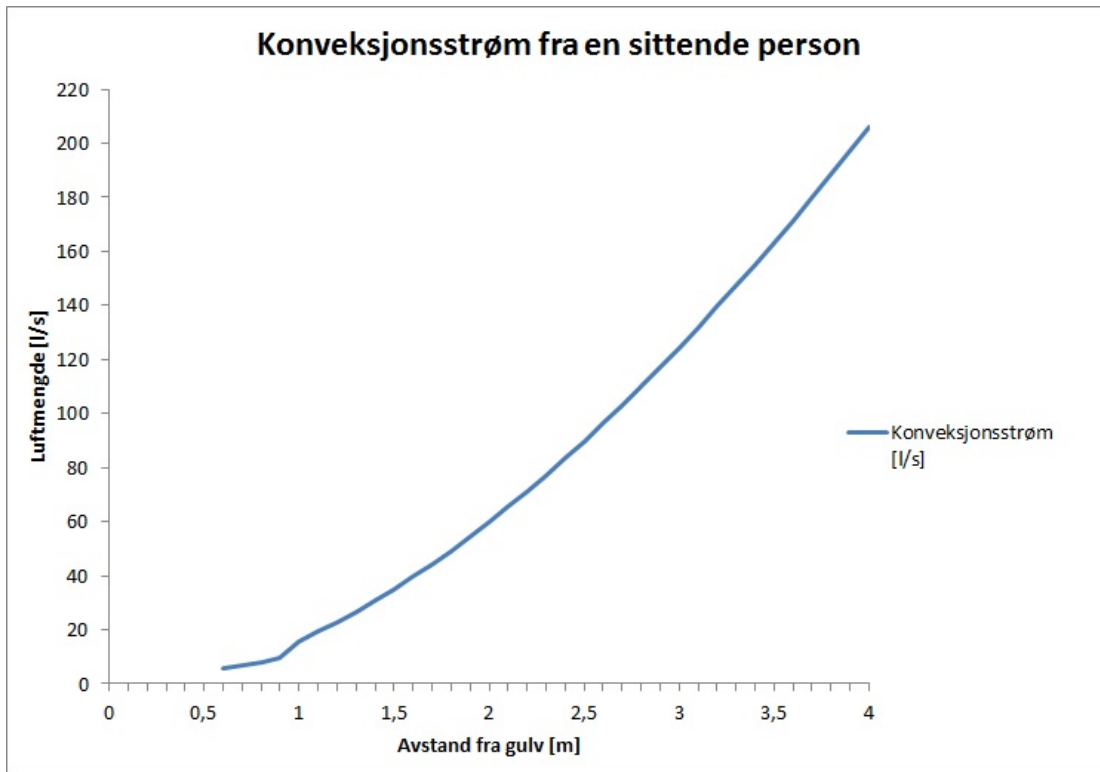
Tabell 2-5 Målte og eksperimentelle verdier for konveksjonsstrøm fra en person [19, 20] *Labmålinger gitt i [21]

I *Håndbog for industriventilasjon* av Henning Hørup Sørensen [22] er verdier gitt for personer i stillesittende arbeid. Konveksjonsluftmengdene er 15-20 og 14-50 for høyder på henholdsvis 1,1 og 1,8 meter over gulv.

	Høyde over gulv [m]					
	1	1,1	1,4	1,8	2,2	2,3
Beregnet luftmengde, $a = 1,9$	16 l/s	19 l/s	31 l/s	49 l/s	71 l/s	77 l/s

Tabell 2-6 Konveksjonsstrøm beregnet ut fra valgt personmodell

Tabellene over viser at beregningene utført for denne oppgaven gir realistiske tall for konveksjonsstrømmen fra en person som sitter, om enn noe høyere enn de eksperimentelle. Sammenlignet med luftmengdene for gradientmodellen er de beregnede verdiene noe høye. Årsaken til dette er en antakelse om uniform omgivelsestemperatur som fører til en større volumstrøm [23]. Temperaturgradienter i rommet påvirker høyden på strålen, da drivtrykket blir redusert tidligere [24]. Ved bruk av fortrenningsventilasjon vil temperaturen stige i høyden dette vil da redusere volumstrømmen fra personene. De noe høyere verdiene kan også ha sammenheng med at personmodellen som er benyttet har større areal enn den som ble brukt for målinger i Tabell 2-5.



Figur 2-10 Konveksjonsstrøm fra stillesittende person

2.3.2 Konveksjonsstrømmer langs varme/kalde flater

En varm eller kald flate varmer opp eller avkjøler luftsjiktet nær flaten. Tilfellet kan bli sett på som en halv, fri konveksjonsstrøm. For et slikt tilfelle må det også tas hensyn til friksjonen som oppstår mellom flaten og luften som blir satt i bevegelse. Friksjonen har betydning for bevegelsesmengden som vil bli tapt ved friksjon mot faste begrensingsflater og stigende trykk, og økt ved trykkreduksjon.

I tilfeller for konveksjonsstrømmer langs en kald flate, omtalt som kaldras i kapittel 2.1.4, kan faren for ubehag undersøkes ved å beregne rasets hastighet uttrykt ved:

$$U_m = 0,54 \sqrt{g\beta\Delta T_f y} \left[\frac{m}{s} \right]$$

g: gravitasjonskonstant

β : termisk volumutvidelseskoeffisient = $1/T$ [1/K]

y: høyden på flaten

ΔT_f er temperaturforskjell mellom vertikalflate og omgivelsesluft og kan beregnes ut fra:

$$\Delta T_f = \Delta T_{tot} \frac{U}{\alpha_s + \alpha_k}$$

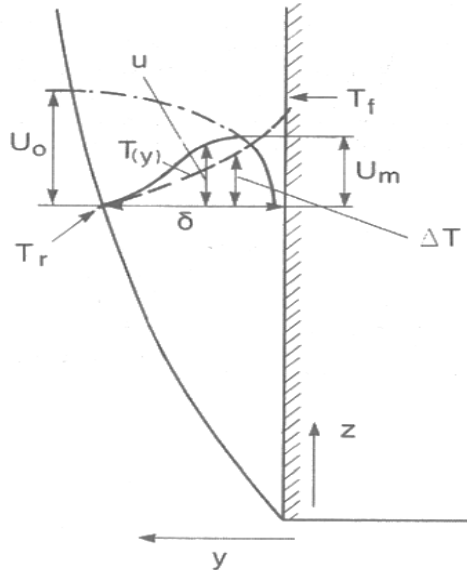
U: varmeovergangskoeffisient [W/m^2K]

α_s : koeffisient for varmeoverføring ved stråling = 4,5 [W/m^2K]

α_k : varmeoverføring ved konveksjon: $1,31\Delta T^{1/3} = 2,5$ [W/m^2K]

Luftmengden som blir tatt med per meter bredde uttrykkes ved:

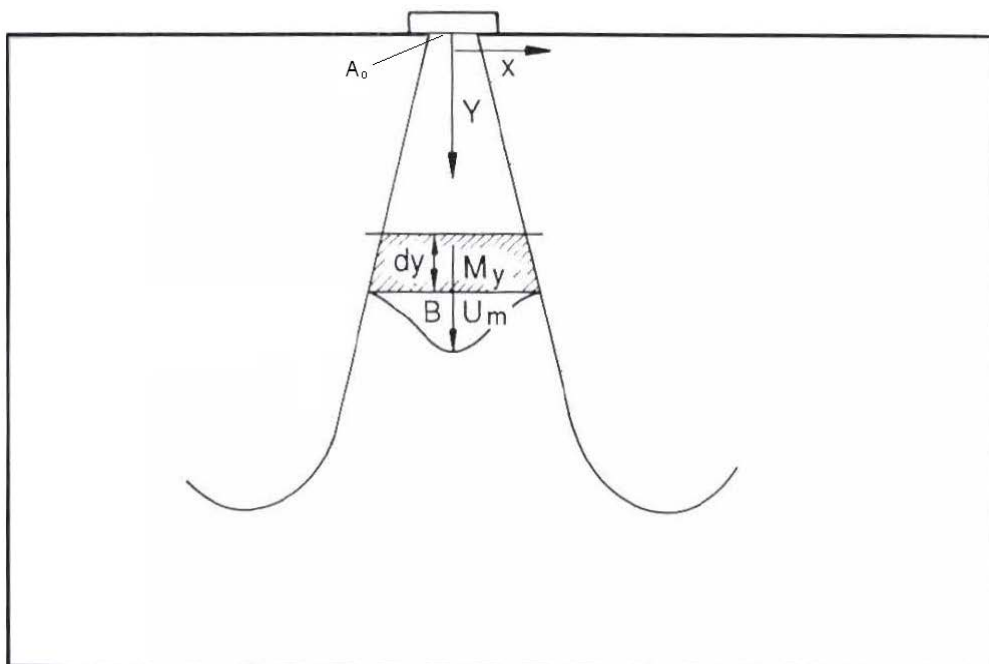
$$q_V = 0,0116(g\beta\Delta T_f)^{0,4}y^{1,2} \left[\frac{m^3/s}{m}\right]$$



Figur 2-11 Konveksjonsstrøm langs vertikalflate [1]

2.3.3 Vertikal stråle med oppdrift

Luft tilføres fra et høy punkt i rommet med en lavere temperatur enn romluften. Dette kan omtales som en vertikal stråle og utgjør et spesialtilfelle av stråler som blåses skrått ut i forhold til et horisontalt plan [1]. Tilfellet er vist i Figur 2-12.



Figur 2-12 Vertikal stråle tilført fra tak [1]

Luften vil falle mot gulvet så lenge den er undertemperert da akselerasjonen mot gulvet er drevet av temperaturdifferansen mellom den tilførte luften og omgivelsestemperaturen. Når differansen er lik null vil strålen «bremses». Strålen trekker inn luft fra omgivelsene slik at volumstrømmen og temperaturen øker. Temperaturdifferansen har større betydning enn hastigheten luften tilføres ved.

Strålen kan bli sett på som en aksesymmetrisk rund stråle og har dermed samme stråletverrsnitt som en fri konveksjonsstrøm. Strålen vil ta opp luft fra omgivelsene og ved en avstand y , kan sentralhastigheten uttrykkes ved [1]:

$$U_m = U_0 \left(Ar_0 \frac{\rho_0}{\rho_r} \frac{4,3}{C_b^2} \frac{\sqrt{A_0}}{y + y_p} + \left(\frac{\rho_0 i}{\rho_r \varepsilon} \frac{1,54}{C_b} \frac{\sqrt{A_0}}{y + y_p} \right)^3 \right)^{\frac{1}{3}}$$

Uttrykket for sentralhastighet kan igjen benyttes til å finne luftmengden ved en gitt avstand dersom tverrsnittarealet av strålen er kjent. Uttrykk for stråletverrsnitt av en aksesymmetrisk stråle er gitt i 2.3.1.

Sentraltemperaturen for samme tilfelle kan beregnes ved:

$$\Delta T_m = \Delta T_0 \frac{\rho_0}{\rho_r} \frac{4,3}{C_b^2} \frac{A_0}{(y + y_p)^2} \left(Ar_0 \frac{\rho_0}{\rho_r} \frac{4,3}{C_b^2} \frac{\sqrt{A_0}}{y + y_p} + \left(\frac{\rho_0 i}{\rho_r \varepsilon} \frac{1,54}{C_b} \frac{\sqrt{A_0}}{(y + y_p)} \right)^3 \right)^{-\frac{1}{3}}$$

Uttrykkene kan forenkles ved og blant annet anta konstant tetthet for luften. ρ_r er tettheten til luften i rommet og ρ_0 er tettheten til luften som blir tilført rommet, disse er avhengig av lufttemperaturen.

Vertikale temperaturgradienter vil påvirke beregningene. En måte å kompensere for temperaturgradienten med oppdrift er å regne med en midlere omgivelsestemperatur i vertikalretningen. I følge [1] vil ikke hastighets- og temperaturprofilen til strålen være fullt utviklet før strålen har tilbakelagt en distanse på 3-6 ganger strålenstverrsnitt. Begge uttrykkene er avhengig av Archimedestallet presentert i avsnitt 2.3.4.

2.3.4 Archimedestallet

Archimedestallet er et dimensjonsløst tall som angir forholdet mellom oppdriftskrefter og hastighet. Tallet er relevant når en luftstrøm har forskjellig temperatur fra omgivelsesluften og uttrykkes ved[7]:

$$Ar = \frac{g \sqrt{A_0} \beta \Delta T}{U_0^2} \quad \text{eller} \quad Ar = \frac{\Delta \rho g L}{\rho v^2} [25].$$

A_0 tilsvarer arealet til tilluftsåpningen og U_0 er tilluftens hastighet. Dersom Archimedestallet er høyt vil oppdriftskreftene være dominerende. Likningen viser også en avhengighet av temperaturdifferansen og når denne reduseres vil Archimedestallet redusere.

2.4 Ventilasjonseffektivitet

Ventilasjonens effektivitet kan defineres som systemets evne til å fjerne forurensninger som produseres i rommet ved å redusere konsentrasjonen i oppholdssonen. Den er uttrykt ved forholdet mellom konsentrasjonen i avtrekksluften og konsentrasjonen i oppholdssonen.

$$\varepsilon_v = \frac{C_e - C_s}{C_n - C_s}$$

C_e : konsentrasjonen av forurensning i avtrekksluften

C_s : konsentrasjon av forurensning i tilluft

C_n : konsentrasjon av forurensning i målepunkt/pustesonen

I en to-sonemodell vil det være ulik konsentrasjon i oppholdssonen og den øvre sonen hvor luften blir sugd ut. For situasjoner hvor konsentrasjoner over utendørnivå eller over nivå i tilluft er av interesse kan likningen forkortes til:

$$\varepsilon_v = \frac{C_e}{C_n}$$

Omrøringsventilasjon vil maksimalt kunne oppnå en effektivitet på 1, fortreningsventilasjon har en høyere ventilasjonseffektivitet og vil være minst 1.

2.4.1 Ventilasjonseffektivitet for termiske forhold

Ventilasjonseffektivitet kan også vurderes ut fra termiske forhold hvor målet er å holde romtemperaturen innenfor akseptabel grense. Uttrykket kan bli sett på som ventilasjonsanleggets evne til å fjerne overskuddsvarme og er gitt ved [26]:

$$\varepsilon_T = \frac{T_s - T_e}{T_s - \langle T \rangle_0} \times 100 [\%]$$

T_s : tilluftstemperatur

T_e : Avtrekkstemperatur

$\langle T \rangle_0$: gjennomsnittstemperatur i oppholdssonen

En temperatureffektivitet, $\varepsilon_T > 100 \%$, vil si at temperaturen i avtrekket er høyere enn temperaturen i oppholdssonen slik at kjølebehovet er mindre enn ved omrøring.

2.5 Ventilering av skoler

Byggforsk [2] presenterer tre løsninger for ventilering av skoler; balansert, mekanisk ventilasjon, mekanisk eller naturlig avtrekkssystem og desentraliserte ytterveggsaggregater. Balansert, mekanisk ventilasjon bør installeres med varmegjenvinner for avtrekksluft og filtrering for å redusere mengden av uønskede partikler fra uteluften.

Dette begrepet omfatter også ventilasjonssystemer med kulvert for føring av tilluft definert som et balansert, hybrid ventilasjonssystem med lavt trykkfall. I mange eldre skoler er mekanisk eller naturlige avtrekkssystemer benyttet. Dette fungerer generelt lite tilfredsstillende i forhold til dagens krav og et balansert, mekanisk anbefales istedenfor rehabilitering av anleggene. Ved desentraliserte ytterveggaggregater kan tilfredsstillende ventilering av enkelte rom oppnås gjennom forvarmet og filtrert friskluft.

Av de tre løsningene vil et balansert, mekanisk ventilasjonssystem være den sikreste løsningen for å oppnå et tilfredsstillende inneklima kombinert med lavt energibruk og blir for det meste benyttet i dag. Andre løsninger med erfaring fra norske skoler er kulvertventilasjon både med og uten forvarming av tilført luft og ventilering gjennom fasaden [27]. Sammen med mekanisk ventilasjon er det kulvertventilasjon med mekanisk forvarming som har størst mulighet i Norge og som resulterer i best inneklima.

Kulvertventilasjon hvor luften forvarmes er i *Bygningsintegrert ventilasjon – en veileder* [18] omtalt som «den norske modellen». I tillegg til denne er fire andre modeller omtalt: svensk, dansk, tysk og finsk modell. Alle modellene representerer bygningsintegrerte, hybride løsninger som utnytter naturlige krefter og benytter vifter i større eller mindre grad. Bruk av andre mekaniske komponenter varierer og den svenske modellen er den som ligger nærmest ren naturlig ventilasjon. Den omtales som naturlig ventilasjon med hjelpevifter og ingen form for varmegjenvinning blir benyttet. Den finske modellen benytter flere mekaniske komponenter og blir omtalt som mekanisk lavtrykktapeventilasjon med naturlig assistanse. Her blir ikke naturlige drivkrefter bevisst benyttet i samme grad som for de andre modellene.

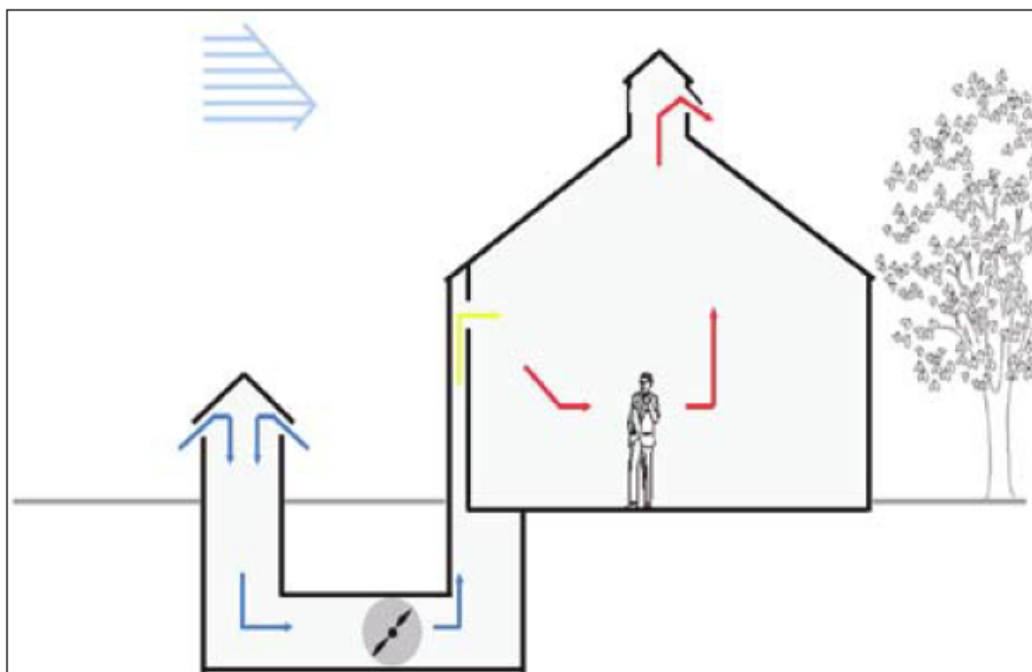
2.5.1 Kulvertventilasjon

Den norske og svenske modellen representerer kulvertventilasjonsløsninger hvor luften tas inn ved bakkenivå gjennom en betongkulvert. Kulverten har et stort tverrsnitt som bidrar til å gi lavt trykkfall. Avtrekksluften tas ut gjennom et avtrekkstårn plassert på taket. Inntakstårnet plasseres på utsiden av bygget og for å hindre undertrykk har tårnet skjermer for beskyttelse mot vind.

2.5.1.1 Den svenske modellen

Den svenske bygningsintegrerte modellen ble introdusert på starten av nittitallet med Torkel Andersson og Håkan Gilbro i spissen. Flere skoler i Sverige ble bygget etter denne modellen der i blant Fredkulla- og Risebergaskolen [28]. Prinsippet for den svenske modellen er illustrert ved Figur 2-13.

Løsningen er bygget uten konvensjonell luftbehandling og små trykkfall gjør at naturlige drivkrefter er tilstrekkelig store deler av året. Luften føres fra kulverten opp gjennom en dobbel skallmurvegg i tegl hvor luften blir tilført rommet fra høyt plasserte ventiler. Ventilene er plassert 2-2,5 meter over gulv. Avhengig av tverrsnittarealet er det føring av luft via veggene som står for en betydelig del av trykkfallet.



Figur 2-13 Den svenske modellen [18]

I hovedsak er det to måter å tilføre luften på. Enten gjennom små tilluftsåpninger hvor luften blåses ut som ved vanlig konvensjonell omrøringsventilasjon. Eller gjennom store tilluftsåpninger hvor den kalde luften vil «renne» ned teglveggen. Tilluften vil rive med seg varm omgivelsesluft og temperaturen på den kalde luften stiger. Ved gulvet vil den bre seg utover i et friskluftsjikt og stige oppover i rommet igjen sammen med varmen fra konveksjonskildene. Løsningen er omtalt som aktiv fortrenningsventilasjon.

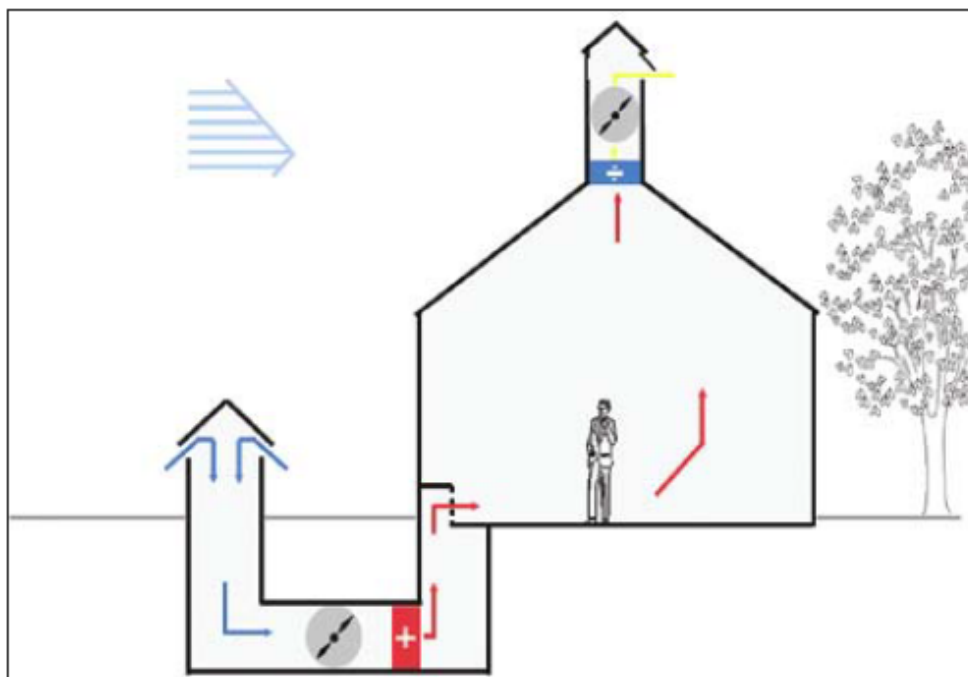
Avgjørende faktorer ved bruk av denne løsningen er: tilluftstemperatur, tilluftsmengde, utførelse av tilluftsåpninger, konveksjonskilder i rommet, romgeometri, aktivitet i rommet. Luftmengdene styres først og fremst ved å styre åpningsarealet på avtrekkssiden. Åpningen kan styres etter vindhastighet og vindretning for å opprettholde undertrykk over åpningen. Alternativt kan den styres etter CO₂ og/eller temperaturmålere, fuktighet eller utetemperatur. Hjelpeviftene i kulverten bør sekvensstyres med avtrekksåpningen som bør stå i maks stilling før viftene tas i bruk.

Varmegjenvinning av avtrekksluften benyttes ikke da dette vil føre til betydelige trykkfall. I stedet strupes tilført luftmengde kraftig ned på kalde dager for å unngå trekk og høyt oppvarmingsbehov. Problemet med en slik årstidstilpasning er at det til tider vil gi konsentrasjoner av CO₂ som overskrider kravene for et godt inn klima, i perioder over 2000 ppm. Lave luftmengder øker også problemer knyttet til emisjon fra materialer og valg av dette blir derfor viktigere.

Årstidstilpasning av luftmengdene bygger på teorien om at luftkvalitet oppleves som bedre ved lave temperaturer (18~20 °C). Derfor blir lavere luftmengder tillatt ved lavere romtemperatur.

2.5.1.2 Den norske modellen

For kaldere klima vil den norske modellen egne seg bedre da den gir mulighet for forvarming av tilluft kombinert med varmegjenvinning av avtrekksluft. Den norske modellen er illustrert i Figur 2-14.



Figur 2-14 Den norske modellen[18]

Modellen er en videreutvikling av den svenske modellen hvor mer mekanisk behandling av luften benyttes. Innføringen av økt mekanisk luftbehandling fører til mindre væravhengighet. Varmegjenvinneren plasseres i avtrekkstårnet og for ekstra forvarming kan et varmebatteri for ettervarming installeres i kulverten.

Sammenlignet med den svenske modellen har den norske modellen et større trykktap som kan føre til et økt behov for bruk av hjelpevifter. De største trykktapene er i varme- og gjenvinnerbatteriet og i eventuelle installerte filtre. Trykkfall i den norske modellen er typisk rundt 50-150 Pa [18].

Den norske modellen benytter vanligvis fortrenningsventilasjon med tilførsel av luft ved gulvnivå og avtrekk plassert høy i rommet. Luften tilføres med lav hastighet og 2- 4 °C undertemperatur i forhold til dimensjonert romtemperatur. Mange av skolene bygget etter den norske modellen styrer luftmengden etter CO₂. En vanlig strategi er årstidstilpasning hvor høyere CO₂-konsentrasjoner er tillat i kalde perioder for eksempel 1500 ppm ved en utetemperatur under -15 °C. Ved god prosjektering av denne type anlegg og rette fortrenningsdiffusorer kan trekkproblemer vinterstid bli unngått.

2.5.2 Fasadeventilasjon

Den enkleste formen for ventilering gjennom fasaden er ved å åpne vinduer, men dette blir ikke sett på som tilstrekkelig ventilering i dag. Mer avanserte former for fasadeventilering er tilfeller hvor luften enten bli tatt inn direkte gjennom fasaden eller ved at en dobbeltfasade eller et atrium benyttes til forvarming av luften.

Omtalt som henholdsvis den danske og den tyske modellen. For direkte tilførsel gjennom fasaden må åpningene plasseres slik at det ikke oppstår trekk og for kalde dager må luftmengdene reduseres. Dette kan gi samme problem som ved den svenske modellen hvor CO₂- verdiene overskrider krav. Problemer knyttet til trekk kan også reduseres ved å fordele luften gjennom en fordelingskanal med mange små tilluftsdyser før den tilføres oppholdssonen [27]. I begge løsningene for fasadeventilering kan luften tilføres enten høyt oppe på veggen eller ved gulvnivå. Fra høysittende åpninger vil trekkfaren reduseres når luften forvarmes. Tilfeller med lavt tilført luft som fortrenningsventilasjon ved gulv vil oppnå en høyere ventilasjonseffektivitet.

2.6 Computational Fluid Dynamics (CFD)

2.6.1 CFD i denne oppgaven

Programmet som er benyttet til å utføre simuleringene i denne oppgaven er ANSYS Fluent som er et CFD simuleringsverktøy. Programmet kan benyttes til å simulere, sette opp og løse blant annet strømninger av fluider og varmeoverføringer og kan brukes på 1D, 2D og 3D strømninger.

CFD simuleringer er her benyttet til å studere hastighetsvektorene til ventilasjonsluften, temperaturfordeling og forurensningskonsentrasjonen i rommet. Hovedfunksjonen til CFD-verktøyet er å vurdere om ventilasjonsdesignet tilfredsstillende kriterier som er gitt for termisk komfort og luftkvalitet. Andre programmer for bygningssimulering må benyttes for beregninger av energibruken til anlegget [29].

2.6.2 Hva er CFD?

Computational Fluid Dynamics blir brukt til å studere fluider i bevegelse og hvordan dette påvirker forskjellige prosesser som for eksempel varmeoverføring og bevegelsesmønsteret til fluidet. ANSYS Fluent og andre CFD-verktøy bygger på likningene for massebevaring, bevegelsesmengde og energibevaring.

For alle strømninger blir likninger for masse og bevegelsesmengde løst [30]:

1. Massebevaring

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

2. Bevegelsesmengde (Navier-Stokes)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla(\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla(\bar{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F}$$

p: statisk trykk

ρ : tetthet

g: tyngdekraft

F: eksterne krefter

$$\bar{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \vec{v} I \right]$$

Ved å legge et nett av noder på geometrien som skal simuleres blir det utført numeriske beregninger hvor likningene blir løst i hver node. Et nett som inneholder tilstrekkelig tetthet med noder er derfor viktig for nøyaktigheten til løsningen av problemet.

2.6.3 Energilikningen

For å studere varmeoverføring og temperaturfordelingen til modellen må likninger for energi/varmeoverføring aktiveres og ANSYS Fluent løser følgende likning for energi:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla(\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla(k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\bar{\tau}_{eff} \vec{v})) + S_h$$

k_{eff} : ledningsevne, lik $k + k_t$ hvor k_t er termisk, turbulent konduktivitet definert ut fra valgt turbulens modell.

J_j : diffusjons fluks

S_h : varme fra kjemisk reaksjon eller annen varmekilde

De andre tre uttrykkene på høyre siden representerer energi overført gjennom konduksjon, partikkel diffusjon og viskositet.

2.6.4 k-ε turbulens modell

Turbulensmodellen k - ϵ løser to separate transportlikninger hvor k er kinetisk energi brukt for turbulenshastighet og ϵ er effekttapet. Antakelser for modellen er at strømmingen er fullstendig turbulent og effekten av molekylær viskositet er neglisjerbar.

Modellen er uttrykt ved to transportlikninger for henholdsvis k og ε som er gitt ved [30]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon$$

G_k : generert kinetisk energi fra hastighetsgradienter

G_b : generert kinetisk energi fra oppdrift

Y_M : bidrag til totalt effekttap

σ_k og σ_ε : Prandtl tall for k og ε

$C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$: konstanter

Turbulens/eddy viskositet, μ_t , kan beregnes ved å kombinere k og ε og er uttrykt ved:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

C_μ : konstant = 0,09

k - ε modellen er en av de mest brukte modellene for å analysere bevegelser til luft og strømninger i et rom. Fordelene ved denne modellen er den kan anvendes på omfattende strømningsproblemer og at den krever kortere beregningstid enn andre mer komplekse modeller [7]. En svakhet ved standard k - ε modell er at for lave hastigheter vil det være vanskelig å oppnå konvergens.

For ε -likning er bruk av Enhanced Wall Treatment anbefalt (EWT- ε). Denne kombinerer en to-lags modell med såkalte «enhanced wall functions». Ved bruk av denne kreves det at nettet av noder er tilstrekkelig tett nok på samtlige steder.

2.6.5 Mach nummer

I Fluent kan kompressible gasser defineres ut fra Mach nummeret som er et dimensjonsløst tall uttrykt ved [30]:

$$M \equiv u/c$$

c er lydens hastighet i gassen/fluidet uttrykt ved $c = \sqrt{\gamma RT}$ hvor $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$

Tallet gir forholdet mellom fluidets hastighet og lydens hastighet. For normal romtemperatur kan lydhastigheten i luft settes til 340 m/s [31].

Når tallet er mindre enn 1 kalles strømmingen subsonic. For et Mach nummer mye mindre enn 1, $M \ll 0,1$, kan effektene fra kompressibiliteten og variasjoner av gassetthet i forhold til trykk neglisjeres.

2.6.6 Strålingsmodell – Surface to surface

Ved bruk av fortreningsventilasjon og i tilfeller med en to-sone modell oppstår det en vertikal temperaturgradient i rommet. Temperaturdifferansen mellom den øvre sonen og oppholdssonen gir varmeoverføring ved stråling mellom de to sonene og dette påvirker temperaturgradienten[20].

Med en antakelse om at de to sonene er grå overflater med emissivitet ε_1 og ε_2 kan strålingsutvekslingen mellom de to sonene beregnes som:

$$q_{r21} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{R_{tot}}$$

R_{tot} er summen av den totale overflatemotstanden og «view resistance», R_{view} , beregnet ut fra:

$$R_{tot} = R_{S1} + R_{view} + R_{S2} = \frac{1 - \varepsilon_1}{A_1 \varepsilon_1} + R_{view} + \frac{1 - \varepsilon_2}{A_2 \varepsilon_2}$$

R_{view} avhenger av «view factoren».

I simuleringer må derfor en strålingsmodell benyttes. Varmestråling kan deles i to grupper, kortbølget og langbølget stråling. Kortbølget stråling omfatter solstråling, dagslys, belysning og stråling fra flater med høy temperatur. Langbølgestråling omfatter flater med lav temperatur rundt romtemperaturen [31].

Ved å anta tilstrekkelig med solavskjerming for rommet vil det hovedsakelig være langbølget stråling mellom overflater som har betydning ved valg av strålingsmodell. Bølgelengden til strålingen er viktig da absorptans, reflektans og transmittans avhenger av dette. Verdier for forskjellige materialer er gitt i Tabell 2-7.

Materiale	Emissivitet/absorptans	Reflektans
Absolutt svart materiale	1	0
Betong, murverk, puss	0,93	0,07
Svart takpapp	0,93	0,07
Bygningspapp, papir	0,89	0,11
Treverk, malt og umalt	0,85-0,95	0,05-0,15
Tekstiler	0,75-0,90	0,10-0,25
Glass, blankt	0,89	0,11

Tabell 2-7 Emissivitet, absorptans og reflektans for noen materialer[31]

I ANSYS Fluent er det mulig å velge mellom fem forskjellige strålingsmodeller. Modellen brukt i denne oppgaven er *Surface-to-Surface Radiation Model (S2S)*. Stråling må inkluderes i simuleringen for å komme så tett opp til en reell situasjon som mulig. S2S-strålingsmodellen har blitt benyttet for CFD analyser av utåndet forurensning ved bruk av blant annet fortreningsventilasjon [32]. Modellen har også blitt benyttet ved simulering av termisk miljø rundt en detaljert modell av et menneske [33]. Stråling fra en menneskekropp til andre overflater i rommet overføres gjennom S2S-stråling. Ulempen med modellen er at beregning av view factors er kan kreve lang beregningstid.

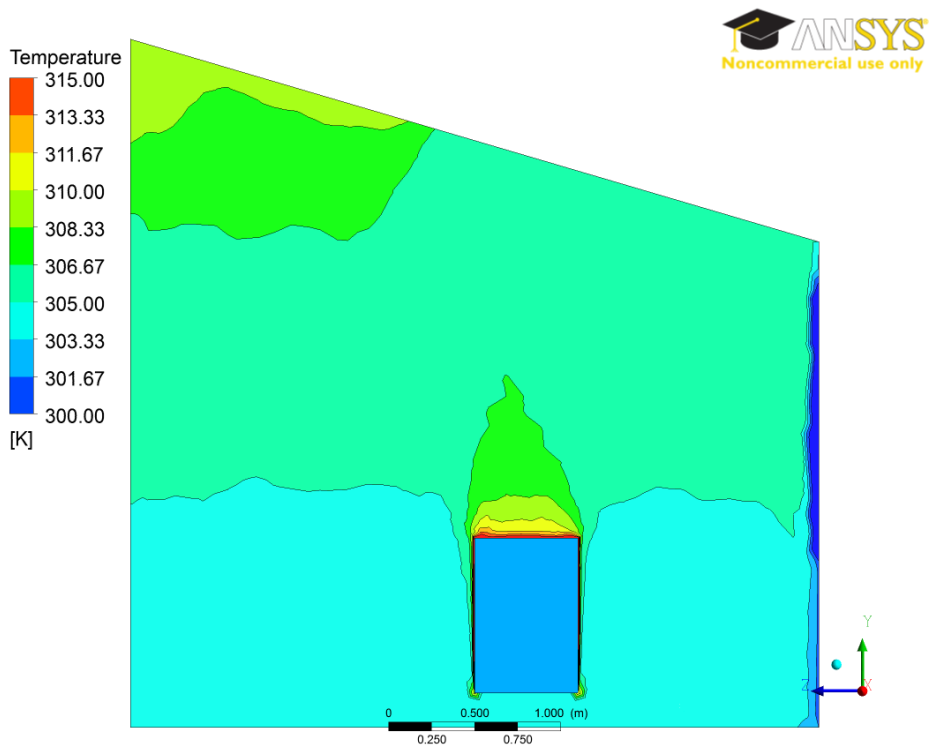
En tommelfinger regel gitt i *ANSYS Fluent – Theory Guide* [30] er at varmeoverføring ved stråling bør inkluderes når Q_{rad} er stor sammenlignet med den konvektive og konduktive varmeoverføringen.

$$Q_{rad} = \sigma(T_{max}^4 - T_{min}^4)$$

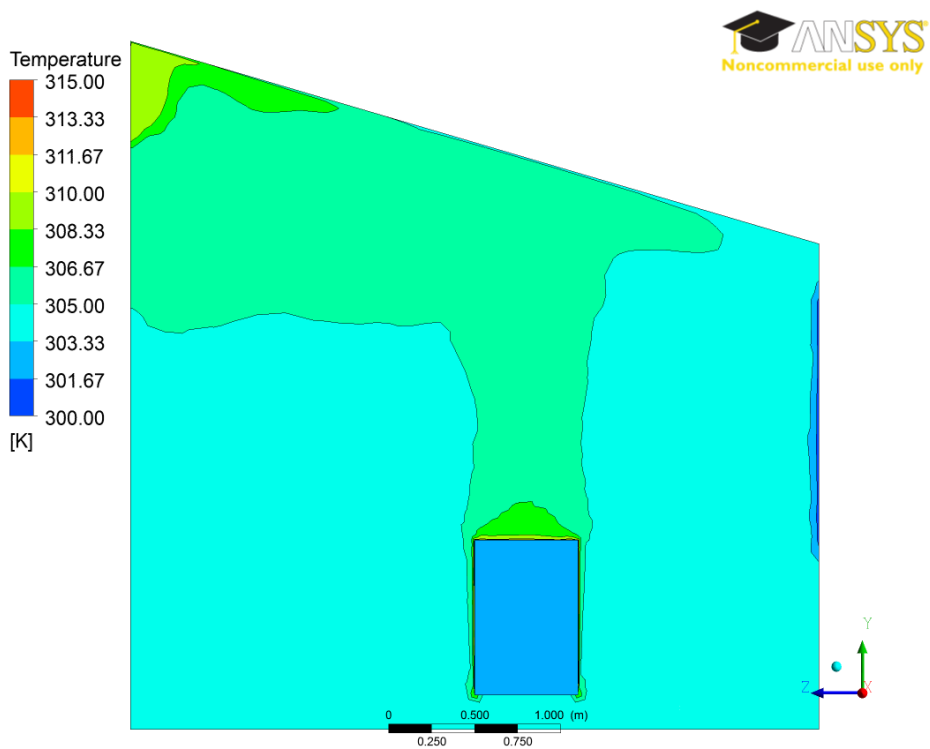
Antakelser ved bruk av S2S:

- Alle overflater er grå. Det vil si at emissiviteten og absorpsjonsevner er uavhengig av bølgelengden.
- Alle overflater er diffuse og refleksjon fra flatene er uavhengig retning inn/ut på strålingen. For diffuse overflater er emissivitet og absorptans like [31].
- Energien som utveksles mellom to flater avhenger av størrelse, avstand og orientering. Parameterne blir inkludert i «view factor» som beregnes av programmet.

Temperaturfordelingen i et rom vil være påvirket av varmeoverføring gjennom stråling fra overflatene rommet. I [29] er behovet for å inkludere langbølget stråling mellom overflater demonstrert ved å kjøre simuleringer med og uten strålingsmodell. Simuleringene viste en betydelig forskjellig i temperatur og hastighetsfeltet for de to tilfellene. En liknende simulering av et rom er her gjort på nytt. Rommet består av ett avtrekk plassert øverst til venstre, en varmekilde med varmeproduksjon 70 W/m^2 , en yttervegg og et vindu med U-verdier lik 0,18 og 1 W/mK . Utendørstemperaturen er 0°C som gir varmetap gjennom yttervegg og vindu. Resultatene er vist i Figur 2-15 og Figur 2-16. Forskjellen på temperaturfordelingen for de to tilfellene viser at bruk av en strålingsmodell er nødvendig da det vil ha betydning for simuleringsresultatet. Blant annet strekker konveksjonsstrømmen fra varmekilden seg høyere opp i rommet for tilfellet med strålingsmodell, mens i tilfellet uten strålingsmodell er konveksjonsstrømmen mindre tydelig. Kaldraset er også mindre ved bruk av strålingsmodellen. Gjennom stråling kan en varm overflate overføre varme til en kald flate som for eksempel vinduet.



Figur 2-15 Temperaturkontur uten strålingsmodell



Figur 2-16 Temperaturkontur ved bruk av strålingsmodell

3 Modell

3.1 Valgt løsning

Den valgte løsningen bygger på en liknende ventilasjonsløsning som ble studert i prosjektoppgave høsten 2013.

Ventilasjonsløsningen som er valgt i denne oppgaven er et hybrid ventilasjonssystem med kulvert som bygger på den svenske og norske modellen hvor aktiv fortrengning benyttes. Fortrengningsprinsippet benyttes for å oppnå høy ventilasjonseffektivitet. Luften med lav hastighet og undertemperatur tas inn via en kulvert og tilføres rommet gjennom ventiler plassert høyt på veggen. I et kaldt klima som i Norge vil forvarming være et nødvendig tiltak på vinterstid for og kunne tilfredsstille kravene til temperatur, luftskifte og konsentrasjon av CO₂. Luftmengden må kunne justeres etter behov og årstid for å unngå unødvendig energibruk samtidig som et godt innneklima er opprettholdt.

Egenskaper ved hybrid, kulvertventilasjon [18, 34]:

- Termisk masse i kulverten kan utnyttes til passiv kjøling av tilluften på sommerstid og tilføre varme på vintertid.
- Utforming og dimensjonering av føringsveier og komponenter for å skape lave trykkfall og dermed lavere energibruk til vifter og økt bruk av naturlige krefter.
- Føringsveiene for luften er enkle å renholde.
- Utstrakt bruk av behovsstyrte luftmengder, fortrinnsvis med kombinasjonen CO₂- og temperaturfølere.
- Det brukes vanligvis fortrengningsventilasjon for å få høy ventilasjonseffektivitet.

I simuleringene er det ikke fokusert på den tekniske delen av ventilasjonsløsningen og energiforbruk til for eksempel forvarming eller viftedrift er ikke beregnet. Tanken bak anlegget er presentert for å skape et helhetlig bilde av systemet.

3.1.1 Kulvert

Friskluften føres inn via en kulvert som er forbindelsen mellom luftinntaket og sjaktene til den ventilerte sonen [34]. Den termiske masse til kulverten bidrar til forvarming av luften på vinterstid og kjøling om sommeren. Målinger gjort ved Vargborgkolen i Storfors, Sverige, hvor kulvert for transport av tilluft benyttes viser at (uten annen form for forvarming) temperaturen som tilføres klasserommene aldri er under 10 °C vinterstid (- 15 grader ute) og aldri over 20 °C sommerstid [35].

Effekten fra kulverten kan likevel forventes å være utilstrekkelig på de kaldeste dagene vinterstid og tiltak for forvarming av luften i form av varmegjenvinning og ettervarmingsbatteri bør installeres. Størrelse på kulverten gjør det enkelt å rengjøre og vedlikeholde anlegget da det er mulig å gå i den.

3.1.2 Vifter

Vifter installeres på tillufts- og avtrekkssiden som assistanse for dager hvor naturlig drivkraft ikke er tilstrekkelig. Spesielt på varme dager er det fare for at oppdriftskrefter og vind ikke strekker til og avtrekksviften må da benyttes for å skape et økt drivtrykk. Vifter bidrar til å øke trykkfallet gjennom systemet og må derfor installeres slik at dette blir minst mulig. Vanlig plassering av assisterende vifte på tilluftssiden er i kulverten.

3.1.3 Filter

Tilluften kan filtreres gjennom passiv filtrering etter luftinntaket. Når luften holder lav hastighet vil store partikler sedimenteres. Ulempen ved bare å benytte passiv filtrering er at det krever et anlegg som tåler støv og mindre partikler. Anlegget har føringsveier som forenkler rengjøring og vedlikehold. Aktiv filtrering kan og må benyttes dersom uteluften ikke har tilfredsstillende kvalitet året gjennom. Dette gir også bedre beskyttelse av komponenter i tillegg til bedre beskyttelse mot helseskadelige partikler. Ulempen er at trykkfallet i systemet øker [34].

Retningslinjer for dimensjonering av filtrene er gitt i Tabell 3-1:

Filtrering	Størrelse og tiltak	Anbefalte verdier
Passiv	Maksimal hastighet i utfellingsområdet rett etter luftinntak	0,5 m/s
Aktiv	Anbefalt maksimalt trykkfall over filtervegg	30 Pa
	Filterskift	Hvert år på ettersommeren/etter pollensesongen

Tabell 3-1 Dimensjonering av filtre[34]

3.1.4 Varmegjenvinning

Det kalde klimaet i Norge gjør at varmegjenvinning av avtrekksluften vil være et lønnsomt tiltak. Ved bruk av et gjenvinnerbatteri kan rundt 45-60 % av varmen fra avtrekksluften utnyttes. Tabell 3-2 viser anbefalte verdier fra BYGGFORSK ved dimensjonering av varmebatteriet.

Trykkfall og virkningsgrad	Anbefalte verdier
Trykkfall over gjenvinningsbatteri ved antatt gjennomsnittlig luftmengde	20 Pa
Dimensjonerende temperaturvirkningsgrad ved jevn lufthastighet over varmegjenvinningsbatteriet	55%

Tabell 3-2 Anbefalte dimensjoneringsverdier fra Byggforsk [34]

For gjenvinning benyttes batterigjenvinning hvor et batteri plasseres i avtrekket for å utnytte varmen fra avtrekksluften. Varmen føres gjennom rør som leder til et batteri på tilluftssiden hvor varmen overføres. Et vannbasert ettervarmingsbatteri kan installeres for ekstra forvarming av tilluften ved behov.

Bruk av varmegjenvinning vil føre til et større trykktap, men behovet for vifter vil fortsatt være minimalt. Kombinert med behovsstyrte luftmengder og mindre behov for forvarming vil totalt energibehov fortsatt kunne bli lavt [18]. Trykktapet kan reduseres ved at luften passerer utenom gjenvinner- og ettervarmingsbatteriet når det ikke er behov for oppvarming [34].

3.1.5 Tilluftsventiler

Tilluftsventilene plasseres høyt på veggen for å skape et aktivt fortrenningsprinsipp med undertemperert tilluft. Høyden luften tilføres ved må være tilstrekkelig slik at lufttemperaturen øker og oppnår lav hastighet før den når oppholdssonen. Nærsonen i rommet er også avhengig av dette for å unngå for store ubrukte arealer.

Avstanden mellom ventilene må være stor nok til at luftstrålene ikke blandes med hverandre før de når oppholdssonen. Utformingen av ventilene har også betydning for den totale luftstrømmen i oppholdssonen og hastighet på luften i forhold til trekk.

3.1.6 Avtrekk

Avtrekkventilene er plassert på samme vegg som tilluftsventilene. Avstanden til tilluftsventilene må være stor nok til at det ikke oppstår kortslutning. Luften førest ut av klasserommet til et avtrekkstårn. For å opprettholde balanse i systemet må avtrekket kunne reguleres.

3.1.7 Strømning

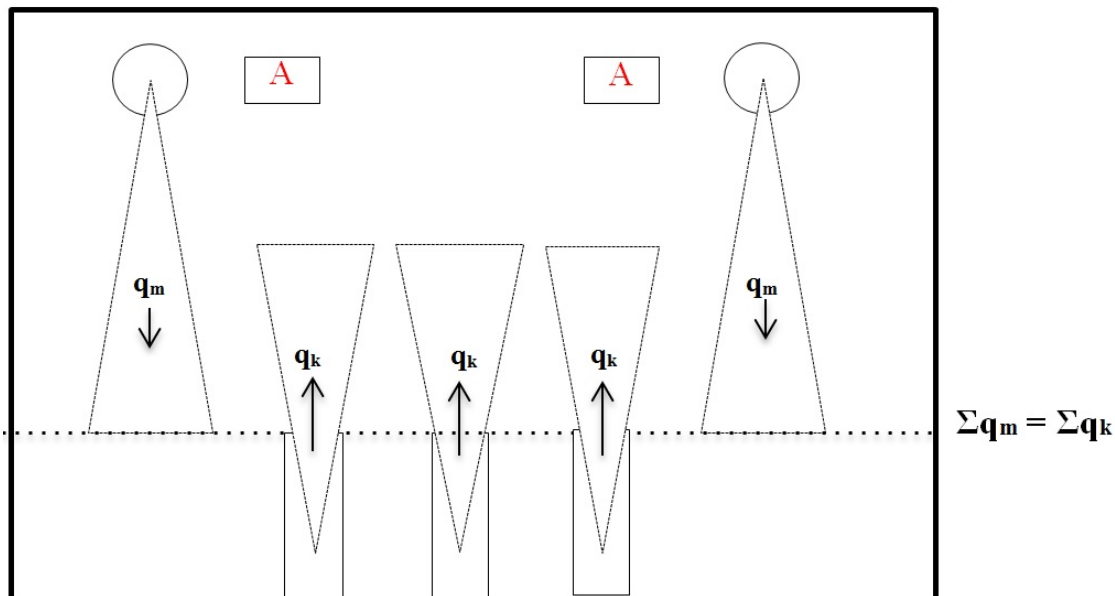
Oppholdssonen er i området fra gulvnivå til en høyde på 1 til 1,1 meter tilsvarende hodehøyden for en sittende person. Luftsjiktet for oppholdssonen vil legge seg der hvor konveksjonsstrømmen fra personene i rommet er lik den totale tilluftsmengden. Høyden på oppholdssonen og ideell plassering av ventiler kan beregnes, ref. kapittel 4. Med hensyn til nærsonen for ventilasjonen skal det være en avstand på minst 0,8 meter fra veggen hvor luften tilføres til plassene hvor elevene sitter.

Da luften tilføres med en lavere temperatur enn romluften faller luften nedover langs veggen. Tilluften kan presenteres på to måter. Enten som en halv konveksjonsstrøm fra en kald punktkilde eller som en halv vertikalstråle med oppdrift. Luftstrømmen vil være økende da den fanger opp luft fra omgivelsene underveis. Det er derfor viktig at den har rett temperatur og hastighet for å unngå at den stopper opp eller blander seg for mye med romluften før den når oppholdssonen. Det gjør at fortrenningsventilasjon ikke egner seg til romoppvarming og oppvarming blir gjort ved hjelp av radiatorer eller panelovner.

3.1.8 To sone-modell

Klasserommet blir sett på som en to sone-modell hvor luftsjiktet deler rommet i en ren og en forurenset sone, Figur 3-1. Den rene sonen vil være oppholdssonen som strekker seg fra gulvet og opp til luftsjiktet som skiller de to sonene. I den rene sonen vil forurensninger bli dratt med i konveksjonsstrømmen fra personene i rommet.

Den forurensede sonen er den øvre sonen hvor luften blir trukket ut gjennom avtrekket og hvor luften blir tilført. Det betyr at den rene, tilførte ventilasjonsluften vil dra med seg noe av den forurensede luften fra den øvre sonen ned i oppholdssonen.



Figur 3-1 To-sone modell

3.1.9 Regulering

Luftmengdene reguleres ved å installere sensorer for regulering av CO_2 , temperatur og eventuelt luftfuktighet. En kombinasjon av denne type sensorer benyttes der luftmengden styres etter CO_2 -nivå, men i tilfeller hvor temperaturen overskrider for eksempel $24\text{ }^\circ\text{C}$ kan sensoren overstyres og luftmengdene reguleres for å få lavere temperatur. Regulering av luftmengder utført av brukerne vil være mulig ved å åpne vinduer. Struping av tilluften som blir benyttet ved årstidsregulert ventilering i den svenske modellen er ikke et aktuelt tiltak. Selv om struping gir mindre oppvarmingsbehov vil høy personbelastning gi behov for større luftmengder. Økt personbelastning gjør at varmebehov reduseres, men behovet for friskluft øker. Regulering av varmebatteri for forvarming og radiatorer for å opprettholde tilført luftmengde er mer aktuelt på kalde dager.

3.1.10 Energiltak

Det er antatt godt isolerte vinduer med en U-verdi på $1,0\text{ W/m}^2\text{K}$. Vinduets egenskaper vil blant annet ha betydning for oppvarmingsbehov, luftmengder, lysforhold i form av dagslys og totalt energibruk. Ved å benytte vinduer med lav U-verdi kan oppvarmingsbehovet på vinterstid reduseres. Det vil også sørge for en høyere overflatetemperatur enn et dårligere isolert vindu og reduserer faren for kaldras og kaldstråling. Godt isolerte vinduer vil også ha lavere soltransmisjon og kombinert med regulerbar utvendig solavskjerming reduseres varmetilskudd fra solen. På sommerstid vil dette gi et redusert behov for kjøling.

Vinterstid vil soltilskudd kunne redusere oppvarmingsbehov, men i dette tilfellet med lav U-verdi og god solavskjerming vil tilskudd fra solen ikke bli inkludert i simuleringer. Utvendig fasade og tak har U-verdier gitt i henhold til kravene i TEK10 på 0,18 og 0,13 W/m²K.

Kalde områder som Norge er dårlig egnet til å samle varme i termisk masse i vegger. Yttervegger krever god isolasjon som igjen forhindrer solvarmen [36]. Dette er derfor ikke vurdert som et alternativ her.

3.1.11 Oppvarming

Fortrengningsprinsippet er ikke godt egnet for bruk av romoppvarming. I tillegg vil et ventilasjonsanlegg hvor romoppvarming er inkludert kreve et system med flere funksjoner. Dette gir et mer komplisert anlegg i forhold til antall komponenter og regulering. Feil i systemet og feil bruk kan da føre til økt energibruk og det er derfor anbefalt å ha separate systemer for ventilering og oppvarming. Oppvarming av rommet er nødvendig for å hindre at temperaturen i rommet faller under den laveste tillatte temperaturen på vinterstid på 20 °C. Radiatorer er et godt alternativ for oppvarming ved bruk av fortrengningsventilasjon og plasseres vanligvis under vinduer. Vannbaserte varmeanlegg foretrekkes ofte da de gjør det mulig å velge flere energibærere og for å unngå støvbrenning i rommene [27]. Installert gulvvarme vil kunne bidra til en lavere vertikal temperaturgradient og hindre trekk ved gulvet.

Det er viktig at oppvarmingssystemet ikke er tregt i den forstand at det ikke tilpasser seg endring i temperatur raskt nok. Størst effektandel i gulvvarme er derfor ikke ønskelig, da det vil bruke lang tid på å varme opp et rom som for eksempel ikke har hatt oppvarming på nattetid. Med tanke på energibruk er det også viktig at det er lett å regulere hvor mye varme som blir avgitt.

3.1.12 Klimagassutslipp

Klimagassutslipp er relatert til driften av ventilasjonsanlegget og romoppvarming. I tillegg er det utslipp relatert til prosesser utenfor selve driften som inkluderer produksjon, transport, montering av anlegg, materialbruk samt nedrivning og deponering av komponenter. Ventilasjonssystemet har ikke utslipp direkte fra anlegget ved drift, men utslippene er knyttet til primærenergi behovet og energimiksen som energien produseres fra. Egenskaper i den valgte løsningen som kan bidra til redusert klimagass i forbindelse med drift:

- Behovsstyrete luftmengder krever mindre tilførsel av friskluft enn tilfeller med konstante luftmengder.
- Bruk av lavemitterende materialer i rommet gjør at mindre luftmengder kan benyttes sammenlignet med bygg hvor valg av materiale ikke har blitt prioritert. Generelt burde materialer med lav emisjon velges ved rehabilitering og i nybygg da dette krever mindre luftmengder.
- Naturlige drivkrefter blir benyttet så langt det lar seg gjøre. Dette reduserer energibehovet sammenlignet med konvensjonelle mekaniske anlegg da driftstiden for vifter er mindre.

- Lave trykkfall gjennom systemet gir lavere behov for vifter.
- Termisk masse i kulverten kan bidra med oppvarming av luften på vinterstid og kjøling av luften på sommertid.
- Fortrengningsventilasjon har høyere ventilasjonseffektivitet og forventes å gi samme luftkvalitet i oppholdssonen som omrøringsventilasjon ved mindre luftmengde [15].
- Varmegjenvinning av avtrekksluft reduserer behovet for installert oppvarming i rommet og reduserer behovet for ekstra forvarming.

Årsaker til negativ utslippseffekt:

- Økt bruk av naturlige drivkrefter kan gi høyere oppvarmingsbehov.
- Bruk av varmegjenvinning og forvarming gir økte trykktap sammenlignet med ventilasjonssystemer hvor det ikke benyttes, den svenske modellen, og kan øke bruken av vifter.
- Økt materialbruk knyttet til inntakstårn, kulvert og avtrekkstårn.

3.1.13 Begrensninger

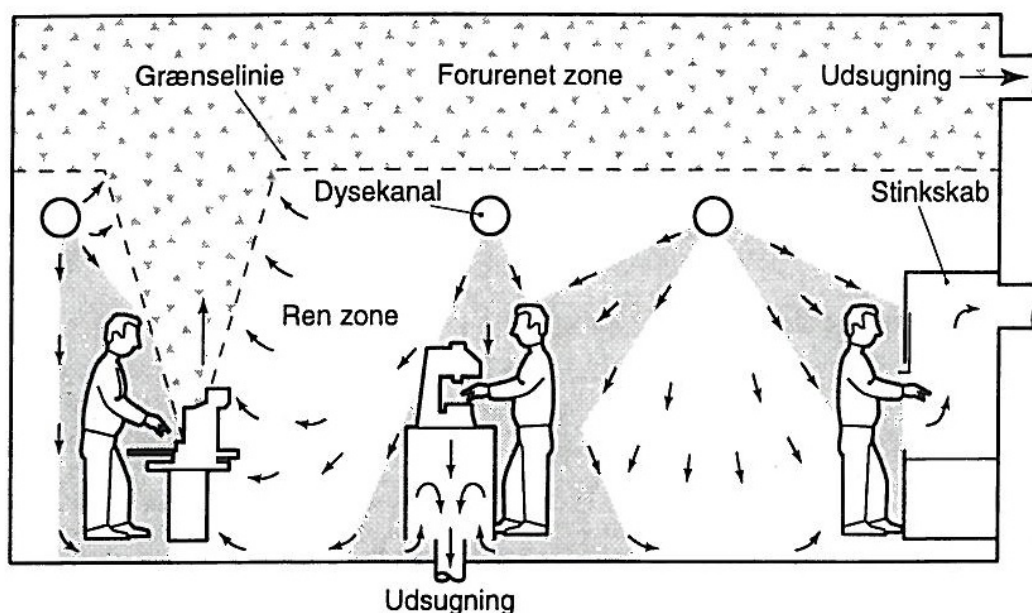
Ventilasjonsløsningen krever at avgjørelser blir tatt tidlig i planleggingsfasen da bygningsintegreerte anlegg utgjør en del av bygget og vil ha betydning for byggets arkitektur. Tilførsel av luft gjennom kulvert kan være vanskelig å benytte på større og høyere bygg fordi det krever en større kulvert med større tverrsnitt for å hindre for store trykkfall. Løsningen er derfor dårlig egnet for bygg med mange etasjer samt at det kan være vanskelig å få til på en god måte i bygg som har behov for lange føringsveier [18]. Andre problemer med kulverten er faren for kondens som kan lede til mikrobiologisk vekst på sommerhalvåret. Dette kan oppstå fordi den termiske massen vil kjøle ned luften. For å unngå dette må kulverten være gangbar for lett tilgjengelig inspeksjon og vedlikehold [18]. Fare for at radongass blir tatt opp i tilluften vil øke dersom dette eksisterer i grunnen. For å fungere optimalt er det behov for større romareal og høyere vegg enn når det benyttes ren mekanisk ventilerings. Modellen bygger på at det er et stort internt varmeoverskudd og egner seg derfor dårlig for rom uten dette. Uten varmegjenvinning vil det ikke egne seg i kalde indre strøk i Norge. Varmegjenvinning er ofte mindre effektiv enn ved mekaniske, konvensjonelle anlegg. Lav installert vifteeffekt gjør at reaksjonstiden i anlegget ikke alltid er rask nok ved endringer i utendørsklima og ventileringsbehov [4].

3.1.14 Eksempler på liknende ventilasjonsløsninger

Noen eksempler og teori på liknende ventilasjonsløsninger er gitt i avsnittet under. Ved å se på hvordan disse forventes å oppføre seg og på erfaringer fra skoler med hybride ventilasjonsløsninger kan parametere som gir grunnlag for forbedring kartlegges.

3.1.14.1 Aktiv termisk fortregning

Ventilasjonsprinsippet aktiv termisk fortregning er introdusert for bruk i industrien i *Håndbog i industriventilasjon* av Henning Hørup Sørensen. Betegnelsen *aktiv* benyttes da det er tilluften som sammen med termiske kilder påvirker og styrer strømningsbildet i rommet. Konveksjonsstrømmene i rommet vil strømme motsatt vei av tilluften som tilføres gjennom spesielt konstruerte dysekanaler.



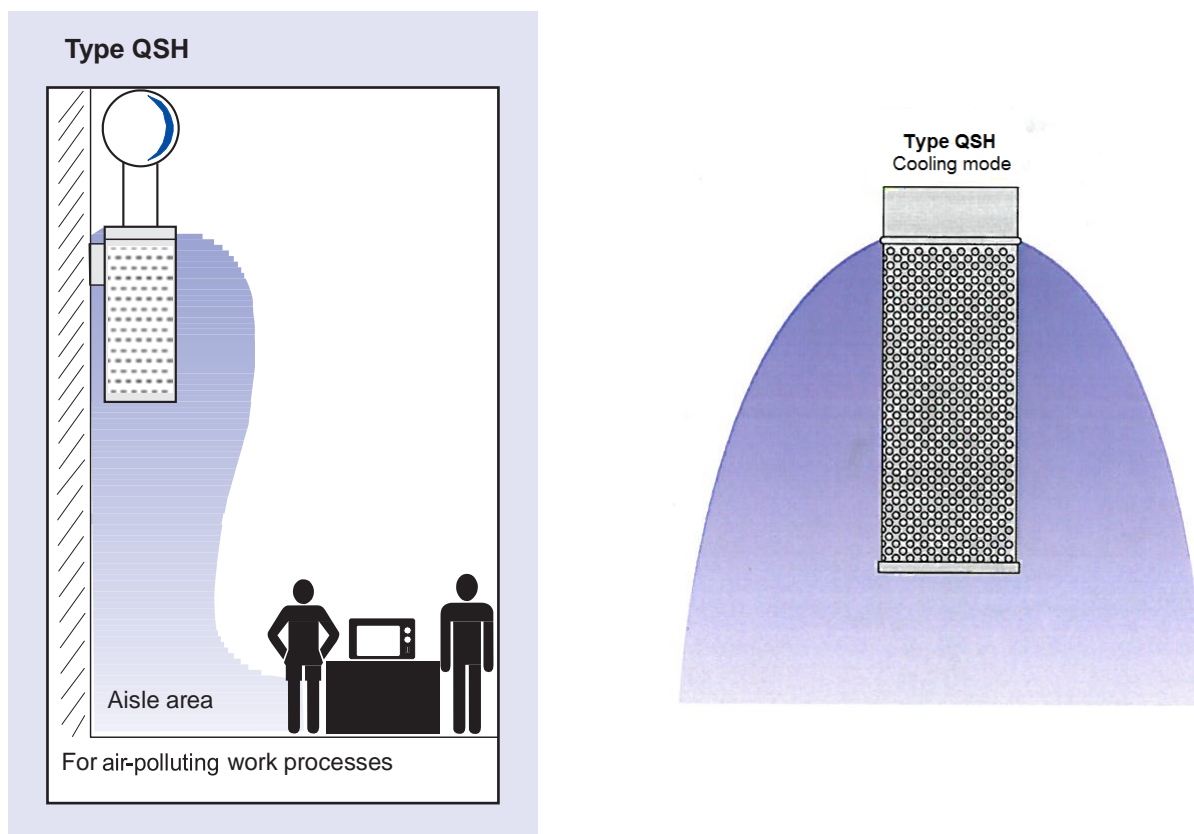
Figur 3-2 Aktiv fortregning for industriell ventilering [22]

I dette tilfellet vil det også oppstå en grenselinje der hvor volumstrømmen som tilføres den rene sonen er lik konveksjonsstrømmen som føres vekk fra oppholdssonen. Det er avgjørende at dysekanalene plasseres i den rene sonen for at ren tilluft ikke skal dra med seg forurensninger ned i oppholdssonen. Dette er viktig i et industrilokale da forurensningene kan være av farligere karakter enn det CO_2 er i et klasserom. Grenselinjen er derfor av stor betydning da den ikke må flytte seg i en slik retning ved endring i volumstrøm at den tilbakefører forurenset luft. For å sikre at grenselinjen plasseres over dysekanalene bør volumstrømmen dimensjoneres i henhold til luftkvaliteten. Dersom det er kalde forurensningskilder i rommet, kan disse fjernes ved å «fortreng» dem mot gulvet hvor det er plassert en utsugingsventil.

3.1.14.2 Luftfordelingssystem for fortregning

Trox Technik [37] produserer tilluftsventiler rettet mot industrien for lufttilførsel over oppholdssonen som kan benyttes ved varmebehov og kjølebehov. Løsningene er omtalt som et lav-turbulenssystem for tilførsel av frisk luft. Ventilene er formet som en sylinder med perforerte vegger. Systemet er illustrert i Figur 3-3.

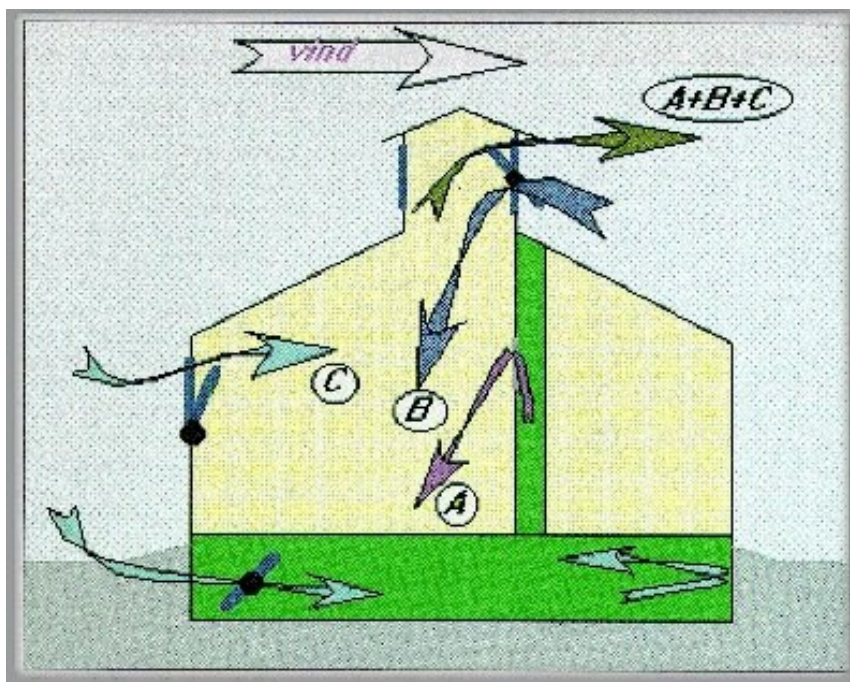
Anbefalt høyde for tilluftsventilene er 3,5 meter over gulvnivå og de kan henge fritt eller festet til veggen. Med veggplassert ventil vil luften fordele seg som en halv «klokke» og kan sammenlignes med en halv kald konveksjonsstråle. Anbefalt temperaturdifferanse for tilluftstemperatur er mellom -8 K for kjøling, til 12 K ved varmebehov. Retningen og fordelingen av tilluften kan justeres etter behovet. På grunn av mulighet for høye lufthastigheter i forhold til komfort er det anbefalt at systemet ikke festes over områder hvor for eksempel personer skal sitte og arbeide.



Figur 3-3 Trox Teknik fortrengningsventil [37]

3.1.14.3 Fredkulla- og Risebergaskolen

I Sverige er den svenske modellen med aktiv fortregning benyttet i blant annet Fredkulla- og Risebergsskolen [28]. Luften transporteres fra kulverten gjennom doble vegger og tilføres rommene fra ventiler plassert høyt oppe på veggen. Luften blir på vinterstid forvarmet fra den termiske massen i kulverten. I tillegg vil den bli forvarmet når den passerer gjennom de doble veggene. Tilluftsventilene er plassert 2 – 2,5 meter over gulvet og maksimal tilluftstemperatur er 15 °C. Prinsippet brukt i skolene er vist i Figur 3-4. Grunnventilasjonen er luften som blir tilført rommet fra et høyt punkt på veggen (A) i form av aktiv fortregning. Når utendørstemperaturen øker kan avtrekket åpnes for ekstra ventilering dersom tilført luftmengde fra grunnventilasjonen ikke er tilstrekkelig (B). Brukerne kan også styre luftmengden manuelt ved å åpne vinduer (C). Systemet har en hjelpevifte plassert i kulverten som kan benyttes dersom behovet for kjøling er stort.



Figur 3-4 Ventilasjonsprinsipp brukt i Fredkulla- og Risebergsskolen [28]

Begge skolene, Fredkulla og Riseberga, har vært med i prosjektet "Skolor med ventilation som använder självdrag". En delrapport fra dette prosjektet viser at for luftkvaliteten på Fredkulla svarer 80 % at den er bra og totalt 95 % at den er bra eller akseptabel. De samme tallene for Risebergsskolen er 71 % og 98 %. Tallene viser også at allergikere er fornøyd med luftkvaliteten hvor 94 % svarer bra eller akseptabel ved Fredkulla og 98 % ved Riseberga.

For varmekvalitet er det noe redusert antall som svarer bra (55 %) ved Riseberga, men 98 % svarer at den er bra eller akseptabel. Ved Fredkulla er tallene henholdsvis 70 % og 95 %. I prosjektet er et tilfredsstillende resultat at minst 80 % bedømmer luftkvaliteten og varmekomforten som bra eller akseptabel.

3.1.14.4 Skoler i Norge

Bygningsintegrert ventilasjon – en veileder utgitt av ØkoBygg (REF) presenterer flere skoler i Norge hvor bygningsintegrert ventilasjon blir benyttet. Noen skoler som bygger på den svenske modellen og med en liknende ventilasjonsløsning som i avsnittet over er nevnt under. Felles for alle tilfellene er at det benyttes en kulvertløsning og alle tilfører luften i form av høytsittende ventiler.

Frei barneskole

Frei barneskole ligger sør-øst for Kristiansund i Møre og Romsdal. Skolen har en løsning med kulvert og hjelpevifter og det er installert CO₂- og temperaturfølere i hvert klasserom. Når lyset i rommet slås av, lukkes ventilasjonspjeldet til klasserommet. Luften tilføres via en dobbel teglsteinvegg som strekker seg langs hele skolen. Skolen har ingen varmegjenvinning eller forvarming av luften, men god isolering reduserer behovet for forvarming.

Erfaringer fra skolen er at det har vært noen innkjøringsproblemer med blant annet feil plassering av CO₂ sensorer. Disse måtte flyttes da de ble plassert direkte under tilluftsventilene noe som ikke egner seg ved aktiv fortregning. Det er meldt om problemer med trekk og regninntrenging fra lanterninene, løsningen ble å overstyre automatikken for å lukke lanterninene. Ved bruk av tilluftsviften ble viftehastighet redusert på grunn av forstyrrende vibrasjoner fra kjelleren. I perioder er CO₂ oppe i 1300-1400 ppm som betyr at ventilasjonen ikke strekker til.

Jaer barneskole

Jaer barneskole var et Økobygg demonstrasjonsprosjekt. Ventilasjonsanlegget har et lavt trykkfall (ca. 11 Pa) og hjelpeviften er nesten aldri i bruk. Luften tilføres klasserommene i form av fortrenningsventilasjon pluss tallerkenventiler på veggen. Ved behov kan luften forvarmes med et varmebatteri. I hvert rom er det plassert CO₂- og temperatursensorer. CO₂-sensorene er plassert ved ca. 1 meter høyde og temperatursensorene er plassert ute og inne i hvert klasserom. Settpunktet for CO₂ er utetemperaturkompensert og ved -15 °C eller lavere tillates 1500 ppm og ved 10 °C tillates 1000 ppm. Når settpunktet for CO₂ overskrides, åpnes spjeldet i avtrekkstårnet dersom nivået fortsatt er for høyt starter hjelpeviften [38].

Skolen har et meget godt inneklimate og luftmengdene er typisk under halvparten av dimensjonerende luftmengder på grunn av behovsstyrt fortrenningsventilasjon. Luftmengdene er årstidstilpasset og anleggets styringssystem ble etterjustert for å redusere høyt energiforbruk. Konsentrasjonen av CO₂ er under 1000 ppm 86 % av tiden i okkupert klasserom ved utetemperaturer over 10 °C. Blant skolene presentert har elevene ved Jaer tilsynelatende vist størst tilfredshet med innemiljøet.

Sem barneskole

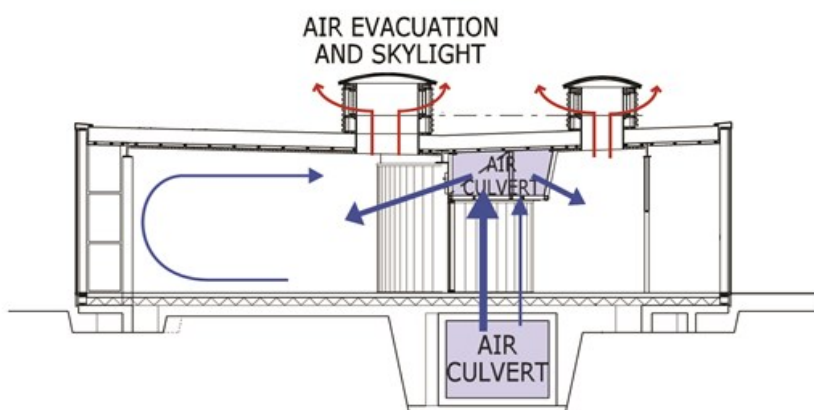
Ventilasjonsanlegget er bygget opp etter det svenskeprinsippet med kulvert, hjelpevifter og styring etter årstidstilpasset ventilasjonsmengde. Avtrekk av luft skjer via lanterniner på tak via motorstyrte åpningsvinduer. Størrelsen på åpningen er avhengig av utetemperatur og styres ikke etter CO₂ eller innetemperatur. Luften tilføres klasserommene ved at den stiger opp mellom doble vegger og siver inn i rommet som ved fortregning. Spillvann fra avløpsrør blir benyttet som forvarming av luften i kulvert. For ekstra kalde dager er forvarmerbatteri installert. Ventilasjonen driver seg selv hovedsakelig uten mekaniske installasjoner og er derfor tilnærmet fri for støy. Ved Sem er det også meldt om at det kan oppstå trekk fra lanterniner avhengig av vindretning. Strømningsretningen gjennom lanterninene har blitt reversert slik at kald luft faller ned på elevene. Ventilasjonsanlegget er benyttet i et nytt tilbygg og luftkvaliteten virker friskere i forhold til det gamle systemet.

Kvernhuset ungdomsskole

Kvernhuset ungdomsskole ligger i Fredrikstad kommune og ble bygget som en miljøskole. Skoleanlegget skal være miljøvennlig med sunt inneklimate og lavt energibruk. Miljøbegrepet ble inkludert i planlegging, bygging og senere livet og i innholdet i skolen.

Det ble også fokusert på at skoleanlegget skulle kunne brukes som et læremiddel til for eksempel undervisning i natur- og miljøfag. Skolen ble tatt i bruk i 2003 [39].

Ventilasjonsanlegget på skolen er årstidstilpasset og basert på kulvertløsning med lave trykkfall. Det er bare andre etasje av skolen som benytter ventilering basert på naturlige oppdriftskrefter. Første etasje benytter et konvensjonelt mekanisk anlegg. Varme fra avtrekksluften til det mekaniske anlegget blir gjenvunnet [40]. Det hybride ventilasjonsanlegget i andre etasjen tar luften inn via et luftinntakstårn som trekkes videre inn via en støpt kulvert under bygningen. Luften tilføres rommene via kanaler i tunge veggkonstruksjoner og høytsittende tilluftskanaler og trekkes ut gjennom åpninger i taket. Da luften er kjøligere enn romluften synker den mot gulvet som ved aktiv fortregning. Åpningsarealet på avtrekkene styrer ventilasjonsluftmengden i rommet og er utstyrt med følere for CO₂, temperatur og relativ fuktighet [41]. Løsningen for det hybride anlegget i plan 2 er vist i Figur 3-5.



Figur 3-5 Løsning for hybrid ventilasjonsanlegg ved Kvernhuset ungdomsskole [40]

En konstant romtemperatur på rundt 19- 21 °C og en relativ fuktighet på mellom 30 og 55 % prioriteres framfor kravet på maksimal konsentrasjon av CO₂ på 1000 ppm. Dette gjør at CO₂-nivået spesielt på vinteren vil overstige denne grenseverdien. Generelt aksepteres et CO₂-nivå på over 1000 ppm i opptil 25 % av brukstiden og for 90 % av brukstiden skal det være lavere enn 1500 ppm [39].

Erfaringer viser at skolen hadde noen innkjøringsproblemer da det ble bygger. Dette kan ha sammenheng med at hybrid ventilasjon fortsatt var i forsøksstadiet på dette tidspunktet (2002). Blant annet var styringsarmene i avtrekket defekte som førte til at det hybride anlegget var ute av drift. Ifølge målinger fungerte systemet tilfredsstillende etter at det var helt på plass. Misnøye som er uttrykt med anlegget er at det ikke fungerer optimal i perioder med store temperatursvingninger da det trenger et par dager på å tilpasse seg [40].

Grong barneskole

Grong barneskole benytter tradisjonell fortrengning ved gulvnivå, men er tatt med som eksempel da skolen er et hybrid anlegg etter den norske modellen med varmegjenvinning og varmebatteri for forvarming av luften. Kandidaten har også vært og sett på anlegget i forbindelse med masteroppgaven for å se på et hybrid anlegg i praksis. Barneskolen var en del av EU-prosjektet MEDUCA som omfattet undervisningsbygg i syv land med et mål om å skape demonstrasjonsbygg med lavt energibruk og attraktivt inneklima [36]. Bygget med barneskole var ferdig sommeren 1998.

Tilluftstårnet til anlegget er plassert på utsiden av bygget, hvor luften føres via betongkulvert til et distribusjonskammer i kjellere. Luften blir videre fordelt i klasserommene ved at den stiger opp fra distribusjonskammeret gjennom kanaler som kommer ut ved gulvnivå i klasserommene hvor den tilføres som ved fortrenningsventilasjon. Bygget har et solfangerrom på loftsnivå hvor varm og forurenset luft fra klasserommene trekkes ut gjennom regulerbare ventiler. Solfangerrommet fungerer som plenumskammer for avtrekksluften og den varme luften her bidrar til økte oppdriftskrefter for anlegget. Avkasttårnet er sentralt plassert på taket. Hjelpevifter er installert på både tilluftssiden og på fraluftssiden som hovedsakelig brukes til kjøling om sommeren når oppdriftskrefter ikke strekker til.

Forvarmingen av tilluften har tre trinn:

- Trinn 1: varme fra termisk masse i tilluftskulverten
- Trinn 2: varmeveksler tilfører gjenvunnet varme fra avtrekksluften
- Trinn 3: vannbasert ettervarmingsbatteri.

Soltilskudd i solfangerrom bidrar med varme til varmegjenvinningssystemet spesielt på vår og høst. Virkningsgraden til gjenvinningsbatteriene er på 55 – 60 %.

Luftstrømmen gjennomavtrekksventiler til solfangerrommet er regulert av CO₂-sensorer plassert ca. 1 meter over gulvet. Temperaturfølere benyttes for å regulere oppvarming, temperaturen skal ikke under 20 °C på kalde dager. Kombinasjonen av behovsstyring og fortrenningsventilasjon fører til at luftmengdene normalt er rundt halvparten av dimensjonert [18]. Målinger viser at i 95 % av brukstiden er CO₂ konsentrasjonen likevel under 1000 ppm.

3.1.14.5 Forslag til forbedringer ved eksisterende anlegg

Eksempelene over viser at fortrenningsventilasjon i form av aktiv fortrengning, er en løsning som kan og allerede benyttes for ventilering i skoler. I skoler er det hovedsakelig til bruk av kjøling løsningen er mest aktuell.

Problemer som har gått igjen i anleggene er svikt og problemer med automatikken og problemer i innkjøringsfasen. Dette har i noen tilfeller føret til høyere energibruk enn forventet [42]. Hybrid ventilasjon var i forskningsstadiet da flere av skolene ble tatt i bruk og kan være en av årsakene til dette.

Anleggene er ofte avhengig av avanserte styringssystemer for å kunne være et reelt alternativ til mekaniske anlegg og det kreves derfor robuste og stabile systemer [38]. Det mest av litteraturen som er funnet om erfaringer fra bruk i skoler er fra tidlig 2000-tallet. Nye framskritt på dette området i senere år er derfor en mulighet. Det er ikke funnet noe ny informasjon om skolene og anleggene fra de senere årene.

Noen kritiske barrierer for hybrid ventilasjon er blant annet usikkerheten knyttet til informasjon, kunnskap og erfaring. Mangel på kunnskap om hvordan systemet styres hos brukere kan redusere luftkvaliteten og termisk komfort ved feil bruk [38]. *IEA Annex 35 HybVent – State of the art report* [4] trekker fram en økt fare for spredning av røyk og brann dersom dette skulle oppstå som en følge av mer «åpne» bygninger.

Den tekniske delen av anlegget ikke er hovedfokuset i denne oppgaven. Forbedringer som kan gjøres er derfor knyttet til innklimaproblematikken og parametere som er relevante i forhold til dette. For å opprettholde krav gitt i standarder for innklima, for eksempel minstekrav til luftmengder, kan et økt behov for viftedrift jevne ut forskjellen mellom energibruk ved mekanisk og hybrid [4]. Erfaringer fra Grong og Jaer viser at det normalt benyttes lavere dimensjonerte luftmengder. Studier viser at ubehag reduseres og produktivitet øker med økende luftmengde. Når luftmengder justeres ned under kravet gitt av Statens Helsetilsyn' blir ikke forurensninger fra blant annet materialer tatt hensyn til. Ventilering i forhold til temperatur og CO₂-konsentrasjon vil da gi rett luftmengde i forhold til personbelastning, men forurensninger fra materialer og eventuelle andre prosesser tas ikke hensyn til [42].

Generelt for anleggene er at når luftmengdene styres etter temperatur og ikke CO₂ oppstår det høye konsentrasjoner som overgår helsetilsynets anbefaling på 1000 ppm. Styring etter romtemperatur i klasserommene kan fort føre til reduserte luftmengder og høyt CO₂-nivå spesielt på vinterstid. Tilfeller med settpunkt for CO₂ etter utetemperatur tillater også høyere konsentrasjonsnivå enn anbefalt. Et mål bør være å redusere CO₂ (under 1000 ppm totalt) samtidig som romtemperaturen er tilstrekkelig høy. Varmegjenvinning sees derfor på som et nødvendig tiltak, kombinert med forvarming for at oppvarmingsbehovet i rommet ikke skal bli for stort samt for å unngå trekk. Tilbakemeldinger om trekk har vært en gjenganger ved skolene og det bør derfor være fokus på å unngå dette ved dimensjonering av nye anlegg. Løsningen må også sørge for at nærsonen ikke blir for stor slik at størst mulig del av rommet utnyttes.

3.2 Personmodell

Modelleringen av personene i klasserommet har betydning for resultatet av simuleringen. Utgangspunktet for personmodellen brukt i denne oppgaven er presentert i *A simulation model for thermal comfort of a person in a large enclosure* av P.O. Tjelflaat og R. Knott [43]. Modellen er utviklet for å kunne beregne middelstrålingstemperaturen og for å få nøyaktighet i mål på termisk komfort ved bruk av CFD-verktøy. Utgangspunktet for modellen er et atrium og er for en stående person.

Personen er forenklet og modellert som en boks hvor høyden, bredden og tykkelsen på boksen er satt med utgangspunkt i mål gjort av P.O. Fanger. Høyden på modellen vil endres da det i dette tilfellet er en sittende person, mens den opprinnelige modellen simulerer en stående person. Høyden til en sittende person er normalt satt til 1,1 meter. For å få med eventuell strålingsutveksling mellom føtter og gulv er det lagt inn en avstand mellom undersiden av boksen og gulvet, en såkalt «dummy» overflate. Mål for personmodellen bruk i simuleringer er gitt i Tabell 3-3:

	Mål [m]
Høyde over gulv	0,2
Høyde boks	0,9
Total høyde av person	1,1
Bredde	0,6
Tykkelse (side kant)	0,19

Tabell 3-3 Verdier bruk for sittende personer i Fluent

Den totale overflaten til personen er lik det effektive strålingsarealet, definert som overflatearealet som direkte bidrar til strålingsutveksling mellom kroppen og omgivelsene [44].

$$A_{eff} = f_{eff} f_{cl} A_{Du}$$

A_{Du} : totalt overflateareal for person

$f_{eff} = \frac{A_{eff}}{A_{Du}}$, forholdet mellom effektivt strålingsareal og totalt overflateareal for kropp

f_{cl} : arealfaktor for klær

Typisk verdi for f_{eff} for en stående person er 0,725, og for en sittende person er den målt av Fanger [44] til å være $0,696 \pm 0,017$. f_{eff} er derfor satt lik 0,7. Arealfaktorer for klær er gitt i Tabell 3-4 og angir forholdet mellom en påkledd persons overflateareal og en naken persons overflate [3].

Bekledning	Arealfaktor, f_{cl}	clo, I_{cl}
Shorts, T-skjorte, lette sokker, sandaler	1,10	0,30
Lett kjole med ermer, underkjole, strømpebukse	1,15	0,45
Lette bukser, skjorte med korte ermer, lette sokker, sko	1,15	0,5
Skjørt, skjorte med korte ermer, strømpebukse, sandler	1,20	0,6
Skjørt, genser, skjorte, tykke knestrømper	1,30	0,9
Jakke, bukser, skjorte, sokker, sko	1,30	1,0
Frakk, jakke, vest, bukser, skjorte, sokker, sko	1,5	1,5

Tabell 3-4 Isoleringsverdi for typiske bekledninger[3]

Da det i dette tilfellet er simuleringer for vintertid som er mest relevant settes arealfaktoren, $f_{cl} = 1,30$. Vinterbekledning har normalt verdien 1 clo. Med et overflateareal lik $1,5 \text{ m}^2$ for personene som er modellert i Fluent gir dette et effektivt strålingsareal lik $1,37 \text{ m}^2$. For en stående person i [43] er det effektive arealet beregnet til $1,45 \text{ m}^2$. Hvor $A_{Du} = 2 \text{ m}^2$, $f_{eff} = 0,725$ og $f_{cl} = 1$. I forhold til strålingsutveksling med omgivelsene har en person i sittestilling rundt 5 % lavere effektivt strålingsareal sammenlignet med en stående person [44]. Verdiene benyttet for personene i klasseromsmodellen stemmer bra med dette tallet.

3.3 Modell i ANSYS Fluent

Utgangspunktet for klasserommet brukt i simuleringen er et klasserom fra Grong barneskole. Der benyttes i dag fortrenningsventilasjon tilført ved gulv. Det er antatt at rommet ligger vegg-i-vegg med andre rom/hall og det er derfor ingen varmetap gjennom disse veggene. Eventuelle varmetap vil bare være gjennom én yttervegg, vinduer og tak.

Fastsatte arealnormer for elever ved tradisjonell klasseromsundervisning sier at klasserommet bør dimensjoneres etter et areal på minimum 2 m^2 per elev. For tilrettelagt spesialundervisning og for å forbedre luftkvaliteten er et større areal på rundt $2,5 \text{ m}^2$ anbefalt i tillegg til areal for lærer [5]. Det er også et krav om at rommet er utformet med en minimumsavstand på 0,8 meter mellom elever og ventilasjonsåpninger, vinduer, varmekilder eller lignende for å oppnå god termisk komfort. Personbelastningen til klasserommet er antatt til å være 25 elever i tillegg til en lærer.

Modellen er designet ved hjelp av ANSYS DeignModeller og et nettverk av noder er lagt ved hjelp av ANSYS Meshing slik at fluidets bevegelse og temperaturer blir fanget opp.

3.3.1 Geometri

Geometrien består av et volum kalt Fluid i programmet. Volumet består av tak, vegger og gulv som er overflatene som danner volumet og nødvendige grensebetingelser kan legges inn for hver av disse. Personer, vindu, radiatorer, belysning og inn/ut-ventiler blir også sett på som overflater i volumet med egne grensebetingelser.

Arealet for overflatene er gitt i Tabell 3-5.

Overflate	Areal [m ²]	Antall
Fasade/yttervegg	13	1
Innervegg, langside	30	1
Innervegger, kortside	26	2
Tak	61	1
Gulv	61	1
Vinduer	3	3
Radiator	1,8	3
Belysning	0,4	9
Tilluftsventiler	0,64	3
Avtrekk	0,2	2
Person	1,56	26
Munn	0,003	26
Volum	206,38 [m³]	1

Tabell 3-5 Overflatearealer i Fluent-modell

3.3.2 Meshing

Det er anbefalt å navngi de forskjellige elementene i modellen før prosessen med å legge et nett av noder startes. Inndeling av de forskjellige elementene og overflatene er gitt i Tabell 3-6.

Det er viktig å være oppmerksom på at nettet blir tett nok når geometrien skal «meshes» for å gi et nøyaktig bilde av strømningsforholdene. Et tett nett av noder øker nøyaktigheten og fanger bedre opp strømningsforholdene. Samtidig vil et større antall noder enn nødvendig øke beregningstiden i programmet. Kritiske områder er langs veggen og takområdet hvor luften blir tilført og i området over og rundt elever hvor konveksjonsstråler oppstår. Gulvnivå i ankelhøyde er også et område hvor det er viktig å fange opp strømningsmønstre i forhold til trekkfaren i rommet.

For å øke nøyaktigheten i de kritiske områdene er det lagt «inflation layers» fra både tak, innervegg med tilluftsventiler og fra elevene. Inflation layers er anbefalt å bruke i områder hvor temperatur og hastighetsgradientene er store.

Overflate	Navn	Type
Fasade	outdoor-wall	wall
Innervegg m/ventiler	indoor-wall	wall
Innervegger mot andre rom	symmetry	symmetry
Tak	ceiling	wall
Gulv	floor	wall
Vinduer	window	wall
Radiator	heat-element	wall
Belysning	lighting	wall
Tilluftsventiler	velocity-inlet	velocity-inlet
Avtrekk	pressure-outlet	pressure-outlet
Elever + lærer	people	wall
Munn	wall-fluid	velocity-inlet

Tabell 3-6 Inndeling av elementer etter navn og type

3.3.3 Set up

3.3.3.1 Modeller

Simuleringen skal gjøres for en stasjonær situasjon. Det vil si at modellen ikke tar hensyn til at parametere som temperatur og CO₂ varierer over tid. Ved en stasjonær simulering vil tilført luftmengde være konstant og temperaturen/CO₂ vil stige sakte fram til de har stabilisert seg og en stasjonær situasjon er nådd.

Energilikningen (energy equation) er aktivert for å fange opp temperaturfordelingen i rommet. Turbulensmodellen som er valgt er *k-ε*-modellen og for kategorien near wall treatment er *enhanced wall treatment* aktivert. I Fluent ble det anbefalt å benytte *realizable k-ε* modell istedenfor standard. To viktige forskjeller for denne i forhold til standard *k-ε* er:

- den har en alternativ formulering for turbulent viskositet
- transport likningen for effekttap er modifisert

Realizable *k-ε* kan i noen tilfeller også bidra til raskere konvergens.

For å kunne studere konsentrasjonen av CO₂ som blir produsert i rommet er «species transport» aktivert. Stoffene som er inkludert i simuleringen er «air» for tilluften og «carbon-dioxide» for utåndingsluften, begge stoffene ble funnet i ANSYS sin database. CO₂-konsentrasjonen skal måles over utendørsnivå og mengden i tilførselsluften er derfor satt lik null. For utåndingsluften til personene er bare mengden av CO₂ som produseres inkludert i massestrømmen.

For stråling er strålingsmodellen S2S aktivert. Etter at modellen er bygget opp og nettet er lagt beregnes det «view factors» for alle overflater i rommet.

3.3.3.2 Materialer

Materialene som er inkludert i simuleringen er luft og CO₂. En antakelse i Fluent er at dersom Mach nummeret er tilstrekkelig lite, < 0,1-0,3, kan fluidene antas å være inkompressible. Trykkforskjeller er da sett på som så små og at fluidets tetthet bare vil være en funksjon av temperatur [45]. Termisk konduktivitet og viskositet vil bli sett på som konstant. Begge fluidene er lag inn som «incompressible-ideal-gas».

3.3.3.3 Grensebetingelser

Innerveggene som ligger vegg-i-vegg med andre klasserom er definert som «symmetry». Det betyr at programmet antar like betingelsene på andre siden av vegg for det rommet som simuleres.

De andre veggene og vinduer er lagt inn som «wall» med en *no-slip* grensebetingelse. Det vil si at nær vegg vil fluidet klebre seg og dersom vegg var i bevegelse ville det beveget seg med samme hastighet [45]. Fluidet nær vegg beveger seg altså ikke relativt til veggens overflate. Veggene er i dette tilfellet stasjonære.

For tilluftsventilene og munnen/utånding benyttes grensebetingelser for inkompressible-ideelle fluider som vil si at de defineres som «velocity-inlet». For hvert av disse innløpene må en inngangshastighet oppgis. Termiske grensebetingelser vil være temperaturen på tilluften og temperaturen på personens pust. Ved bruk av inkompressibel-ideell gass må også et driftstrykk ulik null være definert, satt lik 1 atm (101325 Pa).

Avtrekkventilene er lagt inn som «pressure-outlet» som setter det statiske trykket ved avtrekket og hastigheten i avtrekket beregnes [30]. Statisk overtrykk settes lik 0 Pa.

Påvirkningen fra tyngdekraftene inkluderes ved å aktivere funksjonen «gravity» hvor en akselerasjon $-9,81 \text{ m/s}^2$ i y-retning er lagt inn.

3.3.3.4 Løsningsmetode

Valgt løsningsmetode er SIMPLE som er en trykk-hastighets koblet metode. Med hensyn på oppdriftskreftene er Second Order valgt for trykk og for resten av variablene er Second Order Upwind valgt for økt nøyaktighet.

3.3.3.5 Konvergenskriterier

Et mål på konvergens i Fluent er restverdien (residual) som skal gå mot null når løsningen konvergerer. Standardverdien i Fluent er 10^{-3} . For å sikre full konvergens og en stabil løsning ble dette kriteriet redusert til 10^{-4} . Standardkriteriet for energilikningen på 10^{-6} ble beholdt.

Under-relaxationfaktorer for likningene benyttes til å stabilisere konvergens og til å kontrollere de beregnede verdiene for hver iterasjon. Verdiene ble satt til standardverdiene bestemt av Fluent. Unntaket var verdien for energilikningen som ble redusert fra 1 til 0,9. For tilfeller med et strømningsfelt hvor egenskaper varierer med temperatur eller er påvirket av oppdriftskrefter er det anbefalt å redusere faktoren for energi til en verdi mellom 0,8-1,0 [45].

4 Dimensjonering

4.1 Beregningsmodeller

4.1.1 Varmebalanse

Hensikten med varmebalansen for en bygning er å finne ut hvor stor varme- eller kjøleeffekt som må installeres i et bygg for å kunne opprettholde ønsket termisk inneklima. Balansen består av varmetap forårsaket av transmisjonstap, infiltrasjon og ventilering og varmetilskudd fra interne prosesser og interne laster. Forholdene blir sett på som stasjonære som vil si at temperaturer og varmestrømmer ikke endrer seg med tiden. Figur 4-1 viser et rom hvor aktuelle varmetap og varmetilskudd er merket.

Varmetap gjennom transmisjon skjer gjennom bygningsdeler hvor det er en temperaturforskjell og totalt tap for flere bygningsdeler kan uttrykkes ved:

$$P_{trans} = \sum UA\Delta T \text{ [W]}$$

U: varmegjennomgangskoeffisient (U-verdi) [W/m²K]

A: Areal av bygningsdel [m²]

ΔT : differanse mellom temperatur inne og ute

Bygninger vil alltid ha utettheter i konstruksjonen som ved forskjell i trykk inne og ute leder til luftlekkasje gjennom bygningsdelene. Luftlekkasjene bidrar til luftskifte i bygget, men samtidig kan det føre til uønsket varmetap og økt oppvarmingsbehov. Infiltrasjonstapet uttrykkes ved:

$$P_{inf} = c_p \rho n V \Delta T \text{ [W]}$$

Bygg med bygningsintegrert ventilasjon bør ha en tetthet ved 50 Pa som gir et lekkasjetall, n, lik eller bedre enn én luftveksling per time [18]. Til sammenlikning er kravet for lekkasjetall i TEK10 1,5 luftskifter per time.

Varmetap fra ventilasjon avhenger av luftmengden som skiftes ut og temperaturforskjeller. I tillegg har dimensjonering av anlegget og valg av ventilasjonsløsning betydning. For naturlig ventilasjon varierer det med utenforstående faktorer som vind, oppdrift og temperatur. En vanlig antakelse er 0,4 luftvekslinger per time [31]. Varmetap fra ventilasjon når luftmengden er kjent kan uttrykkes som:

$$P_{vent} = c_p \rho q (1 - \eta) \Delta T$$

q: luftmengde [m³/s]

n: luftveksling per time [1/t] (1/3600 t/s)

c_p: varmekapasitet for luft [J/kgK]

ρ : lufttetthet [kg/m³]

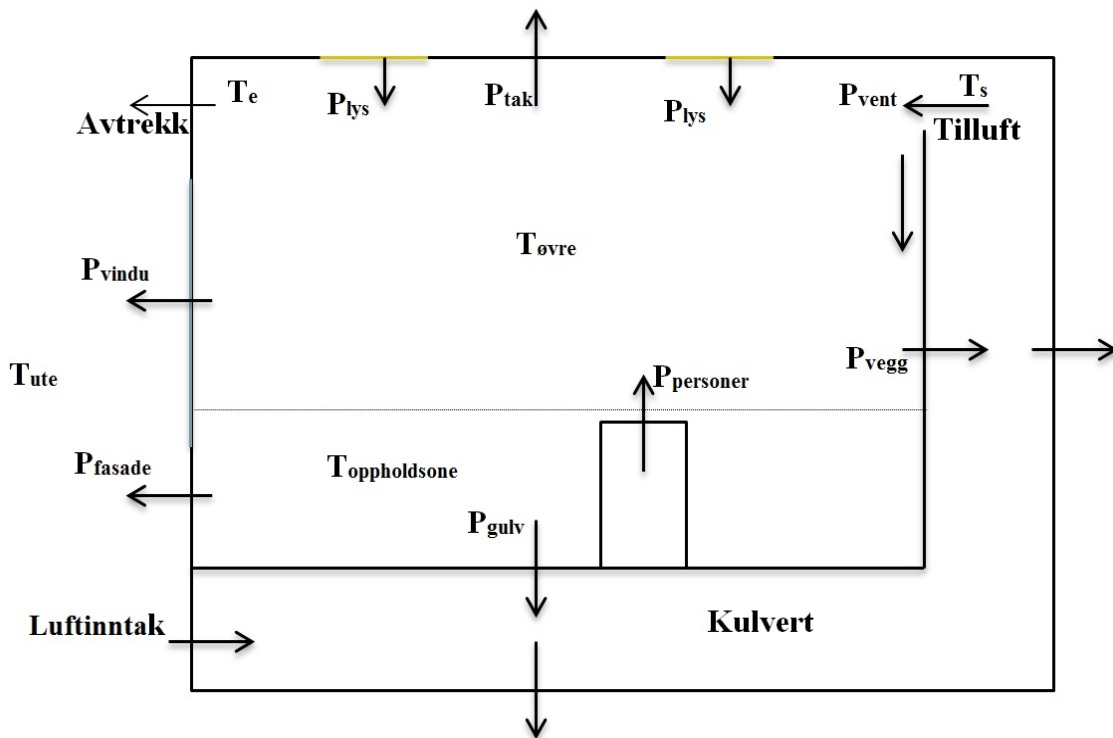
η : virkningsgrad for varmegjenvinner

Varmetilskudd er fra interne laster som belysning og teknisk utstyr og fra personer, P_{int} , i tillegg til eventuell installert oppvarming, P_{oppv} .

For et rom eller bygning vil varmebalansen være:

$$P_{trans} + P_{inf} + P_{vent} = P_{int} + P_{oppv}$$

Varmebalansen kan blant annet benyttes til å beregne nødvendig installert oppvarming i et bygg. Ved bruk av varmegjenvinner kan oppvarmingsbehovet fordeles mellom ettervarming av tilluften og oppvarming ved bruk av for eksempel vannbåren varme eller elektrisitet.



Figur 4-1 Modell av klasserom

4.1.2 Tilluft

Tilluften kan modelleres som en halv konveksjonsstrøm fra en kald kilde eller som en halv vertikal stråle med oppdrift. Strømningsmodellene er presentert i kapittel 2.3 og metoder for beregning av luftmengder er presentert under.

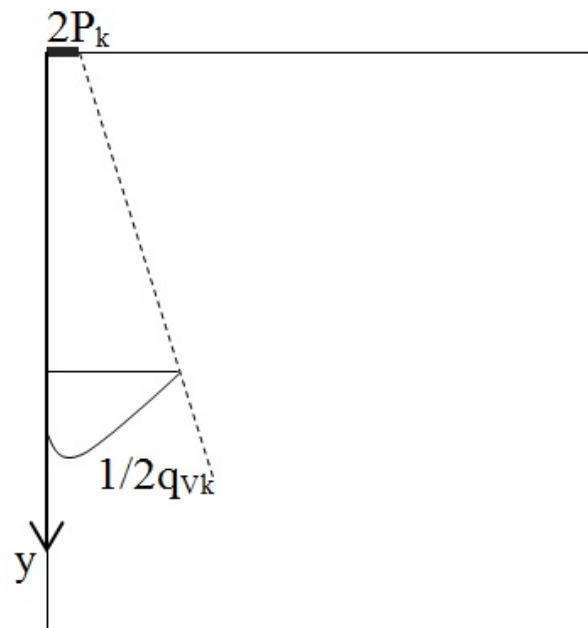
4.1.2.1 Halv konveksjonsstrøm

Formlene for beregning av hastighet, temperatur og volumstrøm er gitt i delkapittel 2.3.1. For en kald punktkilde er kjøleeffekten er gitt ved:

$$P_k = \rho c_p q_0 \Delta T \text{ [kW]}$$

Her vil ΔT være differansen mellom temperaturen på omgivelsesluft og punktkilden.

En fri konveksjonsstrøm fra en varmekilde er vist i Figur 2-9. For et tilfelle med en luftmengde som tilføres et rom, kan punktet hvor luften blir tilført bli sett på som en kald punktkilde. Sammenlignet med Figur 2-9 vil dette være en «opp-ned» konveksjonsstrøm fra en punktkilde i taket med en kjøleeffekt som tilsvarer kjøleeffekten fra tilluften. Tilluften strømmer nedover langs veggen, en vertikal flate, som gir en halv konveksjonsstrøm illustrert i Figur 4-2. I tilfeller hvor en konveksjonsstrøm strømmer langs en vertikal flate må effekten multipliseres med 2 i alle likninger og luftmengden divideres på 2 [1].



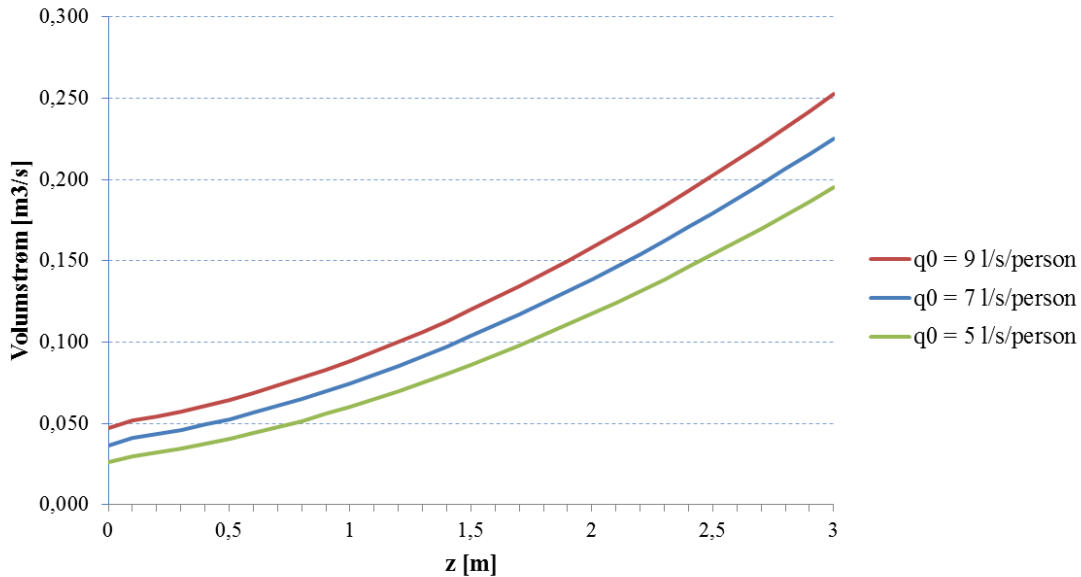
Figur 4-2 Halv konveksjonsstrøm fra en kald punktkilde plassert i taket

Tilluftsventiler vil i det følgende bli sett på og behandlet som en kald punktkilde, men omtales som en tilluftsventil. For å beregne luftmengden som vil oppstå i en gitt avstand fra ventilen kan likningene gitt i 2.3.1 benyttes. Figur 4-3 viser luftmengden i forhold til avstand fra én ventil med utgangspunkt i tre forskjellige tilluftsmengder på 5, 7 og 9 l/s/person. Tilfellet er for fem sirkulære tilluftsventiler hvor hver av ventilene har et areal lik 0,10 m². Den reelle luftmengden som tilføres vil fordeles på antall tilluftsventiler og kjøleeffekten vil øke med større luftmengde. Kjøleeffekten er også avhengig av temperaturdifferansen, tilluftstemperaturen er satt til 12 °C og romtemperaturen til 22 °C.

Konveksjonsstrøm fra punktkilde tilsvarende én tilluftsventil

z er avstanden fra tilluftsventiler.

Dimensjonert for 26 personer, 5 tilluftsventiler.



Figur 4-3 Luftmengder gitt av kjøleeffekten fra en kald punktkilde, 5 ventiler

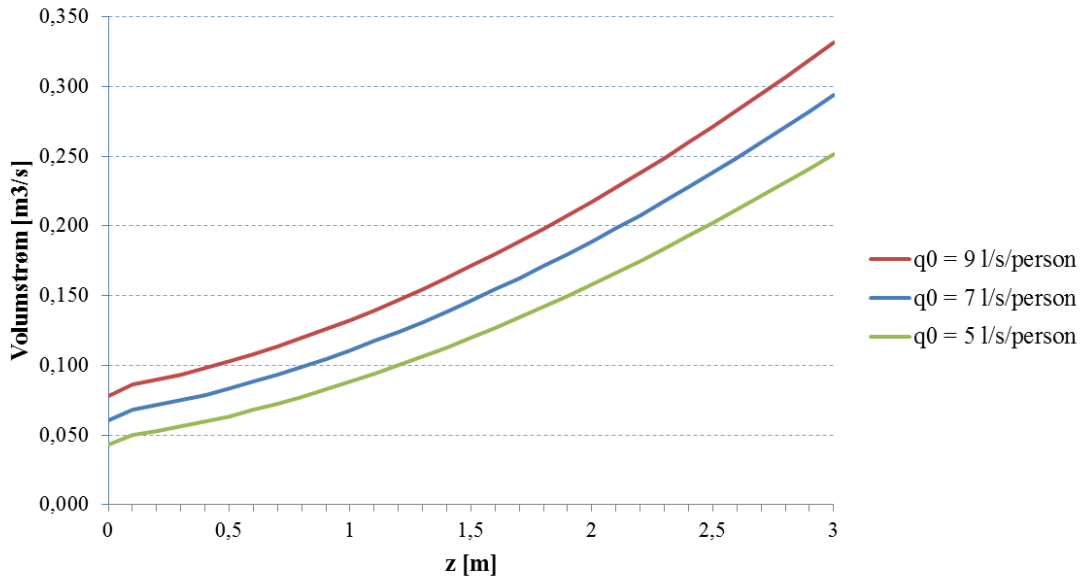
I en avstand på 3 meter har luftstrømmen tatt med seg omgivelsesluft mer enn 4 – 6 ganger større enn den luftmengden som reelt tilføres. Økningen er størst med laveste tilluftsmengde. Figuren over viser volumstrømmen for én ventil. For fem ventiler vil den totale luftmengden som tilføres en eventuell oppholdssone i en gitt avstand være fem ganger større.

Reduseres antall ventiler, med samme tilluftsmengder på 5, 7 og 9 l/s/person, blir tilført luftmengde per ventil større. Dette gir en større kjøleeffekt per ventil, men den totale kjøleeffekten er fortsatt den samme. Figur 4-4 viser et tilfelle med tre tilluftsventiler og et større ventilareal enn for tilfellet i Figur 4-3. Den totale økningen for volumstrømmen er mindre for tre ventiler sammenlignet med fem. Figur 4-4 viser at luftstrømmen har tatt med seg en luftmengde som er 3-5 ganger større enn reelt tilført mengde. Også her er det tilfellet med minst luftmengde (5 l/s/person) som øker mest. At medrevet luft utgjør en mindre del av luftstrømmen vil bety at luften som tilføres oppholdssonen har en større andel friskluft.

Konveksjonsstrøm fra punktkilde tilsvarende én tilluftsventil

z er avstanden fra tilluftsventiler.

Dimensjonert for 26 personer, 3 tilluftsventiler.



Figur 4-4 Luftmengder gitt av kjøleeffekten fra en kald punktkilde, 3 ventiler

Generelt vil en økning i antall ventiler føre til at total luftmengde ved en gitt avstand blir større. For færre ventiler blir luftmengden som tilføres fra hver ventil større. Arealet på tilluftsventilene vil kunne bidra til å redusere trekkfaren i rommet da tilluftshastigheten reduseres med økt arealet på ventilen ($v = q_s/A$). Ved dimensjonering av anlegg er det derfor viktig å finne en balanse mellom antall ventiler og areal.

Da rommet blir sett på som en to-sone modell kan beregnede luftmengder benyttes til å finne ut hvor sjiktet for oppholdssonen vil legge seg. Tilluftsmengden kan eventuelt beregnes ved og først bestemme en ønsket sjikthøyde. Luftsjiktet som «deler» rommet legger seg der hvor den varme konveksjonsstrømmen fra personer er lik volumstrømmen fra den kalde kilden, altså tilluften. Figur 4-3 og Figur 4-4 kan derfor brukes og vurderes opp mot konveksjonsstrømmen fra en person gitt i Figur 2-10.

4.1.2.2 Vertikal stråle med oppdrift

Den andre modellen for tilluftsstrålen er en vertikal stråle med oppdrift som strømmer langs veggen. Uttrykk for å beregne sentralhastigheten til luftmengden er gitt i delkapittel 2.3.3. Når sentralhastigheten og stråletversnittet er kjent for en gitt avstand kan luftmengden beregnes. I tilfeller hvor luften tilføres fra et punkt på veggen må luftmengden divideres på 2 som gir en halv vertikal stråle. Skillet mellom oppholdssonen og øvre sone legger seg i dette tilfellet også der hvor den totale luftmengden fra tilluften er lik den oppadstigende konveksjonsstrømmen.

Konveksjonsstrømmen fra en person vil ikke være påvirket av hvilken modell som benyttes for tilluften .

4.1.3 Massebalanse for CO₂

Konsentrasjonen av CO₂ vil være ulik for de to sonene i rommet, men i hver av sonene er den antatt som homogen. Da friskluften tilføres i den forurensede sonen, vil luftmengden som tilføres oppholdssonen inneholde deler av forurensning i tillegg til den friske luften.

Konsentrasjonen i avtrekket vil være lik konsentrasjonen i den øvre sonen og massebalanse for CO₂ er gitt ved:

$$n_p P_{CO_2} = C_{e,CO_2} n_s q_{s,0}$$

n_p : antall personer = 26

P_{CO_2} : CO₂ produksjon i rommet = $9 \cdot 10^{-6}$ [kg/s/person] (18 l/h/pers)

C_{e,CO_2} : konsentrasjon av CO₂ i den forurensede sonen/avtrekket [kg/m³]

n_s : antall ventiler

$q_{s,0}$: Tilført luftmengde

Konsentrasjonen av CO₂ i oppholdssonen vil avhenge av mengden som blir dratt med fra den øvre sonen og hvor effektivt CO₂ blir fjernet fra oppholdssonen.

Massebalansen for CO₂ i oppholdssonen:

$$C_s q_{s,0} + (q_{s,sjikt} - q_{s,0}) C_{e,CO_2} = q_{s,sjikt} C_n$$

C_s : konsentrasjon i tilluft. Settes lik null for tilfeller med konsentrasjoner over utendørsnivå.

$(q_{s,sjikt} - q_{s,0})$: induisert luftmengde.

C_n : konsentrasjon av CO₂ i oppholdssonen.

Den induserte luftmengden i massebalansen kan defineres som differansen mellom den totale luftmengden som blir tilført oppholdssonen og den rene tilluftmengden, $q_{s,0}$. Det vil si den luftmengden hvor CO₂ fra den forurensede sonen er blitt dratt med.

Det er lagt inn et målepunkt i klasserommet som tilsvarer punktet hvor det kunne vært naturlig å plassere CO₂- og temperatursensorer. Steder hvor sensorene ikke kan plasseres er på veggen hvor luften tilføres og ytterveggen. Sensoren må derfor plasseres på kortveggene enten foran eller bak i klasserommet. Målepunktet er valgt til 1 meter over gulvet omtrent midt på den bakre veggen. For vintermånedene bør luftmengden som kreves for å holde CO₂ konsentrasjonen på et akseptabelt nivå beregnes for å kjøre anlegget på et minimum samtidig som luftkvaliteten er godkjent.

4.1.4 Temperaturgradienter

For en to-sone modell vil temperaturen i øvre sone være høyere enn temperaturen i oppholdssonen. Det er en positiv temperaturgradient med stigende temperatur. Ved beregninger er det antatt konstant temperatur i hele rommet, mens det i virkeligheten vil være varierende temperatur i rommet. I et reelt tilfelle vil temperaturgradientene i rommet ha påvirkning på strømningsmønsteret.

4.2 Ventilasjonsdesign

For å dimensjonere et ventilasjonsanlegg i et klasserom som benytter seg av et aktiv fortrengningsprinsipp, må det først avgjøres hvilke parametere som vil være avgjørende for luftmengdebehovet.

- Personbelastning: antall personer klasserommet skal dimensjoneres for, elever + lærer.
- Hva er aktivitetsnivået til personene i klasserommet?
 - Aktivitetsnivået har betydning for blant annet produksjon av varme, CO₂ og fukt.
- Varmebalanse for å beregne nødvendig kjøleeffekt.
 - I et klasserom vil dette hovedsakelig være bestemt av personbelastningen.
- Hvor er oppholdssonen i rommet?
 - Nødvendig høyde fra gulv på den rene oppholdssonen kan for eksempel avgjøres ut fra sittende eller stående aktiviteter i rommet.
 - Nærsonerområdet har også betydning for oppholdssonen da den vil kreve en avstand fra tilførselsveggen. Størrelsen på nærsonen påvirkes av luftens hastighet, turbulens og temperatur.
- Romhøyden og høyden hvor kald luft tilføres.
 - Høyden har betydning da tilluften må kunne dra med seg tilstrekkelig med omgivelses luft og øke temperaturen før den når oppholdssonen.
- Ønsket temperatur i oppholdssonen.
- Tilluftstemperatur.
- Krav i forhold til CO₂ (ppm), temperatur, RF og lufthastighet må settes for å kunne se om modellen gir et tilfredsstillende inneklima.
 - Krav avhenger av sesong (vinter/sommer) og kan gi forskjellige kontrollstrategier etter sesong.
 - Fastsatte krav kan benyttes for å avgjøre om tilførte luftmengder er tilstrekkelig.
- Antall og areal på tilluftsventiler og avtrekk.
 - Det er i denne oppgaven ikke fokusert direkte på design av tilluftsventiler og avtrekk. Dette kan likevel være en avgjørende faktor for kvaliteten på anlegget. Det er sett for seg at luften tilføres via tilluftsventiler med stort areal for å oppnå fortrengningsventilasjon og ikke omrøring. Det er viktig at luften «faller».
 - Avstanden mellom ventilene er også viktig da luftstrålene ikke skal blandes før de når oppholdssonen.

I Tabell 4-1 er forslag til nødvendige dimensjoneringsparametere gitt.

Parameter	Symbol	Enhet
Lufttetthet	ρ_{luft}	kg/m ³
Varmekapasitet, luft	$c_{p,\text{luft}}$	J/kgK
Antall personer	n_p	
Total tilluftsmengde	$q_s = n_s q_{s,0}$	m ³ /s
Antall ventiler	n_s	
Tilluftsmengde fra én tilluftsventil	$q_{s,0}$	m ³ /s
Tilluftstemperatur	$T_{s,0}$	°C
Temperatur i avtrekk	T_e	°C
ΔT	$\Delta T = T_e - T_{s,0}$	
CO ₂ produksjon	P_{CO_2}	kg/s
Transmisjonstap	P_{trans}	W
Infiltrasjonstap	P_{inf}	W
Varmetap fra ventilasjon	P_{vent}	W
Varmetilskudd fra personer	P_{pers}	W
Varmetilskudd lys/teknisk	P_{int}	W
Oppvarming	P_{oppv}	W
Diameter tilluftsventil	d_0	m
Areal på tilluftsventil	A_0	m ²
Polavstand	$y_p = 0,7d_0$	m
Lengde på vegg med tilluftsventiler	L	m
Sjikthøyde	h_{sjikt}	m
Konveksjonsstrøm, én person ved sjikt	$q_{k,\text{person}}$	m ³ /s/pers
Total konveksjonsstrøm fra personer ved sjikt	$n_p q_{k,\text{person}}$	m ³ /s
Avstand fra tilluftsventiler til sjikt	y	m
Tilluftshastighet	$U_0 = q_{s,0}/A_0$	m/s
Kjøleeffekt per tilluftsventil	$P_k = \rho_{\text{luft}} c_{p,\text{luft}} q_{s,0} \Delta T$	W
Volumstrøm ved avstand y	$q_{s,\text{sjikt}} = 1/2 * 0,055 P_k^{(1/3)} (y + y_p)^{(5/3)}$	m ³ /s
Total volumstrøm ved avstand y	$n_s q_{s,\text{sjikt}}$	m ³ /s
Bredde på stråle ved avstand y	$b = \tan(12,5^\circ)(y + y_p)$	m
Tverrsnittareal av stråle	$A_s = \pi b^2$	m ²
Maks antall ventiler	$n_{s,\text{maks}} = L/2b$	

Tabell 4-1 Dimensjoneringsparametere

4.2.1 Plassering av tilluftsventiler

Utgangspunktet er et klasserom med et gulvareal på 61 m². Rommet er antatt helt tett slik at det ikke er lekkasje eller infiltrasjon i konstruksjonen og ingen transmisjonstap gjennom vegger, vinduer, tak eller gulv. Den eneste varmekilden i rommet er elevene og en lærer. Ventilasjonsanlegget dimensjoneres for å kunne fjerne overskuddsvarmen fra disse personene.

Varmebalansen kan settes opp:

$$\rho c_p q_{s,0} (T_e - T_s) = n_p P_{pers}$$

Løser varmebalansen med hensyn på tilluftsmengden basert på følgende antakelser:

$$n_p = 26$$

$$P_{pers} = 100 \text{ W}$$

$$T_e = 22 \text{ °C}$$

$$T_s = 10 \text{ °C}$$

Dette gir en tilluftsmengde tilnærmet lik 7 l/s/person. Kravet gitt i Tabell 2-1 for personbelastning oppfylles, men er mindre enn kravet gitt dersom luftmengden for lavemitterende materialer inkluderes. I videre beregninger er det antatt en konstant tilført volumstrøm på 0,182 m³/s (7 l/s/person). Dette for å se om det vil kunne gi et tilstrekkelig godt inneklime.

Ventilasjonsanlegget skal dimensjoneres for å holde sjikthøyden for oppholdssonen 1 meter over gulvnivå. Total konveksjonsstrøm avgitt fra 26 personer i rommet er lik 0,4123 m³/s, ref. Figur 2-10. For den totale konveksjonsstrømmen fra personene er det antatt at avstanden mellom hver person er stor nok til at strålene ikke blandes.

Konveksjonsstrømmen for én person kan da multipliseres med 26.

Da tilført luftmengde er bestemt på forhånd, må anlegget videre dimensjoneres ut fra konveksjonsstrømmen fra personene. Den totale volumstrømmen fra tilluften ved ønsket sjikthøyde må være tilnærmet lik volumstrømmen fra personene, gitt at startvolumstrømmen er lik 0,182 m³/s. Parametere som vil påvirke volumstrømmen til tilluften ved sjikthøyden er høyden tilluften tilføres ved (avstanden mellom tilluftsventiler og sjikt), antall ventiler, arealet på ventilene, startluftmengden og temperaturen (som her er satt på forhånd).

Verdier brukt for beregninger er gitt i vedlegg B. Tilluften er modellert som en halv kald konveksjonsstrøm som omtalt i delkapittel 4.1.2.

Ved dimensjonering må det blant annet tas hensyn til at forskjeller i temperatur for tilluft, oppholdssone og avtrekk vil ha betydning for luftens tetthet. Det er derfor benyttet en referanse tetthet ved 20 °C på 1,2 kg/m³. For tilluftsventilene er det tatt hensyn til at arealet må være tilstrekkelig stort for å holde tilluftshastigheten lav. Avstanden mellom ventilene må også være stor nok til at luftstrålene ikke blandes før de når gulvet eller oppholdssonen.

For å finne den ideelle høyden for plassering av tilluftsventilene samt antall ventiler er disse to parameterne variert fram til en løsning ble nådd. Løsningen oppnås når volumstrømmen fra tilluften ved sjikthøyden er tilnærmet lik konveksjonsstrømmen avgitt fra personer.

Resultat fra beregninger:

- 3 tilluftsventiler. Hver med areal lik $0,64 \text{ m}^2$
- $h_{\text{tilluft}} = 3 \text{ m}$. Som tilsvarer $y = 2 \text{ m}$ (avstand fra tilluft til sjikthøyde)
- Tilluft blir tilført med en hastighet $U_0 = 0,095 \text{ m/s}$

Med en bredde på tilluftsventilene, $d_0 = 0,8 \text{ m}$, hvor luftstrålen brer seg utover med en vinkel på $12,5^\circ$ vil bredden ved 2 meter avstand være ca. 1 meter. Tilluftsventilene må derfor plasseres i en avstand på minst en halv meter fra veggen og fra hverandre.

4.3 Scenarier

Det er gjort beregninger for to hovedscenarier som det også er blitt gjort tilsvarende simuleringer for i Fluent (for simuleringresultater se kapittel 5):

1. Varierende tilluftstemperatur og konstant tilluftsmengde.

For å se hvordan inneklimate varierer med temperaturen på tilluften er det gjort simuleringer for en tilluftstemperatur på 10, 12, 14 og 16 grader. Temperaturene på 14 og 16 grader kan presentere sommer/vår-forhold hvor luften ikke har behov for forvarming, men benytter frikjøling fra den termiske massen til kulverten.

Vinterforhold og sommerforhold vil være to ulike situasjoner for systemet og luftbehandlingen vil være forskjellig for de to situasjonene. Vinterforhold vil kreve forvarming av luften. Når ventilasjonen benyttes til kjøling på varme dager, må den kunne gi et tilfredsstillende inneklimate selv med en høy temperatur på tilluften.

2. Redusert personbelastning i rommet og variert tilluftsmengde.

Rundt halvparten av elevene har forlatt rommet og læreren er fortsatt tilstede. Først kjøres en simulering hvor luftmengden fortsatt kjøres som for et fullt klasserom. Det kan forventes at det vil ta et tidsintervall før sensoren registrerer at luften i rommet er «for» ren eller at temperaturen er for lav på grunn av mindre varmeproduksjon. I den andre simuleringen tilpasses luftmengden etter antall personer som er igjen i rommet. En vanlig strategi for et ventilasjonsanlegg er å tilpasse seg ved å redusere luftmengden. For begge tilfellene er tilluftstemperaturen satt til 12°C .

4.3.1 Varierende tilluftstemperatur

Det er gjort beregninger for fire tilluftstemperaturer på 10, 12, 14 og 16 °C. Andre parametere og forhold er like i alle simuleringer og er gitt i vedlegg B.

Massestrømmen vil variere ved forskjellig tilluftstemperatur som en følge av at lufttettheten varierer med temperaturen. Volumstrømmer og massestrømmer er gitt i Tabell 4-2. Med samme tilluftsmengde for de fire situasjonene vil temperaturen i avtrekket øke ved økende tilluftstemperatur og kan beregnes ut fra varmebalansen:

$$T_e = \frac{n_p P_{pers}}{\rho c_p q_{s,0}} + T_s$$

Beregninger for temperatur og CO₂-konsentrasjoner er gitt i Tabell 4-3.

Tilluftstemperatur [°C]	Lufttetthet [kg/m ³]	Total tilført massestrøm [kg/s]	Samlet volumstrøm/tilluftsmengde 1 m over gulv [m ³ /s]
10	1,242	0,226	0,4824
12	1,234	0,225	0,4529
14	1,225	0,223	0,4194
16	1,217	0,221	0,3802

Tabell 4-2 Beregnede luftmengder for tilluft

Tillufts-temperatur [°C]	Avtrekks-temperatur [°C]	ΔT	CO ₂ -mengde over utendørsnivå [ppm]		Ventilasjonseffektivitet [C _e /C _n]
			Oppholdssone	Avtrekk	
10	21,4	11,4	445	714	1,61
12	23,5	11,5	427	714	1,67
14	25,6	11,6	404	714	1,77
16	27,7	11,7	372	714	1,92

Tabell 4-3 Beregnede verdier for temperatur og CO₂ med varierende tilluftstemperatur

ΔT er temperaturdifferansen mellom temperaturen i avtrekket og tilluftstemperaturen.

Da økt tilluftstemperatur fører til at mindre luft blir dratt med og luftmengden tilført oppholdssonen reduseres vil det føre til en lavere konsentrasjon av CO₂ i oppholdssonen. Da CO₂-produksjonen er den samme i alle tilfeller vil dette gi en høyere ventilasjonseffektivitet da konsentrasjonen i avtrekket er likt i alle tilfeller.

Ventilasjonseffektivitet er omtalt i delkapittel 2.4.

4.3.2 Redusert personbelastning

Tanken med å studere et tilfelle med redusert personbelastning er å se på hvordan parametere som CO₂, temperatur og eventuelle hastighetsvektorer ved gulvnivå endrer seg. Dersom et klasserom går fra å ha full belastning til å reduseres til omtrent halvparten vil det ta tid før sensorene registrere dette. Sensorene vil etter en stund registrere at luften i rommet er «for» ren eller at temperaturen er for lav på grunn av mindre varmeproduksjon. Ved å se på et tilfelle hvor luftmengden enda ikke har tilpasset seg situasjonen i rommet, kan det vurderes om det oppstår en økt risiko for trekk i rommet når klasserommet ikke er fullt.

Tilluftstemperaturen er i beregningene satt til 12 °C. Luftmengden for et fullt klasserom er som før 0,182 m³/s og den reduserte luftmengden er satt ut fra 7 l/s/person. En naturlig regulering i tilfeller med lavere personbelastning er at ventilasjonsluftmengden halveres eller reduseres etter antall personer i rommet. Beregnede verdier for de to tilfellene er gitt i Tabell 4-4 og Tabell 4-5.

Tilluftsmengde [m ³ /s]	Total tilført massestrøm [kg/s]	Tilluftshastighet [m/s]	Samlet volumstrøm/tilluftsmengde 1 m over gulv [m ³ /s]
n_p = 14 q_s = 0,182	0,2245	0,095	0,4529
n_p = 14 q_s = 0,098	0,1209	0,051	0,3684

Tabell 4-4 Luftmengder ved halv personbelastning

Ved redusert personbelastning i rommet vil den totale konveksjonsstrømmen fra personer i rommet reduseres tilsvarende. For 14 personer er den totale avgitte konveksjonsstrømmen lik 0,222 m³/s i en avstand lik 1 meter over gulvet. Da den samlede volumstrømmen fra tilluften er omtrent dobbelt så stor vil sjiktet for oppholdssonen løfte seg. Beregninger viser at sjiktet vil legge seg på rundt 1,3 meter hvor volumstrømmen fra personer og totalt fra tilluften (med startmengde på 0,182 m³/s) er henholdsvis 0,3734 og 0,3679 m³/s. Sjiktet løftes også for tilfellet hvor luftmengden reduseres selv om den er tilpasset antall personer i rommet. Oppholdssonen vil være opp til en høyde på 1,2 meter hvor volumstrømmene fra personer og fra tilluft er lik 0,3195 og 0,3217 m³/s.

Selv om sjiktet for oppholdssonen endres er forutsetningen for en sjikthøyde på 1 meter brukt ved beregning av temperatur og CO₂ verdier. En eventuell sensor vil ha en fast plassering i rommet. Temperaturen og CO₂-konsentrasjoner er også her beregnet ut fra varmebalansen og massebalanser for CO₂.

Tillufts- mengde [m ³ /s]	Avtrekks- temperatur [°C]	ΔT	CO ₂ -mengde over utendørsnivå [ppm]		Ventilasjonseffektivitet [C _e /C _n]
			Oppholdssone	Avtrekk	
n_p = 14 q_s = 0,182	18,2	6,2	230	385	1,67
n_p = 14 q_s = 0,098	23,5	11,5	524	714	1,36

Tabell 4-5 Beregnede verdier for temperatur og CO₂ ved redusert person belastning

For tilfellet før luftmengden reduseres er konsentrasjon for CO₂ lavere enn kravet gitt i kategori 1. Lave CO₂- konsentrasjoner er ikke et problem i seg selv, men bruk av høyere luftmengder enn nødvendig fører til unødvendig energibruk. Problemet for dette tilfellet er temperaturen i avtrekket som er under kravene gitt for vinterstid i oppholdssonen for alle tre kategoriene. Temperaturen i oppholdssonen kan antas lavere enn den i avtrekket. Det vil derfor være nødvendig at ventilasjonsanlegget registrerer og regulerer før temperaturen faller til et så lavt nivå.

I tilfellet hvor luftmengden er regulert og tilpasset 14 personer er temperaturen tilbake på samme nivå som for tilfellet med 26 personer og tilluftstemperatur på 12 °C. Temperaturen i avtrekket er nå 23,5 °C og det kan forventes at temperaturen i oppholdssonen vil være tilfredsstillende. CO₂-konsentrasjonen i oppholdssonen blir noe høy i dette tilfellet og er den høyeste beregnede mengden for alle tilfellene. Konsentrasjonen i avtrekket er lik som for tilfellene med variert tilluftstemperatur.

Den høye konsentrasjonen kan ha sammenheng med at dette tilfellet har den laveste andelen av frisk luft i den totale volumstrømmen fra tilluften 1 meter over gulvet. Volumstrømmen er nesten 4 ganger så stor som startmengden på 0,098 m³/s. Som vil si at mer av den forurensede luften fra den øvre sonen blir dratt med. Til sammenligning er total volumstrøm bare 2,5 ganger større når tilluftsmengden er 0,182 m³/s.

5 Resultater

5.1 Simuleringsbetingelser

Oppsettet for simuleringsmodellen er gitt i kapittel 3.3. For fullstendig oversikt over input brukt i Fluent henvises det til vedlegg C.

Generelle antakelser for simuleringen:

- Stasjonær situasjon
- Ingen kuldebroer
- Ingen infiltrasjon
- Ingen varmetap. Varmefluks = 0 W/m² for vegger
- Ideell-inkompressibel gass
- Dimensjonerende luftmengde: 7 l/s/person
- Rommet er dimensjonert for 26 personer
- En person produserer en CO₂-mengde lik 18 l/time og har en varmeproduksjon på 70 W/m²
- Temperatur på utåndingsluften er 25 °C
- Emissivitet for vegger er lik 0,93 tilsvarende betong eller malte vegger, ref. Tabell 2-7

Resultatene fra simuleringene utført i Fluent er hentet ut fra etterbehandlingsprogrammet CFD-Post.

5.2 Varierende tilluftstemperatur

Fire simuleringer har blitt utført for like forhold, men med ulik temperatur på tilluften. Tilluftstemperaturen på 16 °C representerer en mulig sommersituasjon og 14 °C tidlig høst/vår. I følgende tabeller, Tabell 5-1 og Tabell 5-2, er resultater hentet ut fra et målepunkt som er lagt inn i modellen og representerer sensoren i rommet. Målepunktet for sensoren er plassert midt på rommets bakre vegg 1 meter over gulvet. I vedlegg D er en figur over rommet hvor målepunkter er markert gitt. Verdiene for avtrekk er en gjennomsnittsverdi for de to avtrekkene.

Tilluftstemperatur [°C]	Massestrøm [kg/s]		Tetthet [kg/m ³]		Volumstrøm [m ³ /s]	
	Tilluft	Avtrekk	Tilluft	Avtrekk	Tilluft	Avtrekk
10	0,228	0,228	1,247	1,2	0,182	0,1898
12	0,226	0,226	1,239	1,192	0,182	0,1898
14	0,224	0,224	1,23	1,184	0,182	0,1898
16	0,223	0,223	1,221	1,176	0,182	0,1898

Tabell 5-1 Simuleringsresultater: massestrøm og volumstrøm for tilluft og avtrekk

Massebalansene for simuleringen stemmer bra og forskjellen i tetthet som en følge av forskjellig temperatur på tilluft og i avtrekk gjør at volumstrømmene inn og ut ikke vil være helt like.

Tilluftstemperatur [°C]	Temperatur [°C]		ΔT	Temperatur- effektivitet [%]	CO ₂ -mengde over utendørsnivå [ppm]		Ventilasjons- effektivitet [C _v /C _n]
	Oppholdssone	Avtrekk			Oppholdssone	Avtrekk	
10	20	21,3	11,3	113,00	525	660	1,26
12	22,4	23,3	11,3	108,65	540	645	1,19
14	24,6	25,3	11,3	106,60	550	640	1,16
16	26,7	27,4	11,4	106,54	560	640	1,14

Tabell 5-2 Simuleringsresultater: temperatur og CO₂

Sammenlignet med beregninger gir resultatene fra simuleringen like verdier for temperaturen. Temperaturene for oppholdssonen ble ikke beregnet, men temperaturen i avtrekket og differansen mellom denne og tilluftstemperaturen gir et lite avvik. Den største forskjellen er for CO₂-konsentrasjonene med et avvik på nesten 200 ppm i oppholdssonen for tilfellet med en tilluftstemperatur på 16 °C. Generelt er det en høyere konsentrasjon i oppholdssonen for alle de fire tilfellene og en lavere konsentrasjon i avtrekket sammenlignet med beregnede verdier. Ventilasjonseffektiviteten blir lavere.

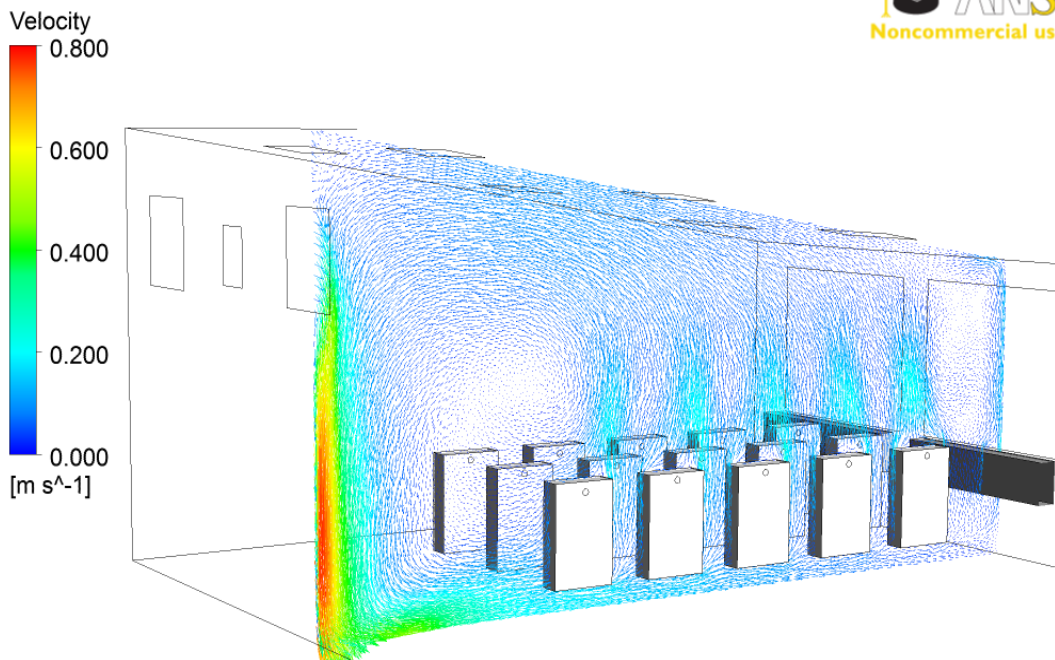
Sammenlignet med verdiene gitt i Tabell 2-1 tilfredsstillende tilluftstemperaturene på 12 °C og 14 °C temperaturkravet gitt i kategori 1 for henholdsvis vinter og sommerforhold. Tilfellet med 16 °C gir for høy temperatur på sommeren til å kunne tilfredsstillende minstekravet i kategori 2 på maks 26 °C. På de varmeste dagene sommerstid er det en mulighet for at kjøleeffekten i kulverten ikke strekker til for nedkjøling av tilluften til 14 °C. For høye temperaturer i klasserommet kan da oppstå.

Simuleringsresultatene for CO₂ viser at for samtlige tilfeller er konsentrasjonen lavere enn 600 ppm over utendørsnivå som er under makskravet gitt i helsevern forskrifter for barnehager og skoler [5]. Sammenlignet med beregnede verdier og kravet for kategori 1 på 500 ppm over utendørsnivå er konsentrasjonene noe høye.

5.2.1 Hastighetsvektor

Figur 5-1 viser hastighetsvektorer for et plan som går tvers igjennom rommet. Da hastighetsprofilen er tilnærmet helt lik for de forskjellige tilluftstemperaturene er bare et tilfelle for T_s = 12 °C tatt med for å illustrere hastigheten. For tilluften er maksimal hastighet 0,8 m/s og ved gulvet hvor den brer seg utover har den en hastighet på rundt 0,4 m/s. Hastigheten reduseres mens luften strømmer langs gulvet og ved den første rekken med personer er den ca. 0,2 m/s. Dette er høyere enn kravet gitt for vinter i kategori 2 på 0,18 m/s.

Konveksjonsstrømmen over personene er tydelig med en hastighet på rundt 0,2 m/s. Figuren med hastighetsvektorene viser også hvordan romluften blir dratt med inn i tilluftsstrålen.



Figur 5-1 Hastighetsvektor. $T_s = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$

5.2.2 Temperaturfordeling

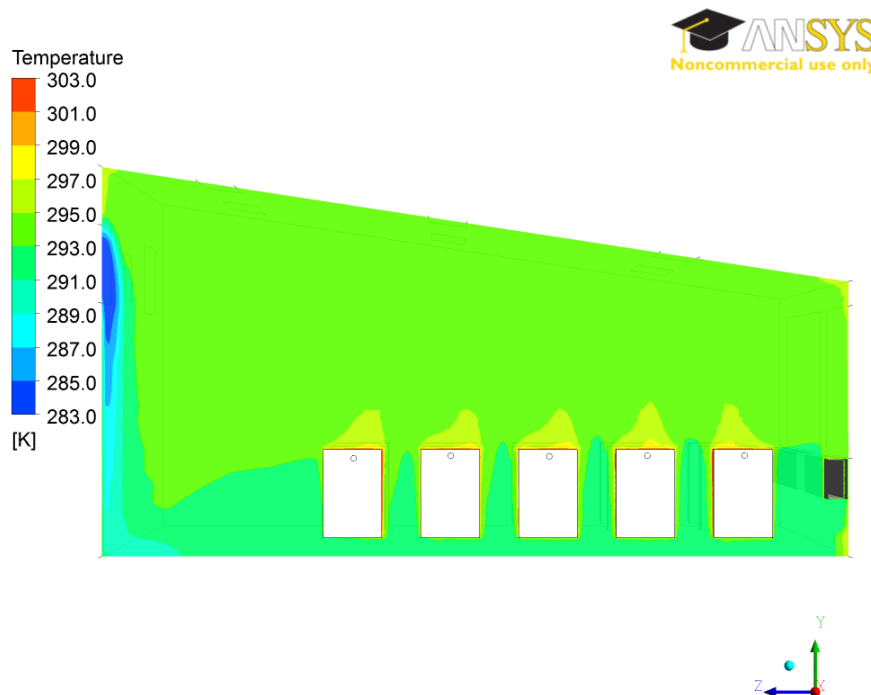
Et YZ-plan ved $x = 4$ meter som tilsvarer midt i rommet er lagt for å fange opp temperaturfordelingen. Da situasjonen er stasjonær vil fordelingen etter at løsningen har konverget gi en tilnærmet lik fordeling over hele rommet. For å fange opp konveksjonsstrømmen rundt personene er sjiktet lagt gjennom en rad av personer. Tverrsnittet er også rett ved en tilluftsventil som tydelig viser at tilluften faller mot gulvet samt hvordan temperaturen på luftstrålen stiger. Figur 5-2 til Figur 5-5 viser temperaturfordelingen for de forskjellige tilluftstemperaturene.

Konveksjonsstrømmen over personene er tydelig og temperaturen er høyere enn for resten av rommet. To-sone inndelingen av rommet kommer tydeligst fram for tilfellet med $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Skillet er mindre tydelig og sjiktet lavere for de tre andre tilfellene.

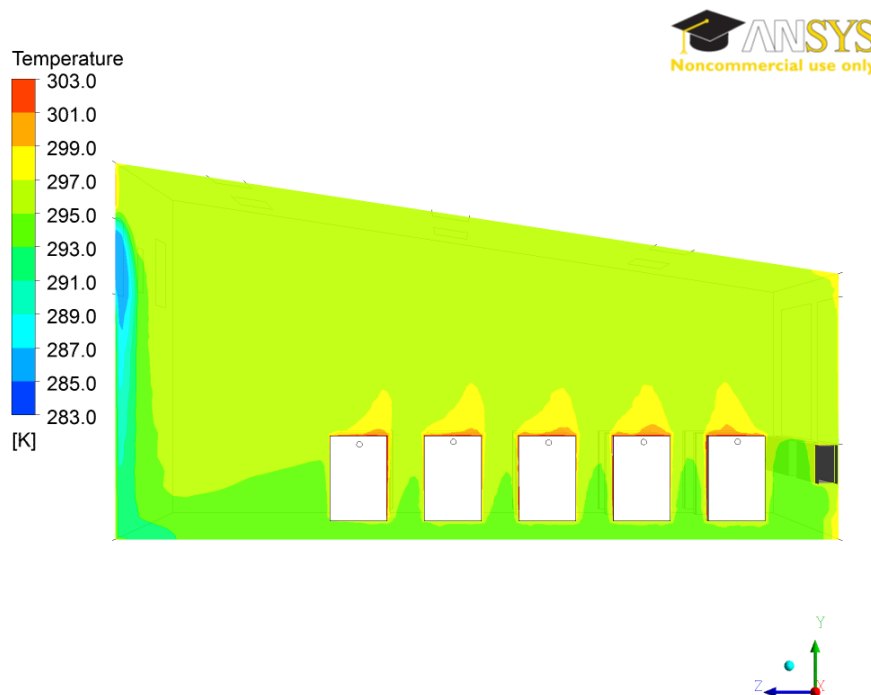
Temperaturene ved ankelhøyde (0,1 m) og hodehøyde (1,1 m) viser at den vertikale temperaturgradienten ligger mellom 1,1 og $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Tilfellet med lavest tilluftstemperatur gir den høyeste temperaturgradienten. Alle tilfellene er innenfor kategori 1 kravet på $< 2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

For en tilluftstemperatur på $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ er temperaturen ved gulvnivå lik $18,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, som er rett under anbefalt minstemperatur på 19 grader. For de andre tilfellene er gulvtemperaturen innenfor anbefalte verdier. Temperaturkonturene viser at den friske luften strekker seg helt til andre enden av rommet bortsett fra i tilfellet med tilluftstemperatur på $16\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der har luften blandet seg helt og temperaturen steget før den når den borte rade med personer. I slike tilfeller kan det føre til et dårligere termisk klima for disse personene.

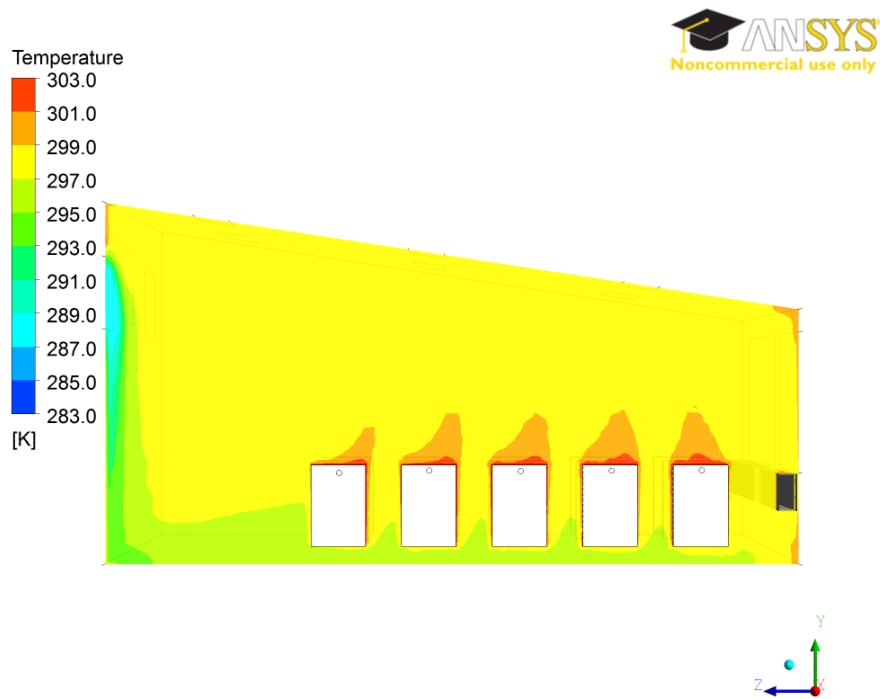
Tilluften har en temperaturøkning på 4-6 grader fra den tilføres til den når gulvet for tilfellene med 10 og 12 °C. For 14 og 16 °C har tilluften en stigning på 6-8 grader.



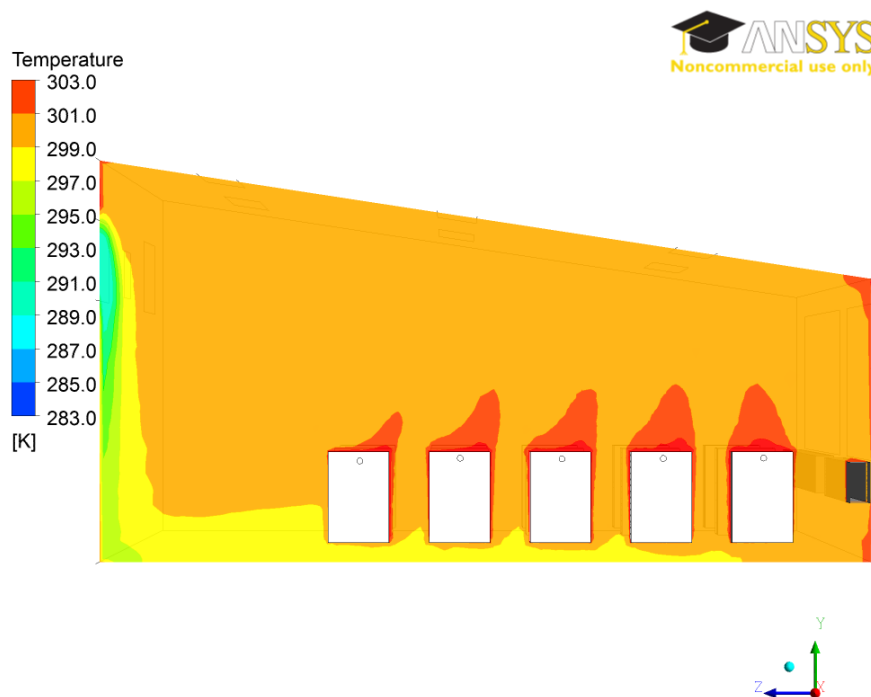
Figur 5-2 $T_s = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer.



Figur 5-3 $T_s = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer.



Figur 5-4 $T_s = 14 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer.



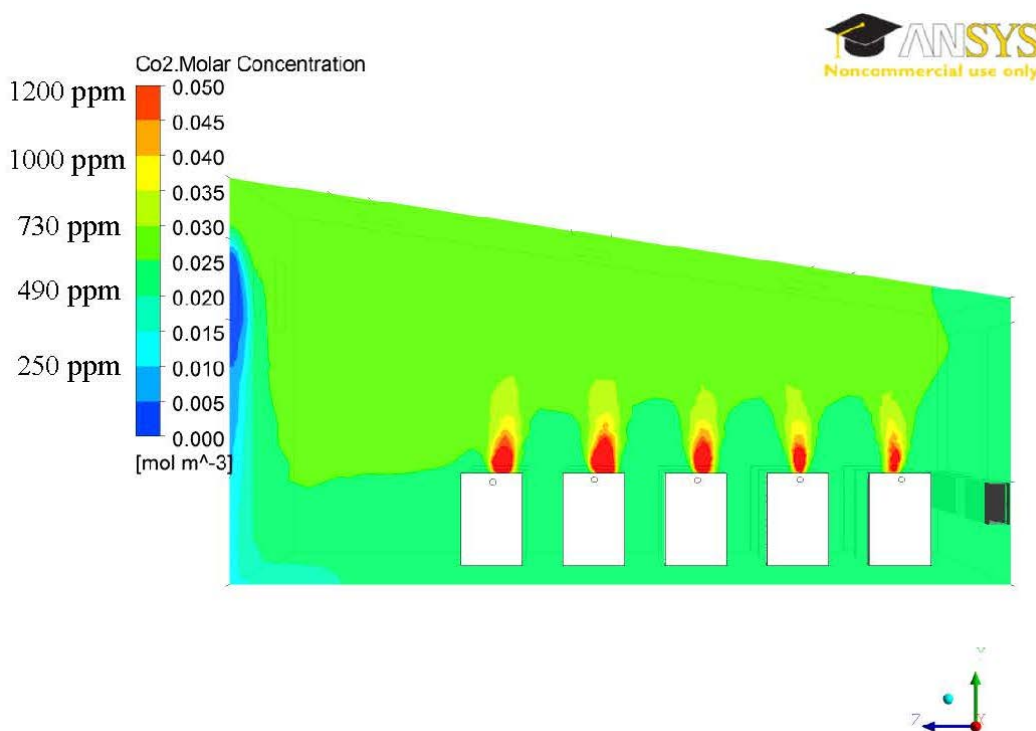
Figur 5-5 $T_s = 16 \text{ }^\circ\text{C}$: Temperaturfordeling midt i rommet. Sjikt gjennom personer.

5.2.3 Fordeling av CO₂-konsentrasjon

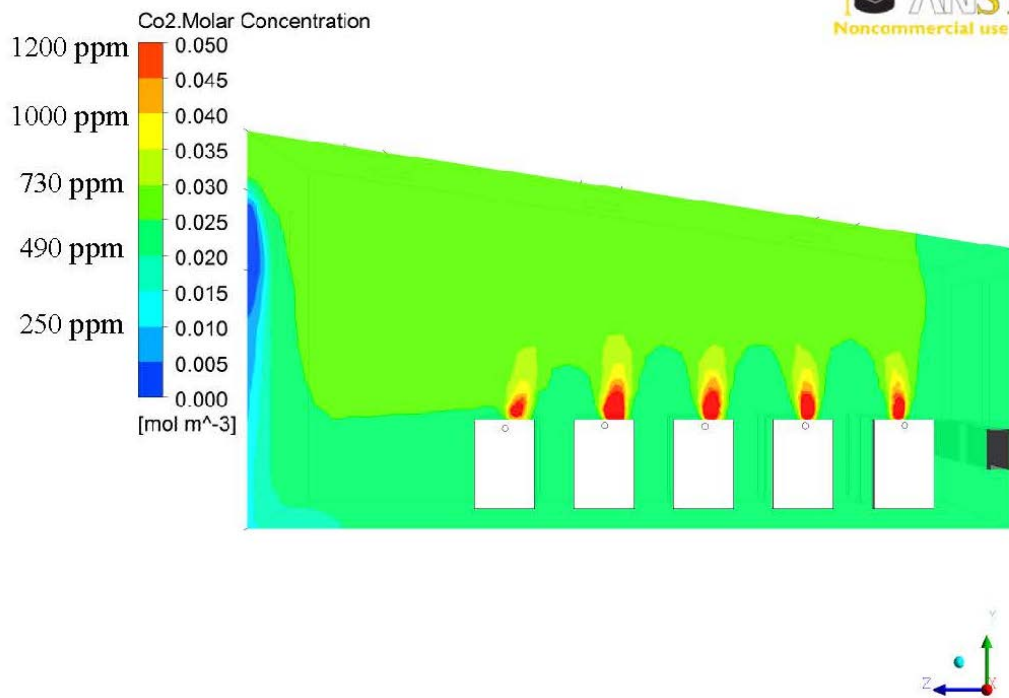
CO₂ er framstilt som molar konsentrasjon i figurene da det ikke er mulig å hente ut verdier gitt i ppm fra Fluent. Verdier for ppm over utendørnivå er derfor beregnet og gitt på venstre siden av skalaen.

Figur 5-6 til Figur 5-9 viser tydelig at utåndet CO₂ stiger rett opp og blir dratt med i konveksjonsstrømmen. Den forventede to-sone fordelingen kommer tydelig fram i figurene for CO₂-konsentrasjon og skillet er tydeligere enn for temperatur. Luften som tilføres rommet inneholder til å begynne med ingen CO₂ og figurene viser at konsentrasjon fra den øvre sonen blir dratt med ned i oppholdssonen. I hver sone er konsentrasjonen tilnærmet uniform.

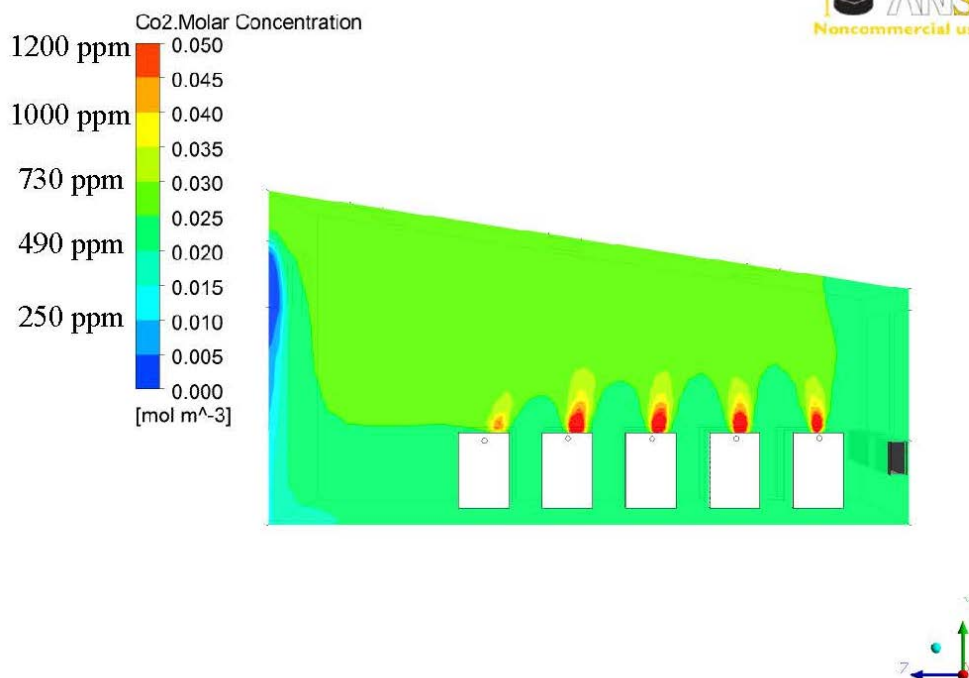
Fordelingen er tilnærmet identisk for de fire tilfellene. Det blir også bekreftet fra verdiene i målepunktet som er lagt inn da CO₂- konsentrasjonene har liten variasjon for de forskjellige tilluftstemperaturene. Forurensningsfordelingen ser ut til å bli lite påvirket av tilluftstemperaturen.



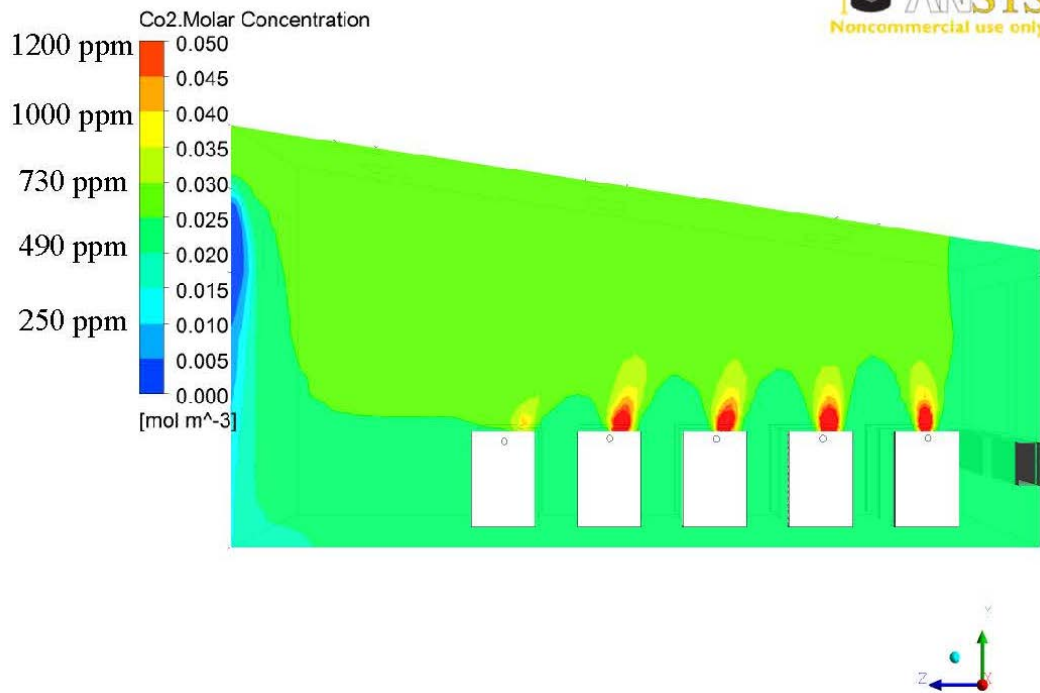
Figur 5-6 T_s = 10 °C: CO₂-konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer.



Figur 5-7 $T_s = 12\text{ }^\circ\text{C}$: CO₂-konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer.

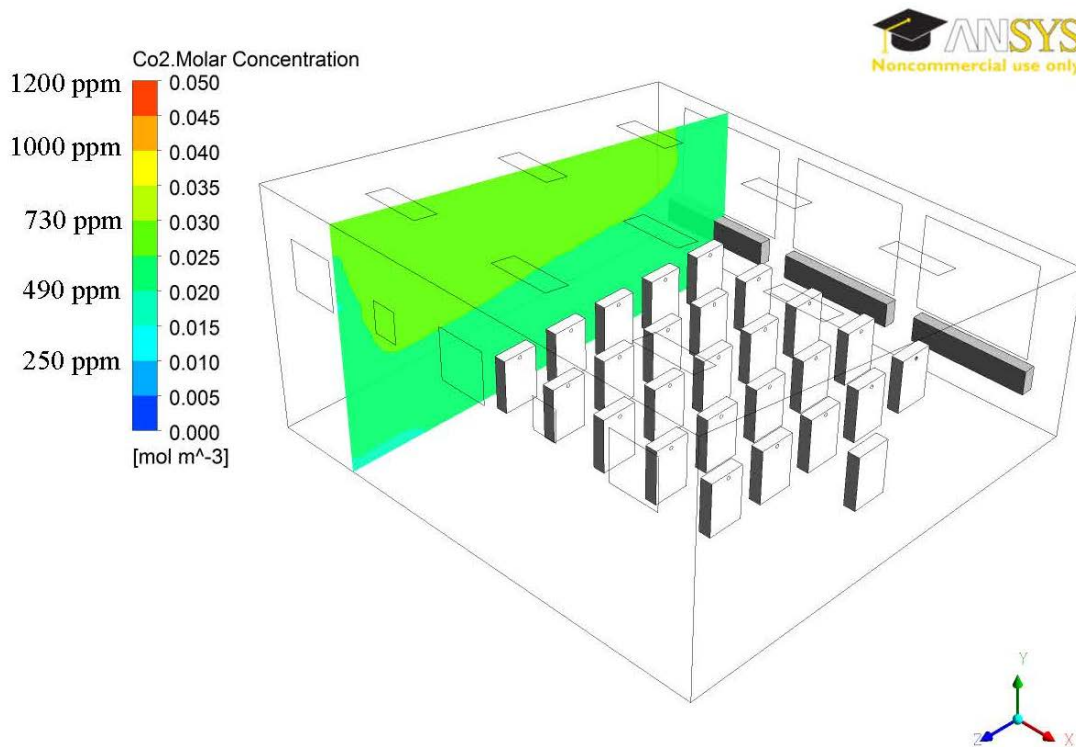


Figur 5-8 $T_s = 14\text{ }^\circ\text{C}$: CO₂-konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer.



Figur 5-9 $T_s = 16 \text{ }^\circ\text{C}$: CO_2 -konsentrasjon midt i rommet. Sjikt gjennom personer.

Plasseres tverrsnittet bakerst i rommet som i Figur 5-10 er det ingen forstyrrelser fra personene og den horisontale sjiktdelingen kommer tydeligere fram.



Figur 5-10 $T_s = 12 \text{ }^\circ\text{C}$: CO_2 - konsentrasjon. Tverrsnitt bakerst i rommet.

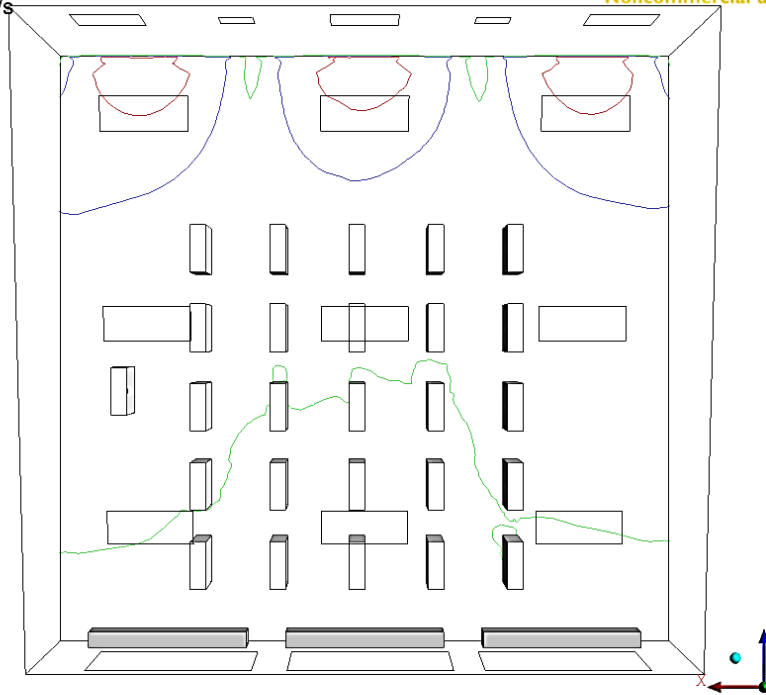
Dersom det på vintertid skulle oppstå et kaldras fra vinduene kan luftkvaliteten spesielt nær vinduet blir dårligere. Kaldraset vil dra med seg luft fra det øvre sjiktet. Dette gir en grunn til å innføre tiltak for å motvirke eventuelle kaldras i rommet. Oppvarming og bruk av radiatorer plassert under vinduet kan gi en motsatt effekt der varmen fra ovnen får luften til å stige og drar med seg luft bort fra oppholdssonen.

5.2.4 Hastighetslinjer

For å vurdere trekkfaren i rommet er det benyttet såkalte isolinjer for å kartlegge hastighetene i rommet. Linjene viser hvor eventuelle problemsoner vil være og kan benyttes til å vurdere nødvendig avstand fra veggen for å unngå trekkplager. En vanlig dimensjoneringshastighet er 0,2 m/s som ligger mellom kravene i kategori 2 for vinter og sommer på henholdsvis 0,18 og 0,22 m/s.

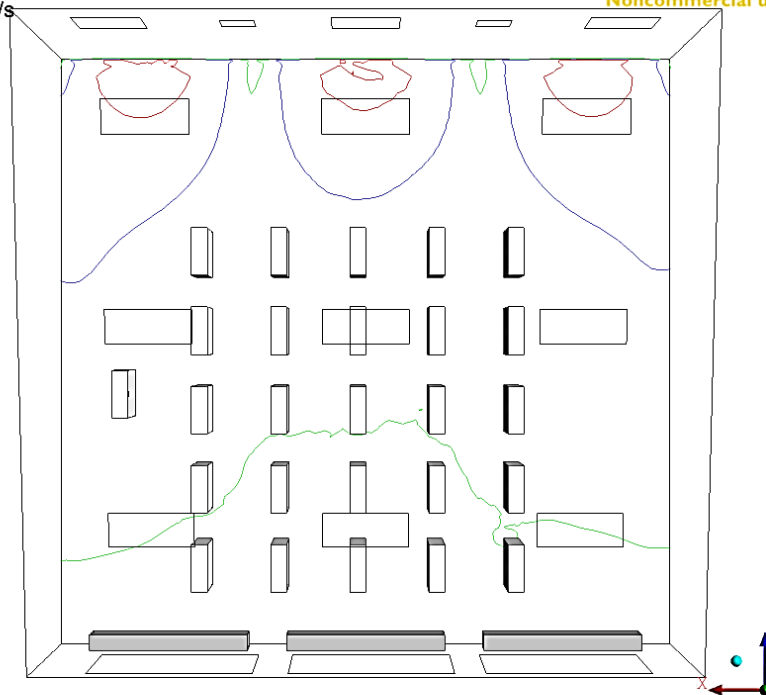
I området mellom de blå linjene og den grønne linje mot ytterveggen i Figur 5-11 til Figur 5-14 vil hastigheten i rommet ligge mellom 0,2 og 0,1 m/s. Anbefalingen på 0,18 m/s er holdt i en avstand på rundt 2 meter fra veggen. Det strengeste kravet på en hastighet mindre enn 0,15 m/s krever en avstand på rett under 4 meter fra tilluftsmengden. Variasjonen i avstanden fra tilluftsveggen før hastigheten er lav nok er liten for de fire temperaturene. Men ved høyere temperatur langs gulvet vil eventuelt trekk føles mindre.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s



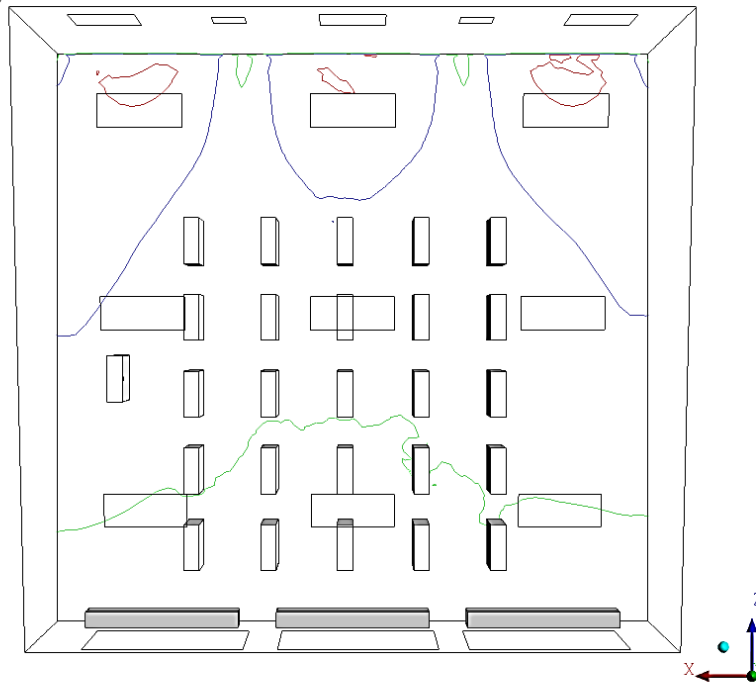
Figur 5-11 $T_s = 10\text{ °C}$: Hastighetsfordeling i rommet.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s



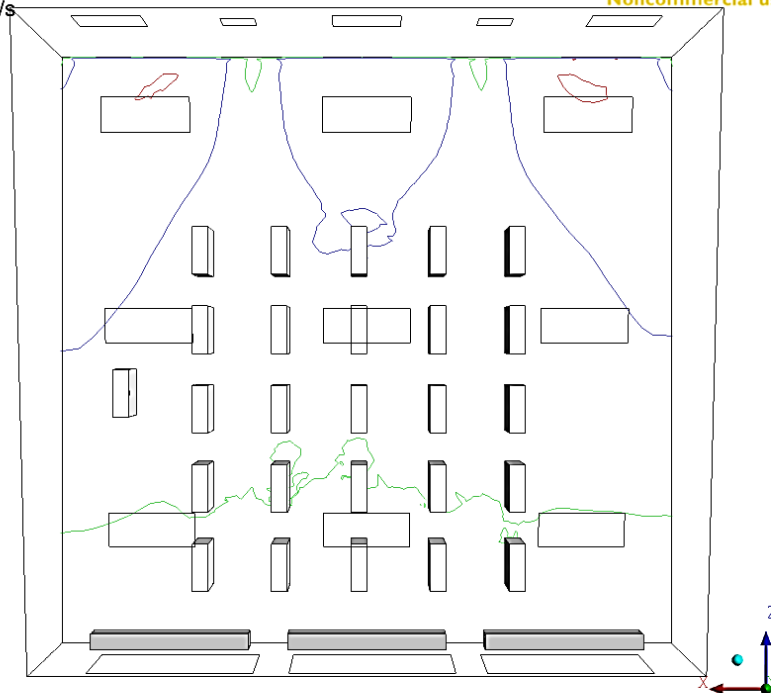
Figur 5-12 $T_s = 12\text{ °C}$: Hastighetsfordeling i rommet.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s



Figur 5-13 $T_s = 14\text{ }^\circ\text{C}$: Hastighetsfordeling i rommet.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s



Figur 5-14 $T_s = 16\text{ }^\circ\text{C}$: Hastighetsfordeling i rommet.

5.3 Redusert personbelastning

Bare halve klassen er i rommet og er plassert i den fremste delen. Med unntak av forskjellig tilluftsmengde er alle forhold like for de to tilfellene. Tilluftstemperaturen er satt til 12 °C. Resultatene for full luftmengde og redusert luftmengde er gitt i Tabell 5-3 og Tabell 5-4. Ventilasjonsmengdene er fortsatt i balanse.

Tilluftsmengde [m ³ /s]	Massestrøm [kg/s]		Tetthet [kg/m ³]		Volumstrøm [m ³ /s]	
	Tilluft	Avtrekk	Tilluft	Avtrekk	Tilluft	Avtrekk
n_p = 14 q_s = 0,182	0,226	0,227	1,239	1,212	0,182	0,186
n_p = 14 q_s = 0,098	0,121	0,122	1,239	1,193	0,098	0,102

Tabell 5-3 Simuleringsresultater ved redusert personbelastning: massestrøm og volumstrøm for tilluft og avtrekk

Tilluftsmengdene for et av tilfellene er 0,182 m³/s. Dette er den samme luftmengden brukt i tidligere simuleringer. Den reduserte luftmengden er justert ned etter en mengde på 7 l/s/person. Med 14 personer i rommet gir dette en volumstrøm på 0,098 m³/s og tilsvarer litt mer enn halvparten av dimensjonert luftmengde for et fullt klasserom.

Tilluftsmengde [m ³ /s]	Temperatur [°C]		ΔT	Temperatur-effektivitet [%]	CO ₂ -mengde over utendørsnivå [ppm]		Ventilasjons-effektivitet
	Oppholdssone	Avtrekk			Oppholdssone	Avtrekk	
n_p = 14 q_s = 0,182	17,4	18,2	6,2	114,81	298	362	1,21
n_p = 14, q_s = 0,098	22,4	22,8	10,8	103,85	588	650	1,11

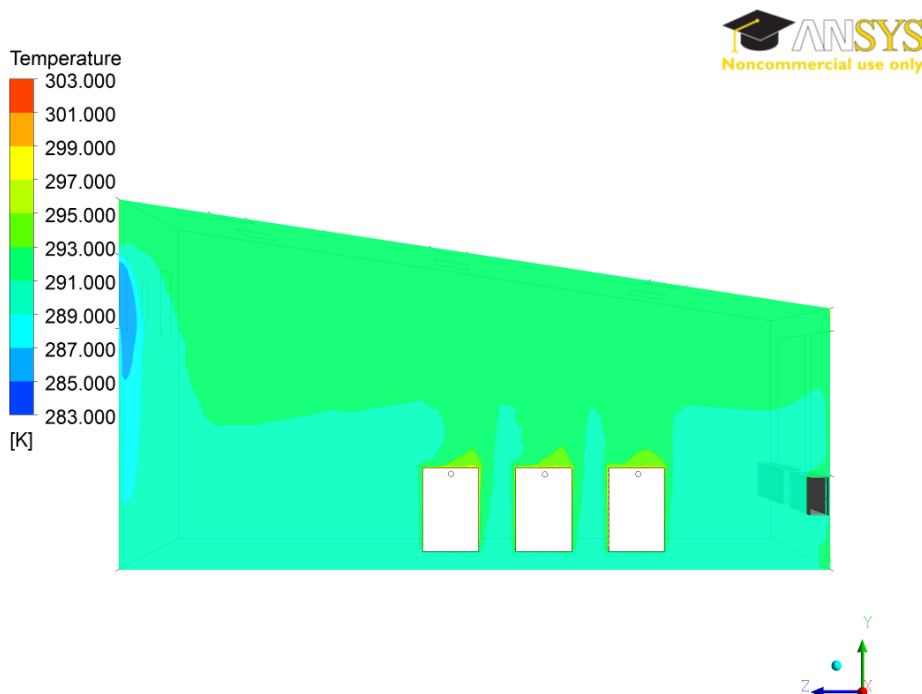
Tabell 5-4 Simuleringsresultater ved redusert personbelastning: temperatur og CO₂

Sammenlignet med de beregnede verdiene er resultatene for temperatur som forventet, men temperaturen i avtrekket er noe lavere enn den beregnede verdien for tilfellet med redusert luftmengde.

CO₂- konsentrasjonene er noe høyere enn forventet, men avviket her er mindre enn for simuleringene med varierende tilluftstemperatur. Verdiene i avtrekket er lavere enn de beregnede verdiene. Resultatene viser at CO₂- nivået kan bli lavere en nødvendig dersom tiden det tar før ventilasjonen justeres er stor nok. Tilfellet hvor tilluftmengden er justert ned gir den laveste ventilasjonseffektiviteten av alle tilfellene. Denne var også den laveste av de beregnede verdiene.

5.3.1 Luftmengde for fullt klasserom

I dette tilfellet er det spesielt det termiske inneklimaet som er viktig å fokusere på. Luftmengder som er høy i forhold til antall personer i rommet kan øke problemene knyttet til trekk og gi for lav temperatur i oppholdssonen.



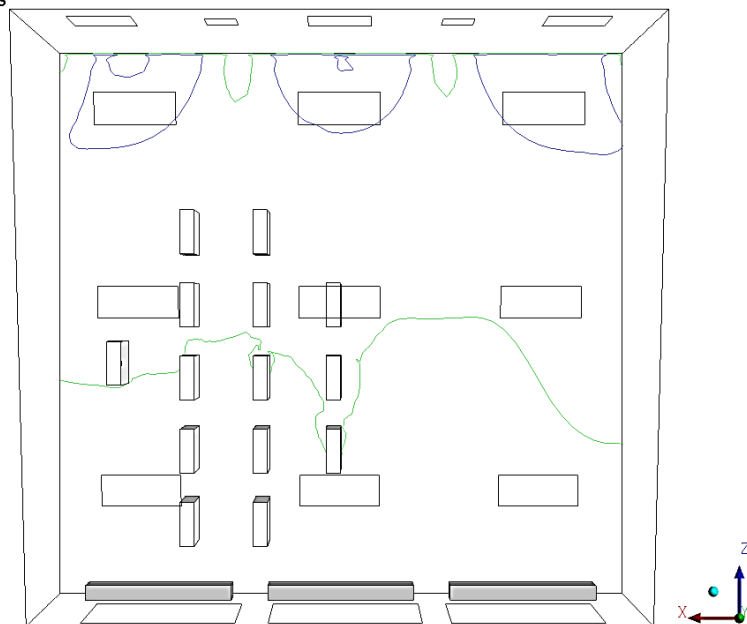
**Figur 5-15 Redusert personbelastning, luftmengde ikke justert.
Temperaturfordeling.**

Temperaturfordelingen og resultatet for temperatur i oppholdssonen viser at termiske forhold ikke er tilfredsstillende. Gulvtemperaturen er for lav og holder bare 17 °C. En justering av luftmengden må derfor skje før temperaturen blir for lav. Tilluften faller ikke like tydelig mot gulvet og den blander seg mer med omgivelsesluften.

Beregningene viste at høyden for sjiktet på oppholdssonen ville heve seg og i figuren er sjiktet høyere enn for tidligere tilfeller. Dette kan være et resultat av at tilluften ikke trekker like mye mot gulvet som før.

Verdiene for hastighet viser at nærsonen ikke øker for dette tilfellet. Isoliner for hastighet er gitt i Figur 5-16. I en avstand rundt 2 meter fra tilluftsveggen er hastigheten 0,18 m/s.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s

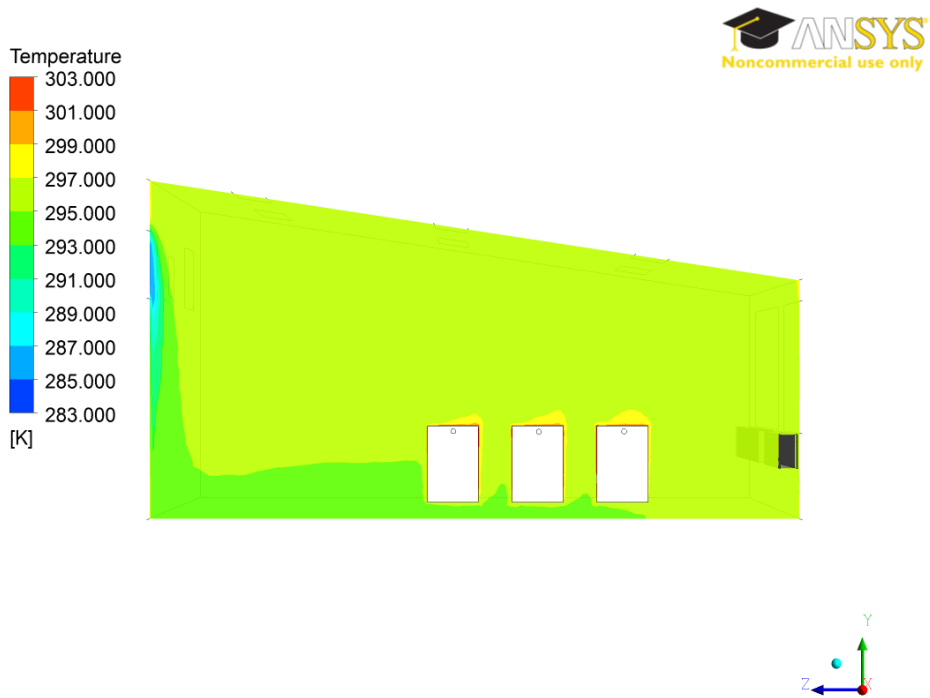


**Figur 5-16 Redusert personbelastning, luftmengde ikke justert.
Hastighetsfordeling.**

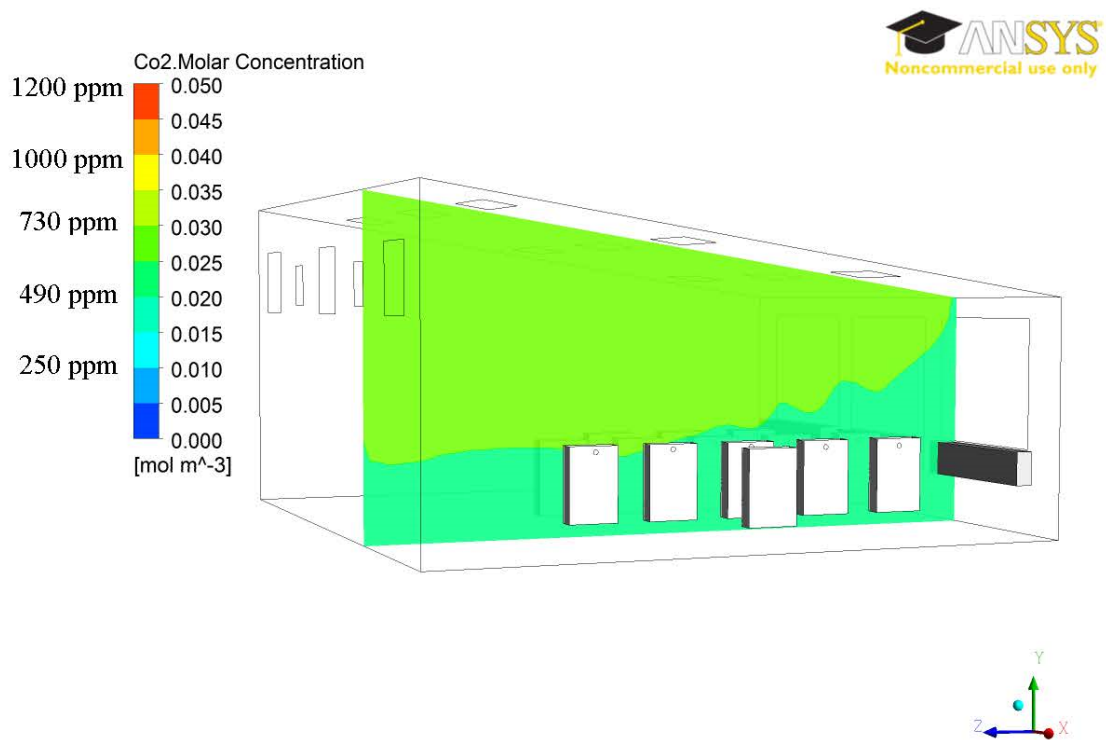
5.3.2 Redusert luftmengde

Med en lavere luftmengde er temperaturen i oppholdssonen igjen innenfor et tilfredsstillende område. Fordelingen er vist i Figur 5-17. Den vertikale temperaturgradienten er $0,6 \text{ }^\circ\text{C/m}$ i oppholdssonen og temperaturen ved gulvet et $21,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Konveksjonsstrømmen over personene lite tydelig. Beregninger viste at sjiktet for oppholdssonen ville løfte seg også i dette tilfellet. For temperaturfordelingen er ikke denne sjiktfordelingen så synlig, men for CO_2 - konsentrasjonen er to-sone inndelingen tydelig.

Tverrsnittet i Figur 5-18 er plassert rett bak den fremste raden med elever. I oppholdssonen ligger konsentrasjonen mellom 490 og 600 ppm og stemmer bra med verdien på 588 ppm i Tabell 5-4. Som tidligere nevnt gir dette tilfellet den høyeste konsentrasjonen for CO_2 i oppholdssonen.



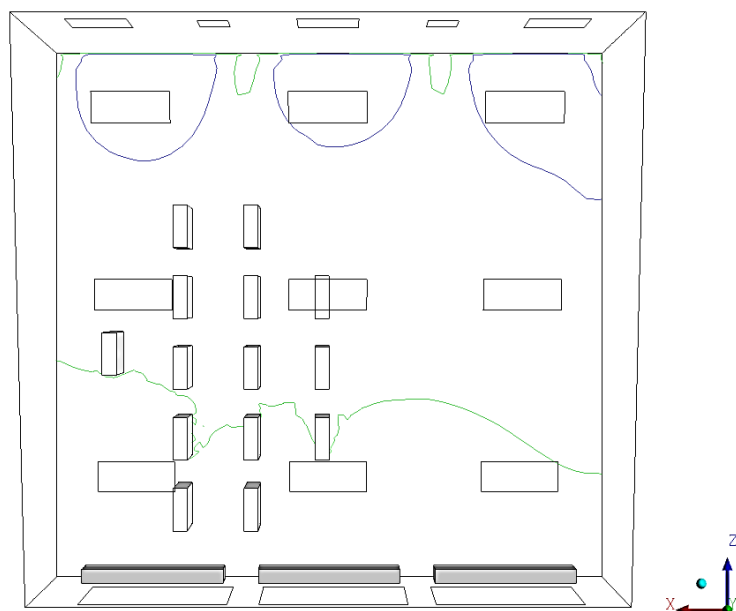
Figur 5-17 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned.
Temperaturfordeling.



Figur 5-18 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned.
CO₂- konsentrasjon.

Hastighetsfordelingen for rommet er vist i Figur 5-19. I en avstand fra tilluftsveggen på 1,6 meter er hastigheten 0,18 m/s. For en avstand på 2 meter er hastigheten nede i 0,15 m/s.

Grønn = 0.1 m/s
Blå = 0.2 m/s
Rød = 0.4 m/s



**Figur 5-19 Redusert personbelastning, luftmengde justert ned.
Hastighetsfordeling.**

6 Diskusjon

6.1 Vurdering av simuleringsresultater

6.1.1 Ventilasjonseffektivitet

Ventilasjonseffektivitet er vanlig å sammenligne med ideell omrøringsventilasjon som vil ha en effektivitet lik 1. Tabell 6-1 viser at samtlige tilfeller har høyere effektivitet.

Simulering	Temperatureffektivitet	Ventilasjonseffektivitet
$T_s = 10\text{ °C}$	1,13	1,26
$T_s = 12\text{ °C}$	1,09	1,19
$T_s = 14\text{ °C}$	1,07	1,16
$T_s = 16\text{ °C}$	1,07	1,14
$n_p = 14, q_s = 0,182$	1,15	1,21
$n_p = 14, q_s = 0,098$	1,04	1,11

Tabell 6-1 Ventilasjons- og temperatureffektiviteter

Ventilasjonseffektiviteten blir noe lavere i simuleringene sammenlignet med beregningene.

6.1.2 Termisk komfort

Ventilasjonsløsningen evner å gi tilfredsstillende temperaturforhold i oppholdssonen. Kjøleeffekten er stor nok til å kunne fjerne overskuddsvarmen i rommet for tilluftstemperaturer på 10, 12 og 14 °C. En tilluftstemperatur på 16 °C gir for høy temperatur i oppholdssonen for sommerforhold. Tilluftstemperatur på 12 °C og 14 °C gir det beste resultatet for henholdsvis vinter og sommer hvor kravet i kategori 1 er tilfredsstillt. For å sikre at temperaturen i klasserommet ikke faller under 20 °C på vinteren bør tilluften forvarmes til 12 °C framfor å bruke en tilluftstemperatur på 10 °C.

Generelt er avviket lite mellom de beregnede verdiene og simuleringsresultatene for temperaturen i avtrekket. Det største avviket er på 0,7 °C for tilfellet med 14 personer i rommet og en luftmengde på 0,098 m³/s. Beregnede verdier for temperatur vil derfor kunne brukes ved dimensjonering med en forventning om å gi like resultater i en reell situasjon.

Den vertikale temperaturgradienten fra ankel til hodehøyde er under 2 °C/m for alle tilfeller og har en gjennomsnittlig verdi på 1,3 °C/m. Sannsynligheten for at vertikale temperaturgradienter kan føre til diskomfort er derfor liten.

Samtlige simuleringer viste at ventilasjonsløsningen vil kunne forårsake trekk. Hastighetslinjene viser en hastighet på 0,2 m/s ved ankelnivå i oppholdssonen. Dette er for høyt på vinteren som er det mest kritiske tidspunktet i forhold til trekk. Nødvendig nærsone for hastigheter lavere enn 0,18 m/s er 2 m. Ventilasjonsløsningen vil derfor bidra til at en del av rommet på minst 2 meter fra veggen ikke kan benyttes. Dette gir en lite effektiv utnyttelse av romarealet. Et krav om hastighet under 0,15 m/s i oppholdssonen er ikke realistisk da det krever en nærsone på rundt 4 m.

Gulvtemperaturen er stort sett innenfor intervallet på 19 – 29 °C. Unntaket er tilluftstemperaturen på 10 °C hvor gulvtemperaturen er 18,8 °C. Også simuleringen med stor tilluftsmengde i forhold til antall personer har lav temperatur langs gulvet på 17 °C. Da høye hastigheter gir fare for trekk blir det viktig å holde temperaturen ved gulv over 19 °C da lave temperaturer kan gi økt trekkrisiko.

6.1.3 Atmosfærisk miljø

Resultatene fra simuleringene viser at CO₂- konsentrasjonen holder seg innenfor et akseptabelt nivå sammenlignet med anbefalt verdi satt av Statens Helsetilsyn. For alle tilfeller er verdien i oppholdssonen mindre enn 600 ppm over utendørnivå.

Simulering	CO ₂ -konsentrasjon over utendørnivå i oppholdssonen
T_s = 10 °C	525
T_s = 12 °C	540
T_s = 14 °C	550
T_s = 16 °C	560
n_p = 14, q_s = 0,182	298
n_p = 14, q_s = 0,098	588

Tabell 6-2 CO₂- konsentrasjoner over utendørnivå

Avviket i CO₂- konsentrasjoner mellom beregninger fra massebalansen og simuleringene knytter usikkerhet til beregningsmodellen. Beregningene bygger på en idealisert to-sone modell og den eneste strømmingen inn i oppholdssonen er tilluften langs veggen. Modellen antar at utåndet CO₂ blir dratt med i konveksjonsstrømmen og eneste kilde til CO₂ er fra luftmengden som blir dratt av tilluften. Et mulig avvik i simuleringene kan komme av at en større luftmengde enn beregnet blir dratt med ned i oppholdssonen. Strømningsmønsteret i rommet kan også avvike noe fra den idealiserte situasjonen. Omregninger gjort for input i Fluent kan også ha påvirket resultatet noe for eksempel ved omregninger fra volumstrøm til hastighet. Avviket er likevel for stort til at dette er en påvirkning av stor betydning og et avvik mellom beregnede og simulerte verdier tilnærmet lik null for temperatur bekrefter dette.

Ved dimensjonering bør spesielt vintersesongen fokuseres på. Vinterstid er trekkfaren størst og temperaturen på tilluften vil være lavere enn for en sommersituasjon. Struping av tilført luftmengde for å opprettholde termisk komfort bør unngås for å holde CO₂- konsentrasjonen under 600 ppm. Selv om lavemitterende materialer er forutsatt bør forurensninger fra materialer og eventuelt andre prosesser tas med i vurderingen.

6.2 Sammenligning med andre ventilasjonsløsninger

Resultatene fra simuleringene kan benyttes til å vurdere og sammenligne løsningen som et alternativ til andre, mer brukte ventilasjonsløsninger. Sammenligninger er gjort opp mot ideell omrøringsventilasjon og tradisjonell fortregning ved gulvnivå.

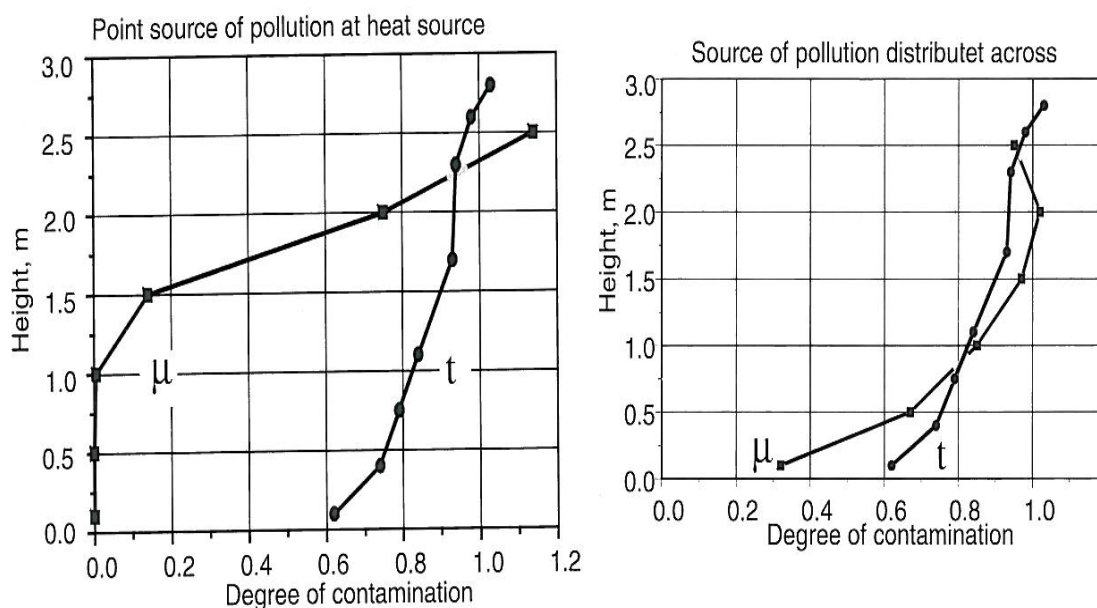
6.2.1 Fordeling av forurensning

Den vertikale fordelingen av CO₂ fra gulv til tak er presentert grafisk med dimensjonsløse konstanter langs x-aksen i Figur 6-2 til Figur 6-5. Konstantene er gitt av differansen mellom forurensningen i en gitt høyde og tilluften i forhold til differansen mellom avtrekk og tilluft.

$$\mu_c = \frac{C - C_s}{C_e - C_s}$$

I dette tilfellet er forurensningskonsentrasjonen i tilluften lik null, $C_s = 0$. Grafene for CO₂ er da gitt av forholdet mellom CO₂-konsentrasjon etter høyde og konsentrasjon i avtrekket. Forholdet for ideell omrøring vil være konstant lik 1 og er merket av med en konstant vertikal linje i grafene. For aktiv fortregning med en oppholdssone på 1-1,1 meter har alle tilfellene et forhold mindre enn 1. En verdi under 1 vil si at konsentrasjonen er mindre enn den som er i avtrekket og luftkvaliteten er dermed bedre enn ved ideell omrøring.

I *Achieving the desired indoor climate* av P.E. Nilsson [23] er et eksperiment om fordeling av forurensning ved bruk av fortregningsventilasjon omtalt. To grafer med ulike forurensningskilde er gitt. Grafene er gjengitt under i Figur 6-1. Varmekilden var en vertikal sylinder. For tilfellet til venstre var forurensningskilden plassert på toppen av varmekilden og for tilfellet til høyre var kilden jevnt fordelt utover gulvet.

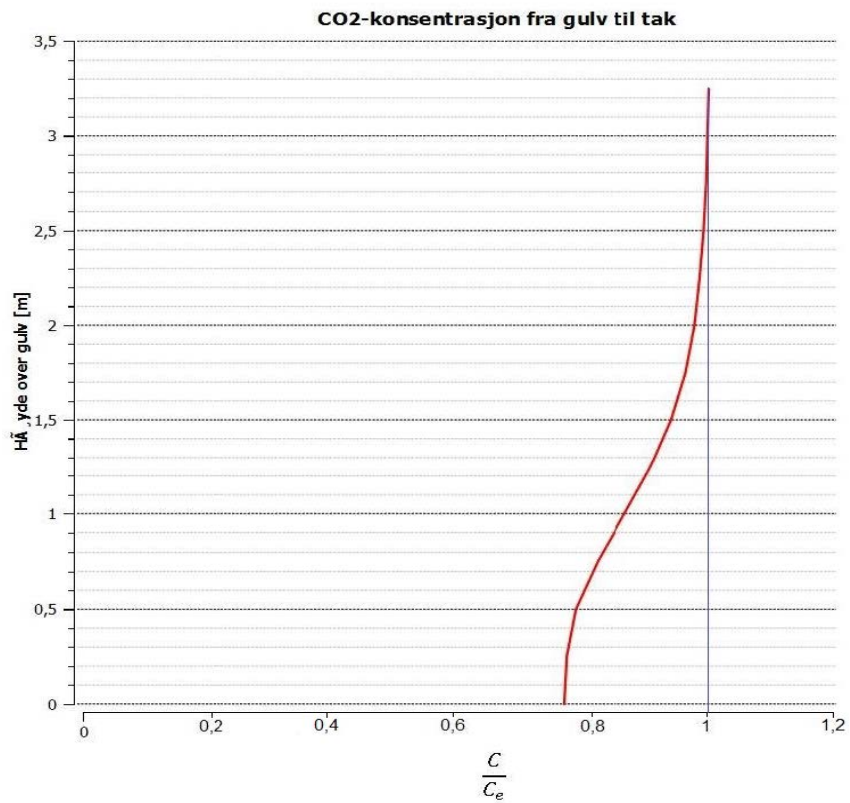


Figur 6-1 Resultat fra eksperiment med to ulike forurensningskilder: temperatur- og forurensningsfordeling [23]

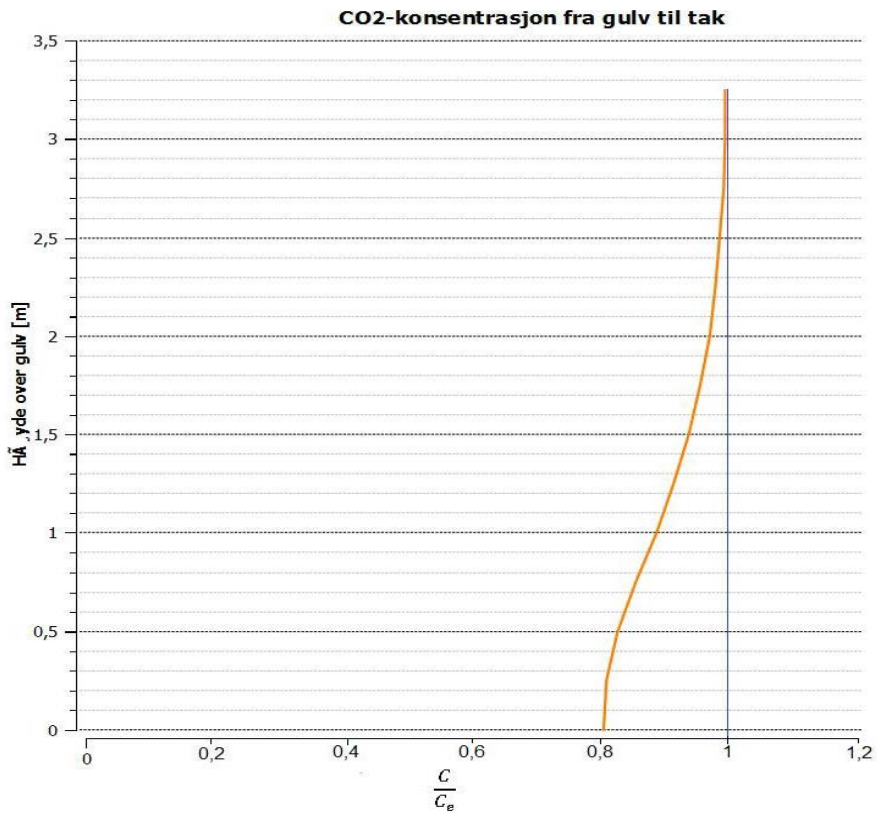
Figuren viser at i tilfeller hvor forurensing og varme kommer fra samme kilde vil forurensningen få en S-formet kurve. For en spredt, jevn fordeling vil kurven ha en mer lineær fordeling lik den for temperatur. Kurvene for temperatur er upåvirket av forurensingen og lik for begge tilfeller. Forskjeller i fordeling av temperatur og forurensning kan forklares med at transport og grensebetingelser er ulike. Begge påvirkes og transporteres gjennom konveksjon og diffusjon, men varme transporteres også via stråling [26].

Ved bruk av fortreningsventilasjon viser det seg at forurensningen vil ha en fordeling lik grafen til høyre i Figur 6-1 selv når varme- og forurensningskilden er den samme. Taket blir varmet opp av varm luft og gjennom stråling utveksles varme med gulvet som har en lavere temperatur. Gulvets overflate vil bli oppvarmet og skaper en situasjon lik tilfellet hvor forurensingen er jevnt fordelt over gulvet. Dette gir tilnærmet lik form på kurvene for temperatur og CO₂.

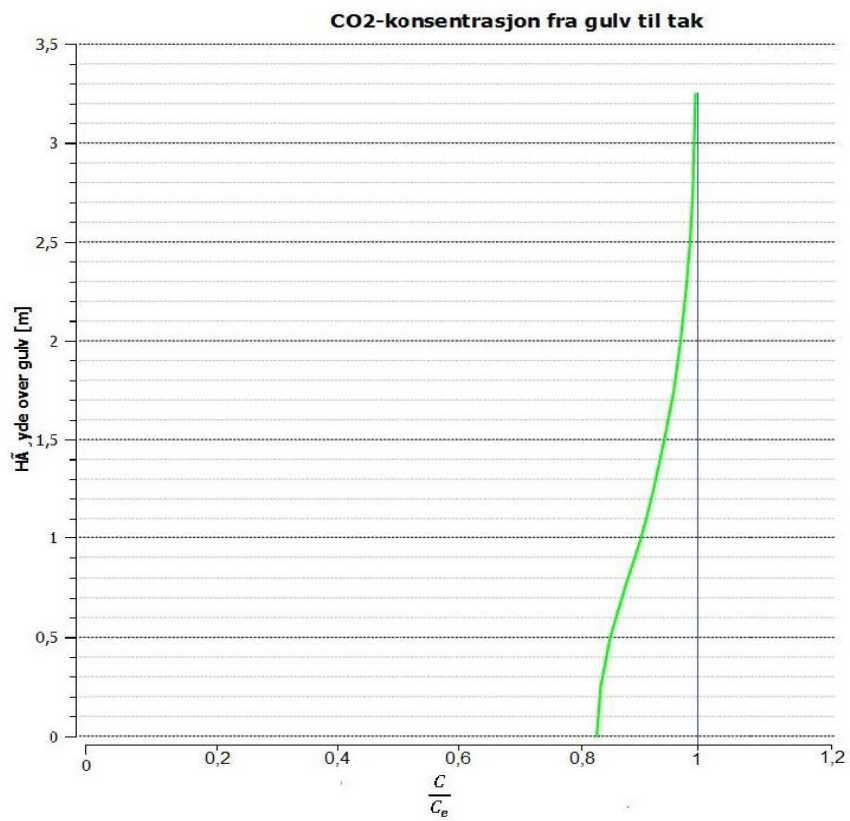
Grafene hentet ut fra simuleringene som er utført viser at ved bruk av aktiv fortrenning er dette tilfellet. Kurvene for temperatur og CO₂- konsentrasjon (Figur 6-2 - Figur 6-6) med verdier gitt av høyde er bortimot identiske og har liknende strømningsmønster som fortrenning ved gulvnivå. Sammenlignet med Figur 6-1 er kurvene litt mindre S-formet og etter en viss høyde er stigningen nær konstant.



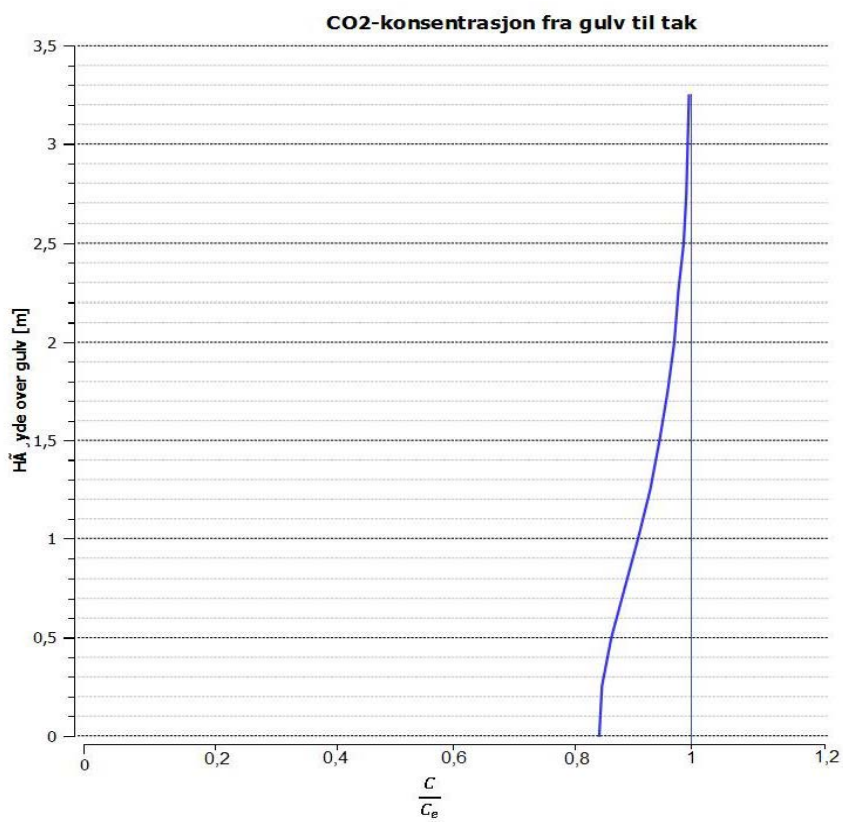
Figur 6-2 $T_s = 10$ °C: Forurensningsgrad



Figur 6-3 $T_s = 12$ °C: Forurensningsgrad



Figur 6-4 $T_s = 14\text{ }^\circ\text{C}$: Forurensningsgrad



Figur 6-5 $T_s = 16\text{ }^\circ\text{C}$: Forurensningsgrad

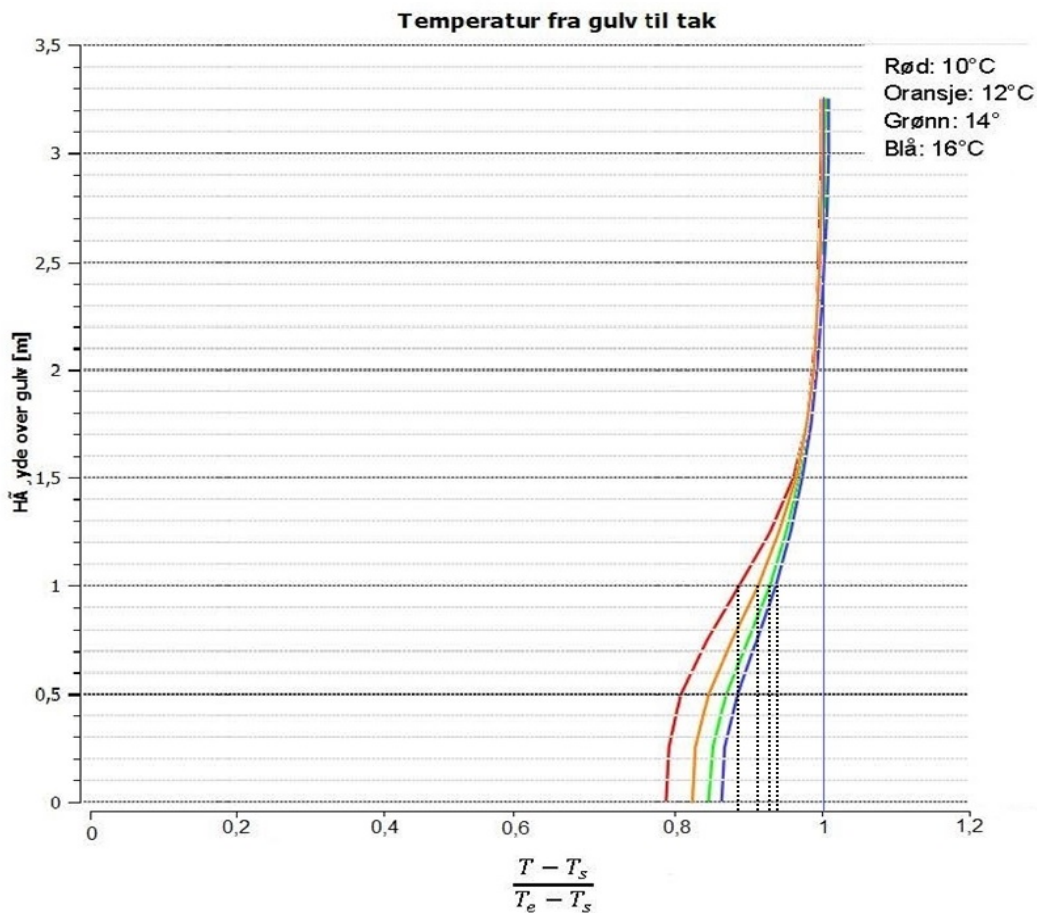
6.2.2 Temperaturfordeling

Den vertikale temperaturfordelingen er uttrykt på samme måte som forurensningen,

$$\mu_t = \frac{T - T_s}{T_e - T_s}$$

Temperaturkurvene fra simuleringene med varierende tilluftstemperatur er samlet i én figur med tilnærmet lik temperaturfordeling. Figur 6-6 viser at alle tilfellene har en verdi lik 1 nær taket. I oppholdssonen ligger forholdet på rundt 0,8 med en stigende verdi etter økning i tilluftstemperatur. For tilluftstemperaturen på 10 °C ligger temperaturforholdet rett under 0,8 ved gulvnivå.

Grafene kan benyttes ved dimensjonering av et anlegg da de gir et bilde på strømningsmønsteret for parametere som temperatur og forurensning. For en kjent eller beregnet avtrekkstemperatur som i kapittel 4 kan en lese av temperaturgraden for oppholdssonen og en forventet verdi kan beregnes. Forholdet for 1 meter høyde er merket med stiplet linje i figuren for temperatur.

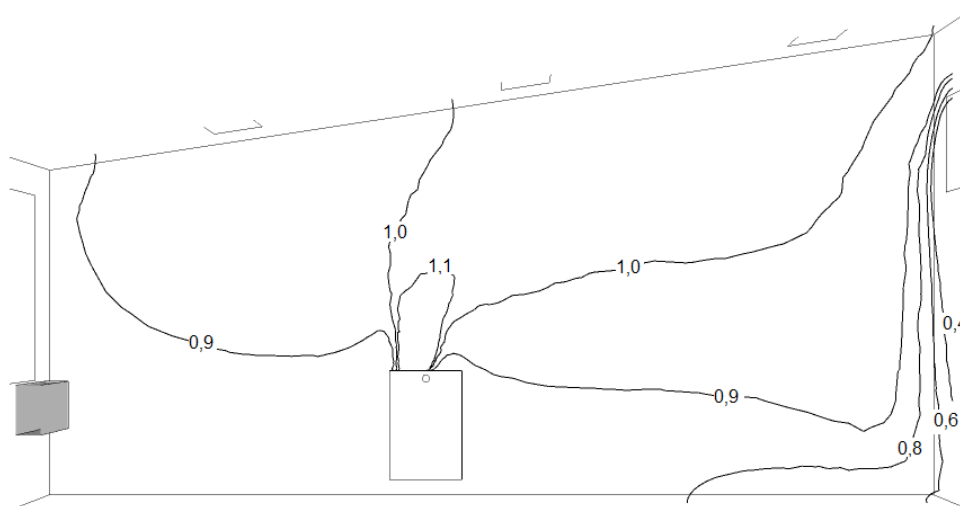


Figur 6-6 Temperaturfordeling

Resultatene fra simuleringene viser at en tilluftstemperatur ned i 10 °C kan klare å opprettholde en temperatur i oppholdssonen på 20 °C for et tett rom. Tilluftstemperaturen på 12 °C gir bedre termiske forhold med en temperatur på 22 °C i oppholdssonen. Sammenlignet med ideell omrøring og fortreningsventilasjon ved gulvnivå, vil aktiv fortrenning kunne benytte en lavere tilluftstemperatur. Fortreningsventilasjon som tilføres ved gulv har vanligvis en tilluftstemperatur som er et par grader lavere enn ønsket romtemperatur [2]. Dersom tilluftstemperaturer ned i 10 og 12 °C kan benyttes vil behovet for forvarming av tilluften på kalde dager kunne reduseres.

Selv om simuleringene viste at det er en trekkfare i oppholdssonen, drar aktiv fortreningsventilasjon nytte av og ikke bli tilført direkte i oppholdssonen og tilluften kan utnytte varme fra romluften. Sammenlignet med ideell omrøring som tilføres med høyere hastigheter og fortrenning ved gulv med direkte tilførsel i oppholdssonen, vil trekkfaren sannsynligvis ikke være større.

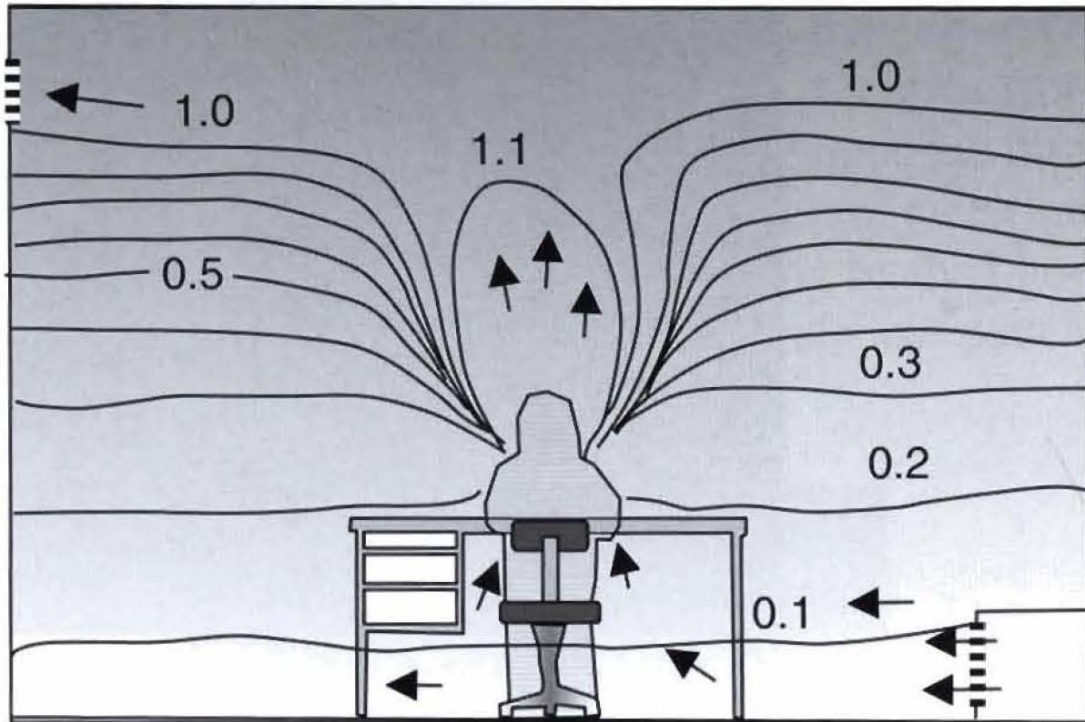
6.2.3 Strømningsmønster for forurensning rundt person



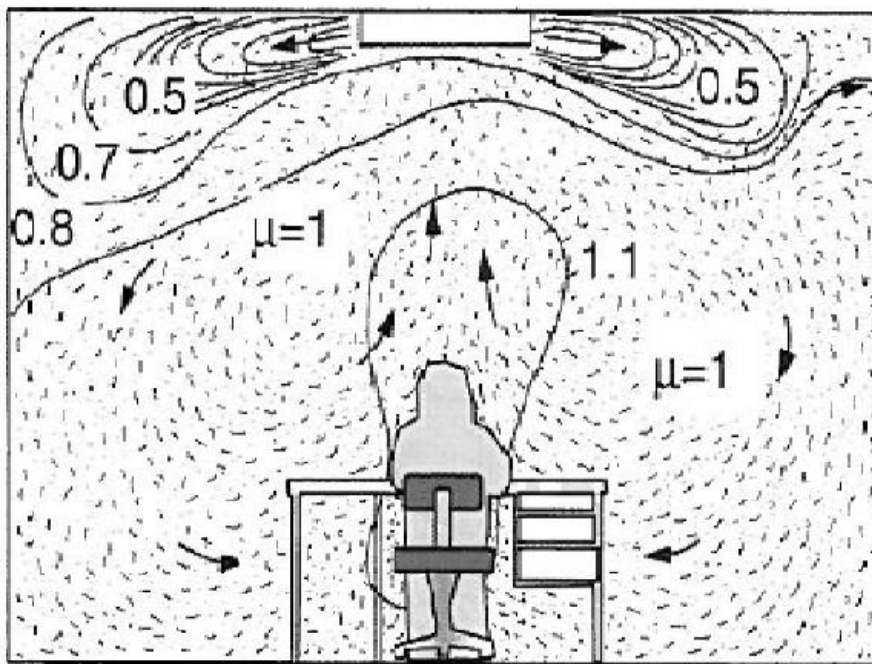
Figur 6-7 Strømningsmønster for forurensning: aktiv fortregning med en tilluftsmengde på 7 l/s/person

Figur 6-7 viser strømningsmønsteret rundt en person fra en simulering med aktiv fortregning. Figuren viser linjer med konstant forurensningsgrad. Liknende tilfeller for tradisjonell fortregnings- og omrøringsventilasjon er vist i henholdsvis Figur 6-8 og Figur 6-9. Tilfellet med aktiv fortregning viser hvordan forurensningen trekker mot veggen hvor tilluften og avtrekket er plassert da tilluften trekker til seg omgivelsesluften.

Forurensningsgraden i oppholdssonen ved bruk av aktiv fortregning ligger mellom 0,8 og 0,9. Omrøringsventilasjon har som tidligere nevnt en konstant verdi på 1 i oppholdssonen og aktiv fortregning gir dermed en lavere grad av forurensning. Figur 6-8 viser et tilfelle for fortregning ved gulv med en forurensningsgrad ved hodehøyde på 0,3 til 0,4. Forurensningsgraden vil, ved tilførsel av luft ved gulv, være avhengig av luftmengden som tilføres. I tilfellet under, med en forurensningsgrad på 0,3 til 0,4, er tilluftsmengden mest sannsynlig høyere enn 7 l/s/person. En lavere luftmengde vil øke forurensningsgraden i oppholdssonen da sjiktet for oppholdssonen vil legge seg lavere.



Figur 6-8 Strømningsmønster for forurensning: fortrenningsventilasjon ved gulvnivå [23]



Figur 6-9 Strømningsmønster for forurensning: omrøringsventilasjon [23]

6.3 Utelatte elementer

6.3.1 Bevegelse i rommet

Simuleringer og beregninger tar utgangspunkt i en stasjonær situasjon og bevegelser fra personer i rommet er ikke tatt hensyn til. Personer i bevegelse vil forårsake bevegelser i luften og hastigheten som oppstår kan skape ubehag. Hastigheten kan sies å ha samme størrelsesorden som hastigheten til elementet i bevegelse [26]. Bevegelser skaper også større variasjoner i hastighetsfeltet over et tidsintervall. Hastighetsvariasjonene kan redusere evnen til å tilpasse seg omgivelsene.

Undersøkelser viser at luftkvaliteten i et rom vil være bedre for en person som er i ro enn i bevegelse [23]. Så lenge det rene luftsjiktet er tykkere enn 0,3 vil en betydelig del av luften blir dratt med og forbedre luftkvaliteten. For en person i bevegelse vil dette ikke gjelde og luftkvaliteten kan oppfattes om dårligere.

6.3.2 Varmetap og varmetilskudd

Simuleringene inkluderte ikke varmetap til ytre omgivelser. Lekkasje og infiltrasjon i konstruksjonene eller varmetilskudd fra andre kilder enn personer ble heller ikke tatt med. For en reell situasjon vil kalde overflater ha betydning for strømningsmønsteret i rommet. Kaldras vil gi en større luftmengde tilført i oppholdssonen og påvirker høyden på oppholdssonen og CO₂-konsentrasjonen. Større varmetap kan også gi behov for høyere tilluftstemperatur eller ekstra oppvarming for å opprettholde temperaturen. Generelt vil det kreves et godt isolert og tett bygg for at løsningen skal fungere optimalt med et lavt energibruk i et kaldt klima.

Selv med god solavskjerming vil solfylte dager tilføre varme til klasserommet både ved sommer- og vinterforhold. På vintertid kan dette utnyttes til å redusere eventuelt oppvarmingsbehov. Simuleringen med en tilluftstemperatur på 16 °C ga en temperatur opp mot 27 °C som er høyere enn anbefalt. Kombinert med åpne vinduer kan det likevel være en mulighet for å oppnå et tilfredsstillende inneklima. Ekstra varme sommerdager hvor tilskuddet fra solen er stort og lufttemperaturen høy stiller store krav til kulvertens passive kjøleeffekt. Da skolen ikke er i bruk midt på sommeren kan dette bli sett på som et problem som vil oppstå sjeldent.

6.3.3 Forurensning fra materialer

Simuleringene er utført med en luftmengde på 7 l/s/person som tilsvarer anbefalt luftmengde for personbelastning i et rom. Luftmengde for utslipp fra materialer er utelatt. Anbefalt luftmengde for personbelastning og lavemitterende materialer ligger mellom 8-9 l/s/person. Resultatene viser at det er fullt mulig å oppnå et tilfredsstillende inneklima med lavere luftmengde når luftkvaliteten er vurdert ut fra CO₂. For å få et mer reelt resultat på luftkvaliteten burde andre forurensningskilder enn mennesker vært inkludert. Simuleringene kan derfor ikke benyttes til å vurdere luftkvaliteten utover CO₂-nivået.

6.4 Kvalitet på simuleringsmodellen

Kvaliteten på nettet er av betydning for simuleringens og løsnings nøyaktighet og stabilitet. Størrelsen på nettet bruk i simuleringene er gitt i Tabell 6-3. Verdiene under er hentet fra ANSYS Meshing hvor nettet for modellen ble lagt. Det samme nettet er benyttet i de forskjellige simuleringene, men for simulering med færre personer i rommet blir naturligvis antallet mindre.

	Variabel tilluftstemperatur	Redusert personbelastning
Nodes	348 964	272 997
Elements	1 413 898	1 044 275
Cells	1 274 853	938 000

Tabell 6-3 Størrelse nettet lagt i Fluent

De første simuleringsforsøkene hadde problemer med å konvergere og en årsak til konvergensproblemer kan være dårlig kvalitet på nettet. Dette ble derfor etterjustert for å oppnå bedre kvalitet. En for høy skjevhet (skewness) i nettet kan føre til unøyaktig og ustabile løsninger. *ANSYS Fluent User's guide* [45] anbefaler en maksverdi for denne på 0,95 da verdier over dette kan gi konvergensproblemer. Nettet bruk ved endelige simulering hadde følgende verdier:

Skewness	Variabel tilluftstemperatur	Redusert personbelastning
Min.	0,00048	0,00032
Max.	0,944	0,929
Average	0,296	0,300
Standard deviation	0,168	0,168

Tabell 6-4 Skjevhet i nettet

En enkel måte å sjekke kvaliteten til nettet på i Fluent er ved å velge *Report quality* under Mesh-fanen som gir et mål på den ortogonale kvaliteten. Celler med lav kvalitet vil ligge nær null og for god kvalitet ligger den nær 1. Generelt bør ingen verdier være under 0,01 og gjennomsnittsverdien bør være betydelig høyere. Tabell 6-5 viser at den gjennomsnittlige verdien var 0,82 for begge tilfeller.

Orthogonal quality	Variabel tilluftstemperatur	Redusert personbelastning
Min.	0,042	0,041
Max.	0,999	0,999
Average	0,822	0,820
Standard deviation	0,125	0,125

Tabell 6-5 Ortogonal kvalitet

Det ble ikke utført simuleringer for å sjekke om resultatene var uavhengig av nettet selv om dette er anbefalt for å oppnå best mulig resultat [46, 47]. En standard prosedyre er å justere og forbedre nettet fram til det ikke gjør noe utslag eller endring på løsningene. Dersom modellen eller områder ikke er fullstendig uavhengig av nettet kan dette gi avvik eller feil i simuleringsresultatene.

7 Konklusjon

I denne oppgaven har en ventilasjonsløsning med lav tilluftsmengde og lav tilluftstemperatur for et klasserom blitt vurdert. Løsningen benytter fortrenningsprinsippet i form av aktiv fortrengning. Analyse av termisk komfort og luftkvalitet i klasserommet har blitt utført ved å benytte CFD-verktøyet ANSYS Fluent for simulering av aktuelle scenarier. Resultatene viser at aktiv fortrengning kan gi et tilfredsstillende inn klima selv med lave luftmengder. Basert på simuleringsresultatene kan følgende trekkes fram:

- Den vertikale temperaturgradienten i rommet er liten og vil sannsynligvis ikke kunne føre til diskomfort. Gjennomsnittsverdien fra simuleringene var 1,3 °C/m fra ankel til hodehøyde.
- For samtlige simuleringer er CO₂-konsentrasjonen under anbefalt maksverdi på 600 ppm over utendørsnivå. Løsningen oppnår en tilfredsstillende luftkvalitet, i forhold til CO₂, med lavere tilluftsmengde enn anbefalt.
- Gjennomsnittlig ventilasjonseffektivitet er 1,18 og samtlige simuleringer gir høyere effektivitet enn ideell omrøring.
- Lavere tilluftstemperatur kan benyttes sammenlignet med ideell omrøring og fortrenging ved gulv, uten en betydelig økning i trekkfaren. Dette er en fordel ved kjølebehov.
- Ventilasjonsløsningen kan gi risiko for trekk. En nærsone på 2 meter fra tilluftsveggen er nødvendig for å unngå hastigheter over 0,18 m/s i oppholdssonen.
- En tilluftstemperatur på 10 °C kan ved vinterforhold i et rom som ikke er helt tett gi for lav temperatur i oppholdssonen. En høyere tilluftstemperatur på 12 °C vil være en bedre løsning enn å redusere luftmengden.
- Tilluften oppførte seg som forventet i simuleringene. Et tverrsnitt plassert på en tilluftsventil viste at tilluften strømmer ned langs veggen og brer seg utover gulvet. Strømningsbildet viste også at romluften blir dratt med i strålen.
- Strømningsmønsteret er tilnærmet likt for temperatur og CO₂.
- Avviket mellom beregnede temperaturer og temperaturer fra simuleringene er lite.
- Avviket mellom simuleringsresultater og beregningsmodeller for CO₂-konsentrasjon knytter usikkerhet til beregningene og forventet strømningsmønster for forurensningen.

8 Framtidig arbeid

Vintersimulering med varmetap

Infiltrasjon, lekkasje og varmetap gjennom fasader bør inkluderes i en simulering. Selv for godt isolerte bygg vil man ikke kunne oppnå at bygget er helt tett. For å kunne bestemme nødvendig tilluftsmengde og temperatur på en kald vinterdag, hvor varmetapet vil være størst, er det nødvendig å utføre mer realistiske simuleringer.

Utnyttelse av sollys til oppvarming på vinterstid er også et aktuelt scenario.

Åpne vinduer

For å se om en tilluftstemperatur på 16 °C eller høyere kombinert med åpne vinduer kan gi lavere temperatur i oppholdssonen er simuleringer med luftstrøm inkludert fra vinduene interessant. Ved Hökegård skole i Sverige endres ventilasjonsprinsippet fra fortregning til omrøringsventilasjon når vinduene åpnes [38]. Effekten av vinduslufting på aktiv fortregning og påvirkning på inneklimate kan derfor være interessant å studere.

Utleddning av flere empiriske modeller

Teorien rundt tilluftsstrålen som en halv vertikal stråle med oppdrift ble presentert, men det ble ikke utført beregninger for denne modellen. For å skape et større sammenlikningsgrunnlag for simuleringer kan volumstrømmer, hastighet og temperaturer beregnes for tilluften som en vertikal stråle.

Flere empiriske beregningsmetoder bør utledes for å skape et bedre dimensjoneringsgrunnlag for ventilasjonsløsningen. Dette kan benyttes til å utlede en detaljert framgangsmåte for dimensjonering.

Design av tillufts- og avtrekksventiler

Det ble ikke fokusert på å optimalisere designet for tillufts- og avtrekksventilene og begge ble modellert som rektangulære åpninger. Størrelsen er likevel av betydning for resultatet og strømmingen i rommet. Designet kan ha betydning for blant annet trekk og vil også ha betydning for estetikken i rommet. Eksempler på ventildesign er bruk av tallerkenventiler for å skape en trekkfri fortregning som ved Jaer barneskole [18]. Tilførsel fra tak eller via luftfordelingssystemer som nevnt under delkapittel 3.1.14 kan også vurderes som aktuelt design.

Energibruk

Beregninger av nødvendig viftedrift og oppvarming både i form av forvarming og romoppvarming vil kunne gi en pekepinn på forventet energibruk for ventilasjonsløsningen. Dersom anlegget skal vurderes opp mot konvensjonelle anlegg som benyttes i dag er energibruken relevant. Både lavere energibruk og bedre inneklimate er forutsetninger som kreves for å bli vurdert som et bedre alternativ.

Litteraturliste

1. Eimund Skåret, *Ventilasjonsteknisk håndbok, Håndbok 48*, 2000: Norges byggforskningsinstitutt.
2. Byggforsk, *552.311 Inneklima og ventilasjon i skoler*, 2005.
3. Novakovic, V., et al., *Enøk i bygninger*, 2007, Trondheim: Gyldendal Norsk Forlag.
4. Delsante, A. and T.A. Vik. *State-of-the-art review, IEA Annex 35 HybVent, Hybrid Ventilation in New and Retrofit Office Buildings*. 1999; Available from: http://www.hybvent.civil.aau.dk/annex35/index_annex35.htm.
5. Statens Helsetilsyn, *Veileder til forskrift om miljørettet helsevern i barnehager og skoler*, 1998.
6. Byggforsk, *421.503 Krav til luftmengder i ventilasjonsanlegg*, 1999.
7. Awbi, H.B., *Ventilation of Buildings, 2nd Edition*, 2003: Spon Press.
8. Kommunal- og regionaldepartementet, *Byggteknisk forskrift (TEK 10)*.
9. Byggforsk, *421.505 Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger*, 2000.
10. Norsk Standard, *NS3031:2007+A1:2011 Bergninger av bygningers energiytelse - Metode og data*.
11. Byggforsk, *421.501 Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort.*, 1999.
12. Mads Mysen, *Ventilation Systems and their Impact on Indoor Climate and Energy Use in Schools*, in *Department of Energy and Process Engineering*, 2005, Norwegian University of Science and Technology.
13. Dwyer, T. *Demand controlled ventilation to reduce fan energy use*. Chartered Institution of Building Services Engineers - CIBSE Journal 2012; Available from: <http://www.cibsejournal.com/cpd/2012-10/>.
14. Byggforsk, *552.323 Behovstyrt ventilasjon*, 2005.
15. Byggforsk, *552.351 Klimaanlegg - Fordeling av ventilasjonsluft i rom*, 1996.
16. Sangnes, A.O., *Energibruk og inneklima i lavenergi kontorbygning*, in *Department of Energy and Process Engineering* 2011, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim. p. 117.
17. Kjell Aas. *Ventilasjonsstyper*. Access date: 11.10.2013]; Available from: <http://inneklima.com/index.asp?browse=4&context=4&document=237>.
18. Dokka, T.H., et al., *Bygningsintegrert ventilasjon: en veileder*, 2003, Oslo: Økobygg.
19. T.H. Dokka and P.O. Tjelflaat. *A simplified model for human induced convective air flows - model predictions compared to experimental data*. in *Proceeding of Room Vent 2002 (8th International Conference on Air Distribution in Rooms)*. 2002. Copenhagen - Denmark.
20. T.H. Dokka, P.O.T., *Simplified models for prediction of vertical contaminant and temperature stratification in displacement ventilated rooms: Part 1: derivation*. Energy and Buildings, 2000.
21. Mundt, E., *The performance of displacement ventilation system; Experimental and Theoretical studies*, 1996, Ph.D. thesis, Royal Institute of Technology: Stockholm.
22. Sørensen, H.H., *Håndbog i industriventilasjon* 1998, Danmark: Teknisk Forlag AS.
23. Nilsson, P.-E., *Achieving the desired indoor climate: energy efficiency aspects of system design* 2003, Lund: Studentlitteratur. XIV, 668, [78] s. : ill.

24. Mundt, E., *Displacement ventilation systems—Convection flows and temperature gradients*. Building and Environment, 1995. **30**(1): p. 129-133.
25. Skistad, H., et al., *Displacement ventilation in non-industrial premises*, Second edition 2004: Rehva.
26. Etheridge, D. and M. Sandberg, *Building ventilation: theory and measurement* 1996, Chichester: Wiley. XXVI, 724 s. : ill.
27. Nasjonal rådgivningstjeneste. *Barnehage- og skoleanlegg*. 2004 Access Date: 21.11.2013]; Available from: <http://skoleanlegg.utdanningsdirektoratet.no/id/1>.
28. Andersson, T. and H. Gillbro, *Fredkulla- och Risebergsskolan - två av många moderna självdragsskolor*. Bygg & Teknik, nr 6/96, DELTate, Göteborg.
29. Schild, P., *Accurate prediction of indoor climate in glazed enclosures*, in *Department of Refrigeration and Air conditioning, Faculty of Mechanical Engineering* 1997, Norwegian University of Science and Technology (NTNU): Trondheim. p. 202 s. : ill.
30. ANSYS Inc., *ANSYS FLUENT Theory Guide* Release 14.5, October 2012.
31. Jan Vincent Thue, *Husbyggingsteknikk*, 2012, Trondheim: NTNU-trykk.
32. Villafruela, J.M., et al., *CFD analysis of the human exhalation flow using different boundary conditions and ventilation strategies*. Building and Environment, 2013. **62**: p. 191-200.
33. Gao, N.P. and J.L. Niu, *CFD Study of the Thermal Environment around a Human Body: A Review*. Indoor and Built Environment, 2005. **14**(5): p. 5-16.
34. Byggforsk, *552.337 Ventilasjonssystem med kulvert for føring av tilluft*, 2004.
35. Andersson, T. *Vargbro school - Modern version of hybrid ventilation gives a school building with excellent indoor climate at minimal energy cost*. Access Date: 20.05.2014]; Available from: http://www.deltate.se/sites/www.deltate.se/files/files/file_field/vargbro_school_in_storfors.pdf.
36. Buvik, K., et al., *Miljøvennlige skoleanlegg: fem skoler med tilknytning til programmet ØkoBygg* 2003, [Oslo]: ØkoBygg.
37. Teknikk, T. *Air Displacement Vent Units - Type QSH - ISH*. Access Date: 20.05.2014]; Available from: http://www.troxusa.com/xpool/download/en/technical_documents/diffusers/leaflets/t_1_3_5_qsh_ish.pdf.
38. Dokka, T.H. and T.A. Vik, *Hybrid ventilasjon*, 2001, SINTEF Bygg og miljø. p. 32.
39. Buvik, K., *Kvernhuset ungdomsskole - Sammendrag av FoU-prosjekt knyttet til planlegging av skoleanlegget*, Juni 2004, SINTEF Bygg og miljø: Trondheim.
40. *Rapport - Kvernhuset skole*. Access Date: 14.05.2014]; Available from: www.arkitektur.no/kvernhuset-skole?tid=158202.
41. Andersen, I. and T.H. Dokka, *Energianalyse av Kvernhuset Ungdomsskole*, in *SINTEF Rapport* 2001, SINTEF Bygg og miljø: Trondheim.
42. Bryn, I., *Rapport - En vurdering i forhold til balansert mekanisk og hybridventilasjon med varmegjenvinning*, 2000, Erichsen & Horgen A/S, rådgivene ingeniører.
43. P.O. Tjelflaat and R. Knott, *A simulation model for thermal comfort of a person in a large enclosure*, in *INDOOR AIR '96, Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate* 1996: Nagoya, Japan. p. 1015-1020.
44. Tanabe, S.I., et al., *Effective radiation area of human body calculated by a numerical simulation*. Energy and Buildings, 2000. **32**(2): p. 205-215.

45. ANSYS Inc., *ANSYS FLUENT User's Guide*. Release 14.5, October 2012.
46. ANSYS Inc., *ANSYS Fluent Getting Started Guide*. Release 14.5, 2012.
47. Deevy, M., *CFD Modelling of the Benchmark Displacement Ventilation Test Case*. Health & Safety Laboratory, 2006. **86**.
48. Skåret, E., *Ventilasjonsteknikk*. Kompendium Institutt for VVS, Norges Tekniske Høgskole, Trondheim, 1986.
49. Amble, A.K., Energy efficient climatization for rooms with cooling demand – based on a concept with displacement ventilation and low supply air temperature, Department of Energy and Process Engineering 2008, Norwegian University of Science and Technology: Trondheim.
50. Byggforsk, 552.335 *Klimaanlegg – Prosjektering av energieffektive ventilasjonsanlegg*, 2000.
51. Byggforsk, 700.100 *Innemiljø i eksisterende bygninger. Problemer og utbedring*, 1994.
52. Byggforsk, 552.340 *Varmegjenvinnere i ventilasjonsanlegg*, Del 1 2002.
53. Dokka, T.O., et al., *Displacement ventilation versus mixing ventilation: comparison of energy use*, SINTEF, Norwegian University of Science and Technology.
54. P.O Tjelflaat, *Pilot study report: Mediå School Grong, Norway*. IEA ECBCS Annex 35: HybVent, 2000.
55. Peter V. Nielsen, *Analysis and Design of Room Air Distribution Systems*, 2007, HVAC&R Research. **13**(6): p. 987 – 997.
56. C.K. Lee and H.N. Lam, *Computer modeling of displacement ventilation systems based on plume rise in stratified environment*. Energy and Buildings, 2007. **39**: p. 427 – 436.
57. Z. Zhai and Q. Chen, *Solution characters of iterative coupling between energy simulation and CFD programs*. Energy and Buildings, 2003. **35**: p. 493 – 505.
58. H. Xing, et al., *A study of the air quality in the breathing zone in a room with displacement ventilation*. Building and Environment, 2001. **36**: p. 809 – 820.
59. Mundt E., *Contamination Distribution in Displacement Ventilation – Influence of Disturbances*. Building and Environment, 1994. 29(3) p. 311 – 317.

Vedlegg

A. Konveksjonsstrøm over personer

Utleddning av uttrykk bruk for beregning av konveksjonsstrømmer over personer er gjort i *Simplified models for prediction of vertical contaminant and temperature stratification in displacement ventilated rooms, Part 1: Derivation* av Tor Helge Dokka og Per Olaf Tjelflaat[20].

Antakelser og forenklinger som er gjort:

- Turbulent strømming
- Personen blir modellert som en sylinder, med høyde h_{per} og diameter d_{per} . Diameteren avhenger av høyden og overflatearealet til personen.
- Sylinderen blir sett på som et vertikalt plan.

Dersom høyden på den rene oppholdssonen er under høyden til personen, er konveksjonsstrømmen hovedsakelig bestemt av grensesjiktet rundt personen. Likninger benyttet for utledning av endelig uttrykk:

Uttrykk for luft som stiger langs en vertikal, varm flate [48]:

$$\dot{V} = 2,9w\Delta T^{0,4}z^{1,2}$$

ΔT : differanse mellom romluft- og overflatetemperatur.

w: bredde på overflaten

z: høyde (fra gulv)

Uttrykket antar at energi og bevegelsesmengde er bevart og turbulent strømming.

Istedenfor å benytte overflatetemperatur for personer er varme avgitt gjennom konveksjon, P_{per} , lettere å benytte, samt estimere.

Konveksjonskoeffisienten kan uttrykkes ved:

$$\alpha_c = 1,21\Delta T^{\frac{1}{3}}$$

Varme fra person uttrykkes ved:

$$P_{per} = A_{per}\alpha_c\Delta T$$

Kombineres de tre likningene over og løses med hensyn på luftmengde V_{per} , blir uttrykket:

$$\dot{V}_{per} = 8,61\left(\frac{P_{per}}{A_{per}}\right)^{0,3}z^{1,2}d_{per}$$

Hvor $d_{per} = 2(-h_{per} + \sqrt{h_{per}^2 + \frac{A_{per}}{\pi}})$

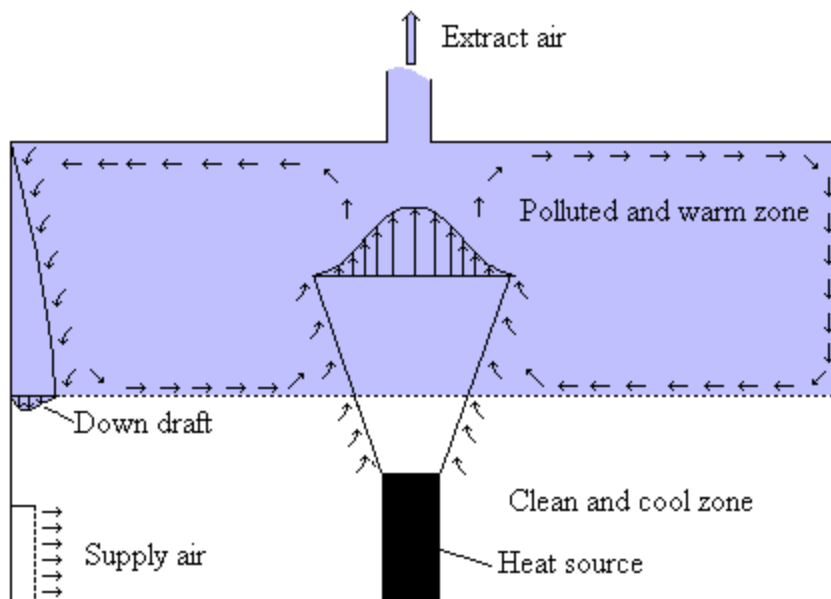
Dersom høyden på den rene oppholdssonen er over høyden til personen er likningen utledet fra konveksjonsstrømmen over en punktkilde,

$$\dot{V}_{point} = 6,0P_{point}^{\frac{1}{3}}(z + z_p)^{5/3}$$

Det er antatt uniform temperatur i rommet, for personer må avstanden til den virtuelle midt/startpunktet, Z_p , estimeres. Her er det gitt ved,

$$Z_p = a * d_{per}$$

Koeffisienten a har en minimumsverdi på 1,7 og en maksimumsverdi på 2,7, basert på resultater kan den settes til 1,9.



Figur V- 1 Prinsipp for vanlig fortrenningsventilasjon [19]

Beregnete verdier for konveksjonsstrøm fra en sittende person er gitt i Tabell V- 2 og input brukt for beregningene er gitt i Tabell V- 1.

P_{person}	50 W
A_{person}	1,5 m ²
h_{person}	1,1 m
a	1,9

Tabell V- 1 Input for person

Konveksjonsstrømmen er uavhengig av luftmengden som blir tilført rommet og med konstant areal og konvektivvarme fra personen er den kun avhengig av avstand fra gulvet. I Tabell V- 2 tilsvarer $q_{k,per}$ konveksjonsstrømmen over en person som sitter i ro, mens $q_{k,tot}$ er den totale konveksjonsstrømmen fra 26 personer i rommet. Konveksjonsstrømmen vil ikke starte helt ved gulvnivå, men i en høyde over gulvet.

Høyde over gulv [m]	$Q_{k, \text{person}}$ [l/s]	$Q_{k, \text{person}}$ [m^3/s]	$Q_{k, \text{pers, total}}$ [m^3/s]
0,9	9,37	0,0094	0,2436
1	15,86	0,0159	0,4123
1,1	19,21	0,0192	0,4495
1,2	22,82	0,0228	0,5933
1,3	26,67	0,0267	0,6935
1,4	30,76	0,0308	0,7998
1,5	35,08	0,0351	0,9121
1,6	39,62	0,0396	1,0302
1,7	44,38	0,0444	1,1540
1,8	49,36	0,0484	1,2833
1,9	54,54	0,0545	1,4181
2	59,93	0,0599	1,5582

Tabell V- 2 Beregnet konveksjonsstrøm fra en stillesittende person

Den totale volumstrømmen fra 26 personer avhenger av at avstanden mellom personene er stor nok til at konveksjonsstrømmene fra forskjellige personer ikke blandes.

B. Verdier og sammenhenger for dimensjonering

Parameter	Symbol	Verdi	Enhet
Referansetetthet for luft (T = 20 °C)	$\rho_{\text{luft}(20\text{ °C})}$	1,2	kg/m ³
Varmekapasitet, luft	$c_{p,\text{luft}}$	1005	J/kgK
Tetthet CO ₂	ρ_{CO_2}	1,8	kg/m ³
Antall personer	n_p	26	
Total tilluftsmengde	$n_s q_{s,0}$	0,182	m ³ /s
Tilluftstemperatur	$T_{s,0}$	10 - 16	°C
Temperatur i avtrekk	T_e	varierer med $T_{s,0}$	°C
ΔT	$\Delta T = T_e - T_{s,0}$	varierer med $T_{s,0}$	
CO ₂ produksjon [18 l/h/person]	P_{CO_2}	0,000234	kg/s
Varmeproduksjon, personer	P_{pers}	100	W
Diameter tilluftsventil	d_0	0,8	m
Areal på tilluftsventil	A_0	0,64	m ²
Polavstand	y_p	0,56	m
Lengde på vegg med tilluftsventiler	L [m]	8	m
Sjikhøyde	h_{sjikt}	1	m
Konveksjonsstrøm, én person ved sjikt	$q_{k,\text{person}}$	0,01586	m ³ /s/pers
Total konveksjonsstrøm fra personer ved sjikt	$q_{k,\text{sjikt}}$	0,4123	m ³ /s
Avstand fra tilluftsventiler til sjikt	y	beregnes	m
Antall ventiler	n_s	beregnes	
Tilluftsmengde fra én tilluftsventil	$q_{s,0}$	0,182/ n_s	m ³ /s
Tilluftshastighet	U_0	$q_{s,0}/A_0$	m/s
Kjøleeffekt per tilluftsventil	P_k	$\rho c_p q_{s,0} \Delta T$	W
Volumstrøm ved avstand y	$q_{s,\text{sjikt}}$	$\frac{1}{2} * 0,055 P_k^{(1/3)} (y+y_p)^{(5/3)}$	m ³ /s
Total volumstrøm ved avstand y	$n_s q_{s,\text{sjikt}}$	$n_s \frac{1}{2} * 0,055 P_k^{(1/3)} (y+y_p)^{(5/3)}$	m ³ /s
Bredde på stråle ved avstand y	b	$\tan(12,5)(y+y_p)$	m
Tverrsnittareal av stråle	A_s	πb^2	m ²
Maks antall ventiler	$n_{s,\text{maks}}$	L/2b	

Tabell V- 3 Verdier brukt for beregning av antall ventiler og høyde

C. Input i Fluent

Størrelser på overflater, modeller, materialer og driftsbetingelser er like for alle simuleringer. For simulering med halv personbelastning reduseres antall personer i ANSYS DesignModeller til 14 personer og det totale arealet for personer vil endre seg. For redusert luftmengde vil tilluftshastigheten reduseres.

Selection	Areal [m ²]	Antall	Totalt areal [m ²]
Tilluftsventil	0,64	3	1,92
Avtrekkventil	0,2	2	0,4
Tak	61	1	61
Gulv	61	1	61
Innervegg, langside	30	1	30
Innervegg, kortside	26	2	52,4
Yttervegg	13	1	13,28
Person	1,56	26/14	40,56/21,84
Munn	0,003	26/14	0,078/0,042
Lampe	0,4	9	3,6
Radiator	1,8	3	5,28
Vindu	3	3	9
Volum (Fluid)	206,38 [m ³]	1	

Tabell V- 4 Mål på volum og overflater

Modell	
Energy/heat transfer	Energy equation: on
Viscous	Relizable k-ε Enhanced Wall Treatment
Species	Species Transport
Material	
Fluid	Air og CO ₂ : Density: incompressible-ideal- gas/temperature dependent
Radiation	
Surface to surface (S2S)	
Operating conditions	
Pressure	101325 Pa
Gravity	-9,81 m/s ² , y-direction
Temperature	295 K (22 °C)
Time	Steady

Tabell V- 5 Modeller, materialer og driftstilstand

<i>Grensebetingelser brukt for simulering med varierende tilluftstemperatur</i>		
Navn	Type	Input
Innervegger	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Tak	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Fasade	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Vinduer	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Gulv	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Varmeelement	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Lys	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Elver + lærer	wall	Momentum: Wall motion: Stationary 3wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 70 W/m ² Internal emissivity = 1
Munn	velocity-inlet	Momentum: Velocity specification method: Magnitude, normal

		<p>to boundary Reference frame: Absolute Velocity magnitude: 0.0001667 m/s Supersonic/Initial gauge pressure (pascal): 0 Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0,06 (m) Thermal: Total temperature = 298 K Species: Species mass fraction: CO₂ = 1</p>
Tilluftsventiler	velocity-inlet	<p>Momentum: Velocity specification method: Magnitude, normal to boundary Reference frame: Absolute Velocity magnitude: 0.095 m/s Supersonic/Initial gauge pressure (pascal): 0 Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0,8 (m) Thermal: Temperature = <i>varieres</i> (283 – 289 K) Species: Species mass fraction: air = 1</p>
Avtrekksventiler	pressure-outlet	<p>Momentum: Gauge pressure (pascal) : 0 Backflow direction spesification Method: Normal to Boundary Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0,4 (m) Thermal: Backflow temperature: 300 K</p>

Tabell V- 6 Input for simuleringer med varierende tilluftstemperatur

<i>Grensebetingelser brukt for simulering med redusert personbelastning</i>		
Navn	Type	Input
Innervegger	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Tak	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Fasade	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Vinduer	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Gulv	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 0.93
Varmeelement	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Lys	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 0 Internal emissivity = 1
Elver + lærer	wall	Momentum: Wall motion: Stationary wall Shear condition: No slip Thermal: Heat flux = 70 W/m ² Internal emissivity = 1
Munn	velocity-inlet	Momentum: Velocity specification method: Magnitude, normal

		<p>to boundary Reference frame: Absolute Velocity magnitude: 0.0001667 m/s Supersonic/Initial gauge pressure (pascal): 0 Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0.06 (m) Thermal: Total temperature = 298 K Species: Species mass fraction: CO₂ = 1</p>
Tilluftsventiler	velocity-inlet	<p>Momentum: Velocity specification method: Magnitude, normal to boundary Reference frame: Absolute Velocity magnitude: 0.095/0.0510 m/s Supersonic/Initial gauge pressure (pascal): 0 Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0.8 (m) Thermal: Temperature = 285 K Species: Species mass fraction: air = 1</p>
Avtrekksventiler	pressure-outlet	<p>Momentum: Gauge pressure (pascal) : 0 Backflow direction specification Method: Normal to Boundary Turbulence: Specification method: Intensity and Hydraulic Diameter Turbulent Intensity: Medium (5 %) Hydraulic Diameter: 0.4 (m) Thermal: Backflow temperature: 300 K</p>

Tabell V- 7 Input for simulering med redusert personbelastning

D. Plassering av målepunkt

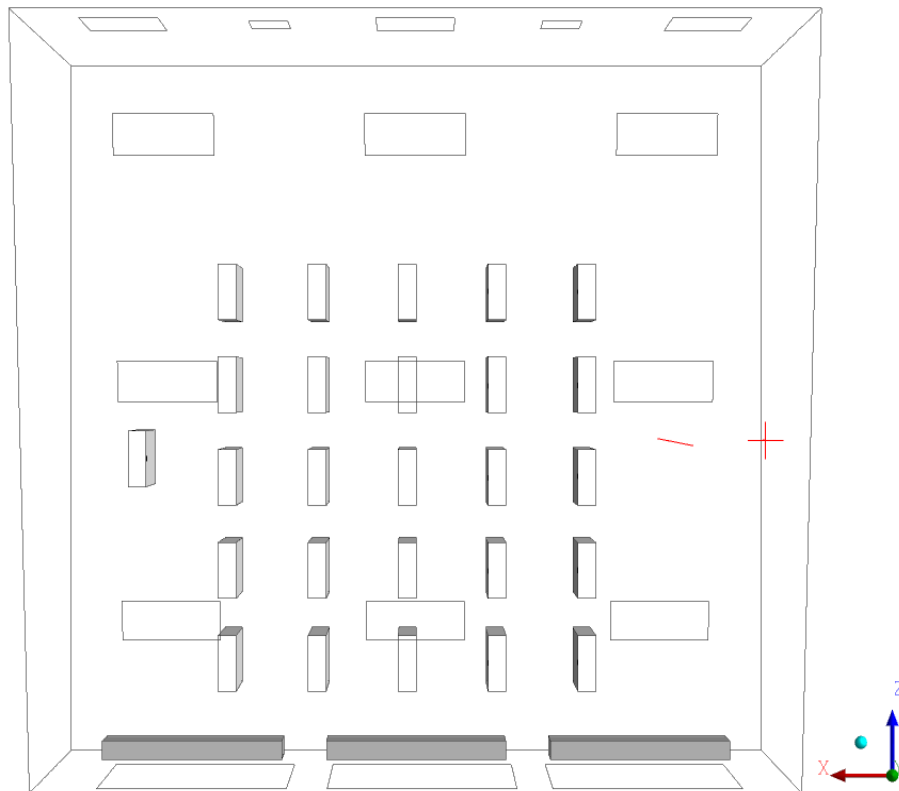
Plassering av målepunktet som representerer sensoren i klasserommet og linjen fra tak til gulv er merket med rødt.

Koordinater:

«Sensor» på bakre vegg: [0,1 1 3,5]

Linje fra gulv til tak: $\begin{bmatrix} 1 & 0 & 3,5 \\ 1 & 3,5 & 3,5 \end{bmatrix}$

Linjen var opprinnelig plassert midt i rommet, men ble flyttet da grafen viste at konveksjonsstrømmen «forstyrret» resultatene på enkelte steder.



Figur V- 2 Målepunkt i klasserom