

# Hybrid ventilasjon i moderne bygninger

**Magnus Lie**

Master i energibruk og energiplanlegging

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Hans Martin Mathisen, EPT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for energi- og prosessteknikk



EPT-M-2015-51

**MASTEROPPGAVE**

for

Student Magnus Lie

Våren 2015

Hybrid ventilasjon i moderne bygninger  
*Hybrid ventilation in modern buildings***Bakgrunn**

I moderne bygninger bygd etter TEK10 eller som passivhus er det nødvendig med gjenvinning av energi fra den brukte ventilasjonsluften for å tilfredsstille kravene til energibruk. I framtidens nær nullenergibygninger vil kravene skjeper ytterligere. For å få til varmegjenvinning med høy virkningsgrad får man gjerne et relativt høyt trykkfall over gjenvinneren. For å overvinne dette trykkfallet kreves mekanisk ventilasjon med vifter. Ulempen med mekanisk ventilasjon er at det brukes elektrisitet til drift av vifter.

Moderne bygninger har kjølebehov store deler av året. Brukes ventilasjonen til å fjerne overskuddsvarmen kreves gjerne store luftmengder, noe som øker forbruket av strøm til drift av vifter. Dersom man kan lage løsninger med naturlig ventilasjon eller som kombinerer mekanisk balansert ventilasjon med varmegjenvinning og naturlig ventilasjon, så kan man redusere strømforbruket til vifter.

Masteroppgaven er en fortsettelse av arbeid påbegynt i prosjektoppgaven.

**Mål**

Målet med masteroppgaven er å vurdere bruken av hybride «mixed mode» ventilasjonsløsninger i moderne bygninger og å evaluere slike løsninger med hensyn til energibruk og inneklima.

**Oppgaven kan bearbeides ut fra følgende punkter**

1. Supplere litteraturstudien utført i prosjektoppgaven
2. Mesterfjellet skole i Larvik brukes som case. Framskaff nødvendige data for bruk i simuleringsmodell.
3. Etablere simuleringsmodell av bygningen i IDA ICE for løsning med og uten bruk av mixed mode.
4. Validere modeller ved blant annet å gjøre sammenligning med målinger fra Mesterfjellet.
5. Etablere brukerscenarier og utføre simuleringer
6. Vurdere hvordan ulike parametere virker inn på resultatet.

” - ”

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.

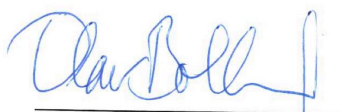
Risikovurdering av kandidatens arbeid skal gjennomføres i henhold til instituttets prosedyrer. Risikovurderingen skal dokumenteres og inngå som del av besvarelsen. Hendelser relatert til kandidatens arbeid med uheldig innvirkning på helse, miljø eller sikkerhet, skal dokumenteres og inngå som en del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

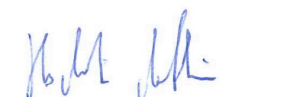
I henhold til "Utfyllende regler til studieforskriften for teknologistudiet/sivilingeniørstudiet" ved NTNU § 20, forbeholder instituttet seg retten til å benytte alle resultater og data til undervisnings- og forskningsformål, samt til fremtidige publikasjoner.

Besvarelsen leveres digitalt i DAIM. Et faglig sammendrag med oppgavens tittel, kandidatens navn, veileders navn, årstall, instituttnavn, 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, 14. januar 2015

  
Olav Bolland  
Instituttleder

  
Hans Martin Mathisen  
Faglig ansvarlig/veileder

Medveileder(e):

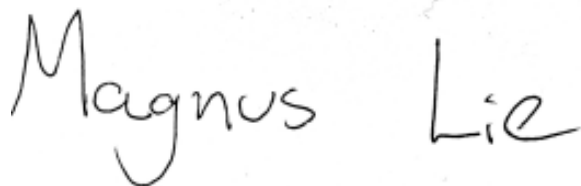


## Forord

---

Denne masteroppgaven er skrevet som avslutning av utdanningsløpet ved Institutt for energi- og prosessteknikk ved Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet (NTNU) i Trondheim våren 2015. Oppgaven er skrevet som del av sivilingeniørstudiet Energibruk og energiplanlegging, med spesialisering innenfor hovedprofilen Energibruk i bygninger. Professor Hans Martin Mathisen har vært veileder. Masteroppgaven er en fortsettelse av arbeid påbegynt i prosjektoppgave som ble skrevet høsten 2014.

Jeg ønsker å takke veileder Hans Martin Mathisen for verdifulle innspill. I tillegg ønsker jeg å takke Building System Integrator med Vidar Henning Hansen og Erik Berge for hjelp med uttak av måledata fra SD-anlegget, samt for å ha bistått med informasjon om mixed-mode anlegget på Mesterfjellet skole. En stor takk går også til vedlikeholdstekniker ved Mesterfjellet skole Øyvind Thorstein som har vært svært behjelpelig med informasjon om anlegget. Ønsker også å takke medstudenter på NTNU, for å hjelp, støtte og diskusjoner. I tillegg til familie for støtte, diskusjoner, samt hjelp til korrekturlesning.



---

Magnus Lie

Institutt for energi- og prosessteknikk, NTNU, Trondheim, Juni 2015



## Sammendrag

---

I bygningsindustrien blir det satt stadig strengere krav vedrørende energibruk og energieffektivitet. Samtidig er et godt inneklima viktig. Hybride mixed-mode løsninger er de siste årene lansert som et alternativ til mekanisk ventilasjon. Mesterfjellet skole er den nyeste ferdigstillingen i Larvik kommunes satsing på hybrid mixed-mode ventilasjon. Ved hjelp av en kontrollstrategi kombineres her vinduslufting med mekanisk ventilasjon. Skolen er brukt som case-studie i denne oppgaven og inngår som del av en vurdering av mixed-mode ventilasjonsløsninger i moderne bygninger.

Det er blitt gjennomført målinger og simuleringer for evaluering av inneklima og energibruk. Målinger og simuleringer i et av skolens trinnrom tilsa at det var avvik i akseptabelt inneklima. Dette utartet seg i form av CO<sub>2</sub>-verdier over anbefalt grense på 1000 ppm, store deler av skoledagen. I tillegg gjorde kald tilluft fra vinduene med lufthastighet over anbefalt nivå at elevene med arbeidsstasjoner ved vindusrekken opplevde avvik i termisk komfort. Simuleringer viser dessuten at operativ temperatur i løp av året overstiger anbefalte maksimalverdier i flere timer enn hva som er akseptabelt. Simuleringer av energiforbruk viser mulighet for energibesparelse på 15,7 %, ved å benytte mixed-mode ventilasjon i stedet for mekanisk balansert ventilasjon. Samtidig viser simuleringen viktigheten av optimaliseringer av mixed-mode anlegget etter det er satt i drift. Et godt SD-anlegg er derfor nødvendig.

Utendørs forurensning kan dessuten skape avvik i akseptabelt inneklima i mixed-mode bygninger. Problematikken i forbindelse med ubehag for pollenallergikere diskuteres i oppgaven. På beskrevet grunnlag menes det at potensielle gevinster ved bruk av mixed-mode ventilasjon med automatisk styrt vinduslufting ikke veier opp for potensielle ulemper. Vinduslufting som et tiltak for å forbedre termisk komfort er positivt, men dette bør kontrolleres av brukerne. I skoler og kontorbygninger kan avvik i akseptabelt inneklima i tillegg til å få store helsemessige konsekvenser, få store økonomiske konsekvenser i form av nedsatt produktivitet. Sykefravær og offentlige helseutgifter, samt dårligere læring, medfører dessuten negative samfunnsøkonomiske konsekvenser. Hvis man skal benytte mixed-mode ventilasjonsanlegg med automatisk vinduslufting, må det undersøkes og komme frem til designstandarder på hvordan man kan unngå trekk, samt hvordan redusere eksponering av pollen og andre luftforurensninger. Optimal plassering av vinduer for å unngå utendørs støy er også en forutsetning.



## Abstract

---

There are increasingly stringent requirements regarding energy use and energy efficiency in the building industry. At the same time, a good indoor climate is of high importance. Hybrid mixed-mode solutions are in recent years introduced as an alternative to mechanical ventilation. Mesterfjellet School is the latest commissioning in Larvik municipality's commitment to hybrid mixed-mode ventilation. The school combines by means of a control strategy ventilation through windows with mechanical ventilation. The school is used as case study in this thesis.

It has been carried out measurements and simulations in order to evaluate the indoor climate and energy consumption. Measurements and simulations in one of the school's classrooms indicated that there were discrepancies in acceptable indoor climate. This degenerated in terms of CO<sub>2</sub>- levels above recommended limit of 1000 ppm, large parts of the school day. Also, cold supply air from the windows of air velocity above the recommended level made pupils with workstation by the window row experience thermal discomfort. Furthermore, simulations show that the operative temperature exceeds the recommended maximum limit for more hours than what is acceptable. Simulations of energy consumption show potential for energy savings of 15,7 %, using mixed-mode ventilation instead of mechanically balanced ventilation. At the same time, the simulations show the importance of optimizations of mixed-mode plant after it is put into operation. It is therefore necessary with a good central control and monitoring system

Outdoor pollution may also cause deviations in acceptable indoor air quality in mixed-mode buildings. Issues associated with discomfort for users with pollen allergy are discussed in this thesis. On the basis described it is meant that the potential benefits from the use of mixed-mode ventilation system with automatically controlled window ventilation does not outweigh the potential drawbacks. Ventilation through windows as a measure to improve thermal comfort is positive, but the users should control this. In schools and office buildings deviations in acceptable indoor climate can in addition to cause major health consequences, cause economical consequences in terms of reduction in productivity. Sick leave, public health cost and impaired learning results lead to negative economical consequences for the society. If one is to use mixed-mode ventilation with automatic window ventilation, design standards on how to avoid draft, as well as how to reduce exposure of pollen and other air pollutants, must be investigated and implemented. Optimal positioning of windows to avoid outdoor noise is also a prerequisite.



# Innholdsfortegnelse

---

<b>FORORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMENDRAG</b> .....	<b>III</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>V</b>
<b>FIGURER</b> .....	<b>XI</b>
<b>TABELLER</b> .....	<b>XIII</b>
<b>FORKORTELSER</b> .....	<b>XV</b>
<b>TERMINOLOGI</b> .....	<b>XVI</b>
<b>NOMENKLATUR</b> .....	<b>XVIII</b>
<b>1 INTRODUKSJON</b> .....	<b>1</b>
<b>2 VENTILASJONSFORMER</b> .....	<b>3</b>
2.1 NATURLIG VENTILASJON .....	3
2.2 MEKANISK VENTILASJON.....	4
2.3 HYBRID VENTILASJON .....	5
2.4 MIXED-MODE VENTILASJON .....	6
2.4.1 <i>Mixed-mode designstrategier</i> .....	6
2.4.2 <i>System kontroll</i> .....	8
2.4.3 <i>Potensielle fordeler og ulemper med mixed-mode bygninger</i> .....	9
2.5 REFERANSE BYGNINGER MED MIXED-MODE VENTILASJON .....	10
2.5.1 <i>Brunla ungdomsskole</i> .....	10
2.5.2 <i>Solstad barnehage</i> .....	10
2.6 VINDUSLUFTING.....	11
2.6.1 <i>Ventilasjonsrater gjennom vindu</i> .....	13
2.7 LUFTDISTRIBUSJON I ROM.....	14
2.7.1 <i>Omrøringsventilasjon</i> .....	14
2.7.2 <i>Fortrengningsventilasjon</i> .....	14
2.7.3 <i>Aktiv fortrengningsventilasjon</i> .....	15
2.7.4 <i>Stempelventilasjon</i> .....	15
<b>3 INNEKLIMA</b> .....	<b>17</b>
3.1 TERMISK KOMFORT .....	17
3.1.1 <i>Temperatur</i> .....	18
3.1.2 <i>Lufthastighet og turbulens</i> .....	21



3.1.3	<i>Luftfuktighet</i> .....	24
3.1.4	<i>Praktisk komfortkontroll og temperaturstyring</i> .....	24
3.2	ATMOSFÆRISK MILJØ.....	25
3.2.1	<i>CO<sub>2</sub>-nivå</i> .....	25
3.2.2	<i>Utendørs forurensning</i> .....	25
3.2.3	<i>Luftmengder</i> .....	26
3.2.4	<i>Hovedfaktorer for et godt atmosfærisk innemiljø</i> .....	26
3.3	KONSEKVENSER AV ET DÅRLIG INNEKLIMA.....	27
3.3.1	<i>Helseeffekter</i> .....	27
3.3.2	<i>Produktivitet</i> .....	28
3.4	INNEKLIMA OG MIXED-MODE BYGNINGER.....	29
3.5	DISKUSJON.....	30
<b>4</b>	<b>MESTERFJELLET SKOLE</b> .....	<b>33</b>
4.1	BYGNINGSTEKNISKE PARAMETERE.....	34
4.2	OPPVARMING.....	34
4.3	ENERGI.....	34
4.4	VENTILASJON.....	35
4.4.1	<i>Mekanisk ventilasjonsanlegg</i> .....	36
4.4.2	<i>Vinduslufting</i> .....	36
4.5	STYRING OG KONTROLLSTRATEGI.....	37
4.5.1	<i>Kalendermoduler og driftsformer</i> .....	37
4.5.2	<i>Vinter- og sommermodus</i> .....	38
4.5.3	<i>Sonestyring</i> .....	39
4.5.4	<i>Styringssystem</i> .....	39
4.6	INVESTERINGSKOSTNADER.....	40
<b>5</b>	<b>MÅLINGER</b> .....	<b>41</b>
5.1	FORBEREDELSE.....	41
5.2	MÅLEUTSTYR OG PLASSERING.....	41
5.2.1	<i>CO<sub>2</sub>-målinger</i> .....	41
5.2.2	<i>Temperaturmålinger</i> .....	44
5.2.3	<i>Målinger av lufthastighet</i> .....	45
5.2.4	<i>Tilstedeværelse målinger</i> .....	46
5.2.5	<i>Målefeil</i> .....	46
5.3	TRINNROM.....	47
5.4	TIMEPLAN.....	48

5.5	SD-ANLEGG.....	48
<b>6</b>	<b>RESULTAT MÅLINGER.....</b>	<b>51</b>
6.1	VÆRDATA.....	51
6.2	TILSTEDEVÆRELSE .....	53
6.3	CO <sub>2</sub> -NIVÅ .....	53
6.4	TEMPERATUR.....	55
6.5	LUFTHASTIGHET .....	58
6.6	RELATIV FUKTIGHET.....	60
6.7	NATURLIG- OG MEKANISK VENTILASJON.....	60
6.8	DRIFTSFORM OG ÅRSTIDSDRIFTMODUS .....	63
6.9	BRUKERTILBAKEMELDINGER.....	65
<b>7</b>	<b>SIMULERINGER.....</b>	<b>67</b>
7.1	SIMULERINGSMODELLER.....	67
7.1.1	<i>Hele skolen.....</i>	67
7.1.2	<i>Trinnrom 24A.....</i>	68
7.2	INPUT DATA.....	68
7.2.1	<i>Værdata .....</i>	68
7.2.2	<i>Bygningstekniske parametere.....</i>	69
7.2.3	<i>Intern laster .....</i>	69
7.2.4	<i>Tilstedeværelse og driftstid.....</i>	70
7.2.5	<i>Oppvarming og kjøling .....</i>	71
7.3	KONTROLLSTRATEGIER.....	72
7.3.1	<i>Kontrollstrategi vinduer.....</i>	72
7.3.2	<i>Kontrollstrategi mekanisk ventilasjon.....</i>	74
7.4	MIXED-MODE VENTILASJONSSCENARIO .....	77
7.5	MEKANISK VENTILASJONSSCENARIO .....	78
<b>8</b>	<b>RESULTAT SIMULERINGER.....</b>	<b>79</b>
8.1	ENERGISIMULERINGER .....	79
8.2	INNEKLIMASIMULERINGER .....	82
8.2.1	<i>Sommersimulering.....</i>	82
8.2.2	<i>Vintersimulering.....</i>	91
<b>9</b>	<b>VALIDERING AV SIMULERINGSMODELLER.....</b>	<b>95</b>
9.1	VALIDERING MOT ENERGIFORBRUK.....	95
9.2	VALIDERING MOT DAGSMÅLINGER.....	96
9.3	DISKUSJON .....	100

<b>10</b>	<b>DISKUSJON</b> .....	<b>103</b>
10.1	MÅLINGER OG RESULTAT .....	103
10.1.1	<i>Atmosfærisk miljø</i> .....	103
10.1.2	<i>Termisk miljø</i> .....	104
10.2	SIMULERINGER OG RESULTAT.....	105
10.2.1	<i>Energisimuleringer</i> .....	105
10.2.2	<i>Inneklimasimuleringer</i> .....	106
10.3	MIXED MODE VENTILASJON I MODERNE BYGNINGER .....	108
<b>11</b>	<b>KONKLUSJON</b> .....	<b>111</b>
11.1	FORSLAG TIL VIDERE ARBEID .....	113
<b>12</b>	<b>KILDELISTE</b> .....	<b>115</b>
	<b>VEDLEGG 1: PLANTEGNING MESTERFJELLET SKOLE</b> .....	<b>I</b>
	<b>VEDLEGG 2: SONEOVERSIKT</b> .....	<b>VII</b>
	<b>VEDLEGG 3: VINDUSSKJEMA</b> .....	<b>XI</b>
	<b>VEDLEGG 4: TEKNISK UNDERLAG MEKANISK VENTILASJONSANLEGG</b> .....	<b>XVI</b>
	<b>VEDLEGG 5: DATABLAD FOR SENSOR</b> .....	<b>XVIII</b>
	<b>VEDLEGG 6: RISIKOVURDERING AV FELTMÅLINGER</b> .....	<b>XIX</b>
	<b>VEDLEGG 7: CO<sub>2</sub>-MÅLERES PLASSERING</b> .....	<b>XXI</b>
	<b>VEDLEGG 8: TEMPERATURLOGGERE DAGSMÅLING PLASSERING</b> .....	<b>XXII</b>
	<b>VEDLEGG 9: TEMPERATURLOGGERE PERIODEMÅLINGER PLASSERING</b> .....	<b>XXIII</b>
	<b>VEDLEGG 10: MÅLEPUNKT LUFTHASTIGHET</b> .....	<b>XXIV</b>
	<b>VEDLEGG 11: CO<sub>2</sub>-MÅLINGER</b> .....	<b>XXV</b>
	<b>VEDLEGG 12: TEMPERATUR PERIODEMÅLINGER</b> .....	<b>XXVI</b>
	<b>VEDLEGG 13: LUFTHASTIGHETSMÅLINGER</b> .....	<b>XXVII</b>

## Figurer

---

FIGUR 2.1: NATURLIGE VENTILASJONSSTRATEGIER.....	3
FIGUR 2.2: PARALLELLSYSTEM.....	6
FIGUR 2.3: OMKOBLINGSSYSTEM .....	7
FIGUR 2.4: SONESYSTEM.....	7
FIGUR 2.5: PRINSIPPSKISSE OMRØRINGSVENTILASJON.....	14
FIGUR 2.6: PRINSIPPSKISSE FORTRENGNINGSVENTILASJON .....	15
FIGUR 3.1: OPTIMAL OPERATIV TEMPERATUR. AVHENGIG AV TEMPERATUR OG BEKLEDNING .....	20
FIGUR 3.2: KOMBINASJONEN AV MIDDELLUFTHASTIGHETEN, LUFTEMPERATUR OG TURBULENSINTENSITETEN SOM GIR EN PROSENTANDEL MISFORNØYDE PÅ 15 % .....	23
FIGUR 4.1: MESTERFJELLET SKOLE.....	33
FIGUR 4.2: VINDU MED INTEGRERT KJEDEMOTOR, MED MAKSIMAL ÅPNINGSGRAD.....	37
FIGUR 5.1: TEST CO <sub>2</sub> -MÅLINGER INNENDØRS .....	42
FIGUR 5.2: TEST CO <sub>2</sub> -MÅLINGER UTE .....	42
FIGUR 5.3: VARIASJON AV MÅLT VERDI AV DE FORSKJELLIGE CO <sub>2</sub> -MÅLERNE VED MÅLING UTE =1 OG MÅLING INNE =2 .....	43
FIGUR 5.4: TEMPERATURLOGGERE BRUKT I DAGSMÅLINGER, FESTET I TRÅD I ULIKE HØYDER .....	45
FIGUR 5.5: SENSOR Plassering i TRINNROM 24A.....	49
FIGUR 6.1: UTETEMPERATUR I MÅLEPERIODEN 13 MARS OG 10 APRIL.....	51
FIGUR 6.2: VINDHASTIGHET I MÅLEPERIODEN 13 MARS OG 10 APRIL.....	52
FIGUR 6.3: VINDRETNING I MÅLEPERIODEN 13 MARS OG 10 APRIL .....	52
FIGUR 6.4: ANTALL PERSONER TILSTEDE I TRINNROM I MÅLEPERIODEN 13 MARS OG 10 APRIL .....	53
FIGUR 6.5: CO <sub>2</sub> -MÅLINGER 13 MARS.....	54
FIGUR 6.6: CO <sub>2</sub> -MÅLINGER 10 APRIL.....	54
FIGUR 6.7: TEMPERATURMÅLINGER 13 MARS.....	55
FIGUR 6.8: TEMPERATURMÅLINGER 10 APRIL .....	56
FIGUR 6.9: TEMPERATURMÅLINGER 13 MARS, TEMPERATURLOGGERE HENGT I TRÅD I ULIKE HØYDER OVER GULV .....	57
FIGUR 6.10: TEMPERATURMÅLINGER 10 APRIL, TEMPERATURLOGGERE HENGT I TRÅD I ULIKE HØYDER OVER GULV .....	57
FIGUR 6.11: RELATIV FUKTIGHET I MÅLEPERIODEN 13 MARS OG 10 APRIL .....	60
FIGUR 6.12: RELATIV ÅPNINGSGRAD FOR VINDU OG RELATIVT PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON PÅ Y-AKSE TIL VENSTRE. CO <sub>2</sub> -NIVÅ MÅLT AV SENSOR PÅ Y-AKSE TIL HØYRE. I GITT TIDSROM DEN 13 MARS .....	61
FIGUR 6.13: RELATIV ÅPNINGSGRAD FOR VINDU OG RELATIVT PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON PÅ Y-AKSE TIL VENSTRE. CO <sub>2</sub> -NIVÅ MÅLT AV SENSOR PÅ Y-AKSE TIL HØYRE. I GITT TIDSROM DEN 10 APRIL.....	61
FIGUR 6.14: RELATIV ÅPNINGSGRAD FOR VINDU OG RELATIVT PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON PÅ Y-AKSE TIL VENSTRE. TEMPERATUR MÅLT AV SENSOR PÅ Y-AKSE TIL HØYRE. I GITT TIDSROM DEN 13 MARS .....	62
FIGUR 6.15: RELATIV ÅPNINGSGRAD FOR VINDU OG RELATIVT PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON PÅ Y-AKSE TIL VENSTRE. TEMPERATUR MÅLT AV SENSOR PÅ Y-AKSE TIL HØYRE. I GITT TIDSROM DEN 10 APRIL.....	63

FIGUR 7.1: MODELL AV HELE SKOLEN .....	68
FIGUR 7.2: MODELL AV TRINNROM 24-A.....	68
FIGUR 7.3: TIDSPLAN BRUKERBELASTNING UNDERVISNINGSROM.....	70
FIGUR 7.4: TIDSPLAN FOR BRUKERBELASTNING I ANDRE ROM, SAMT DRIFTSTID FOR BELYSNING OG UTSTYR.....	71
FIGUR 7.5: DRIFTSTID VENTILASJON .....	71
FIGUR 7.6: KONTROLLSTRATEGI FOR VINDUSLUFTING I IDA ICE .....	73
FIGUR 7.7: KONTROLLSTRATEGI FOR MEKANISK VENTILASJON I IDA ICE .....	75
FIGUR 7.8: SAMSPILL MELLOM KONTROLLSTRATEGI FOR VINDUSLUFTING OG MEKANISK VENTILASJON .....	77
FIGUR 8.1: SIMULERT MÅNEDLIG LEVERT ENERGI VED DE ULIKE VENTILASJONSSCENARIENE.....	82
FIGUR 8.2: CO <sub>2</sub> -NIVÅ OG RELATIV FUKTIGHET I TRINNROM VED SIMULERING MED SYNTETISK SOMMERKLIMA .....	83
FIGUR 8.3: TEMPERATUR I TRINNROM VED SIMULERING MED SYNTETISK SOMMERKLIMA .....	84
FIGUR 8.4: RELATIV VINDUSÅPNING OG RELATIV PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON VED SIMULERING MED SYNTETISK SOMMERKLIMA .....	84
FIGUR 8.5: VARIGHETSKURVE FOR SIMULERT OPERATIV TEMPERATUR I TRINNROM 24-A, MED ULIKE SOMMERFERIE PERIODER .....	85
FIGUR 8.6: VARIGHETSKURVE FOR SIMULERT OPERATIV TEMPERATUR I TRINNROM 24-A, MED ULIKE TILTAK IMPLEMENTERT.....	88
FIGUR 8.7: VARIGHETSKURVE FOR SIMULERT OPERATIV TEMPERATUR I TRINNROM 24-A, MED ULIKE SCENARIO MED MEKANISK BALANSERT VENTILASJON .....	90
FIGUR 8.8: CO <sub>2</sub> -NIVÅ OG RELATIV FUKTIGHET I TRINNROM VED SIMULERING MED SYNTETISK VINTERKLIMA .....	91
FIGUR 8.9: TEMPERATUR I TRINNROM VED SIMULERING MED SYNTETISK VINTERKLIMA .....	92
FIGUR 8.10: RELATIV VINDUSÅPNING OG RELATIV PÅDRAG PÅ MEKANISK VENTILASJON VED SIMULERING MED SYNTETISK VINTERKLIMA .....	93
FIGUR 9.1: TILSTEDEVÆRELSE, MÅLT ANTALL PERSONER I TRINNROM SAMMENLIGNET MED SIMULERT UT FRA BRUKERTETTHET OG DRIFTSTID FOR UNDERVISNINGSROM .....	96
FIGUR 9.2: CO <sub>2</sub> -NIVÅ I TRINNROMMET, MÅLINGER SAMMENLIGNET MED SIMULERINGER.....	97
FIGUR 9.3: TEMPERATUR I TRINNROMMET, MÅLINGER SAMMENLIGNET MED SIMULERINGER.....	98
FIGUR 9.4: RELATIV VINDUSÅPNING OG MEKANISK VENTILASJONSPÅDRAG, MÅLINGER SAMMENLIGNET MED SIMULERING...99	99

## Tabeller

---

TABELL 2.1: POTENSIELLE FORDELER OG ULEMPER VED MIXED-MODE BYGNINGER.....	9
TABELL 2.2: SAMMENLIGNING AV ULIKE VINDUSTYPER.....	12
TABELL 3.1: ANBEFALTE VERDIER FOR OPERATIV TEMPERATUR UT FRA AKTIVITET .....	20
TABELL 3.2: ANBEFALTE VERDIER FOR OPERATIV TEMPERATUR PÅ HENHOLDSVIS SOMMER- OG VINTERTID. ....	21
TABELL 3.3: ANBEFALTE VERDIER FOR MAKSIMAL LUFTHASTIGHET PÅ HENHOLDSVIS SOMMER- OG VINTERTID. ....	22
TABELL 3.4: ANBEFALT INTERVALL FOR RELATIV FUKTIGHET PÅ HENHOLDSVIS SOMMER- OG VINTERSTID. ....	24
TABELL 3.5: GJENNOMSNIITTLIG VARIGHET AV ULIKE POLLENSESONGER .....	26
TABELL 3.6: HOVEDFAKTORER FOR BESTEMMELSE AV INNENDØRS LUFTKVALITET.....	27
TABELL 4.1: BYGNINGSTEKNISKE PARAMETERE FOR MESTERFJELLET SKOLE .....	34
TABELL 4.2: MÅLT ENERGIFORBRUK MESTERFJELLET SKOLE .....	35
TABELL 4.3: NØKKEINFO FRA DET MEKANISKE VENTILASJONSANLEGGET .....	36
TABELL 5.1: NØKKEINFO OM TRINNROM.....	47
TABELL 5.2: TIMEPLAN FOR 6A, FREDAG 13 MARS.....	48
TABELL 6.1: LUFTHASTIGHETER MÅLT DEN 10 APRIL .....	59
TABELL 6.2: SYSTEMETS DRIFTSFORM I MÅLEPERIODEN DEN 13 MARS OG 10 APRIL.....	64
TABELL 8.1: LEVERT ENERGI OG EFFEKTBEHOV VED ÅRSSIMULERING AV MIXED-MODE VENTILASJON .....	79
TABELL 8.2: LEVERT ENERGI OG EFFEKTBEHOV VED ÅRSSIMULERING AV MEKANISK BALANSERT VENTILASJON.....	80
TABELL 8.3: LEVERT ENERGI OG EFFEKTBEHOV VED ÅRSSIMULERING AV MIXED-MODE VENTILASJON OPTIMALISERT .....	81
TABELL 8.4: BESKRIVELSE AV OPTIMERINGSTILTAK .....	87
TABELL 8.5: BESKRIVELSE AV MEKANISK BALANSERT VENTILASJON SCENARIO FOR SOMMERKOMFORT SIMULERINGER.....	89
TABELL 9.1: SAMMENLIGNING AV MÅLING OG SIMULERING AV LEVERT ENERGI VED MESTERFJELLET SKOLE.....	95
TABELL 10.1: SAMMENDRAG AV FORDELER OG ULEMPER VED MIXED-MODE VENTILASJON .....	110





## Forkortelser

---

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
BIM	Building Information Modeling, metode for å digitalisere informasjon om et byggeprosjekt
BRA	Bruksareal, summen av arealet i et bygg som ligger innenfor ytterveggene
CAV	Constant Air Volume, styringsprinsipp ved ventilasjon med konstante luftmengder
CEN	European Committee for Standardization
CFD	Computational Fluid Dynamics, fellesbetegnelse for beregnings- og analyseverktøy for simulering av gass- og væsketransport (fluider)
CO <sub>2</sub>	Karbondioksid
COP	Coefficient of Performance, effektfaktor
DALY	Disability-adjusted life years, tidsbasert mål som kombinerer leveår tapt på grunn av tidlig død og tapte leveår grunnet livstid i tilstand av ikke full helse
GBD	Global Burden of Disease, måler sykdomsbyrde ved hjelp av uførhetsjusterte leveår DALY
HAP	Household Air Pollution, luftforurensing fra hushold
IFC	Industry Foundation Classes, utvekslingsformatet for BIM
ISO	International Organization for Standardization
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied
PPM	Parts per million, enhet for angivelse av konsentrasjon
SBS	Sick Building Syndrome, hus med inneklimate og innemiljø problemer. Felles for slike bygg er at det er stor hyppighet av sykdommer som kan relateres til innemiljøet hos brukerne.
SFP	Spesifikk vifteeffekt, et mål på energieffektiviteten til ventilasjonsanlegget. Angir hvor mye elektrisk vifteenergi som brukes for å distribuere luft i anlegget i forhold til mengde luft transportert
VAV	Variable Air Volume, styringsprinsipp ved ventilasjon med variable luftmengder

---

## Terminologi

---

Atmosfærisk miljø	Beskrives delvis av luftens kjemiske, fysiske og mikrobiologiske sammensetning og delvis av folks oppfattelse av luften
Bekledningens isolerende effekt (clo)	Isolasjonsverdien mellom hudens overflate og bekledningens utvendige overflate angis i $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ eller den relative enheten clo. 1 clo tilsvarer $0,155 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Dette er nivået som vil holde en stillesittende person komfortabel ved operativ temperatur, relativ fuktighet og lufthastighet på henholdsvis $21 \text{ }^\circ\text{C}$ , 50 % og $0,1 \text{ m/s}$
Byggteknisk forskrift (TEK)	Forskrift til den norske plan- og bygningsloven
$C_p$ - verdier	Vindtrykkskoeffisient verdier
IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)	Simuleringsverktøy for detaljere og dynamiske simuleringer av energibruk, termisk- og atmosfærisk inneklima i bygninger
Inneklima	Definert til å omfatte termisk-, atmosfærisk-, akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø
Innemiljø	Defineres som inneklima, men omfatter i tillegg estetisk- og psykososialt miljø
KNX- system	Åpent bussbasert styringssystem som er godkjent som standard i Europa, USA og Kina, i tillegg til internasjonal standard
Konvensjonell ventilasjon	I denne oppgaven refererer det til mekanisk ventilasjon
Levert energi	Sum av energi, uttrykt per energivare, levert over bygningens systemgrenser for å dekke bygningens samlede energibehov inkludert systemtap som ikke gjenvinnes
Luftkvalitet	Luftens konsentrasjon av ulike forurensningskomponenter
Metabolisme (met)	Energiomsetning i kroppen som genererer varme, angis i $\text{W}$ per $\text{m}^2$ kroppsoverflate eller den relative enheten met.

	1 met tilsvarer 58,14 W per m <sup>2</sup> kroppsoverflate.
NV Advanced™	WindowMaster sitt styringssystem for hybrid ventilasjon
Oppholdssone	Volumet i en sone fra gulv til en høyde på 1,8 meter og som samtidig minst er i avstand 0,6 meter fra sonens innervegger
Relativ luftfuktighet	Mål på hvor mye vanndamp det er i luften, angis i prosent i forhold til hvor mye vanndamp luften maksimalt kan holde ved den aktuelle temperaturen.
SD- anlegg	Sentralt driftskontrollanlegg
Temperatur	Dersom ikke annet er oppgitt er det lufttemperaturen det henvises til ved bruk av dette begrepet i denne oppgaven
Termisk komfort	Termisk komfort er definert som sinnstilstanden hvor en uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelsene. Den påvirkes av følgende miljøfaktorer; luftens tørrkuletemperatur, termiskstråling i rommet, luftens hastighet og turbulens samt luftfuktighet. Samt personfaktorene aktivitetsnivå, bekledningsnivå og oppholdstid
Termisk nøytralitet	Innebærer at kroppen ikke har noe generelt ønske om høyere eller lavere omgivelsestemperatur
Trekk	Definert som lokal avkjøling. Kan oppstå ved en kombinasjon av relative luftbevegelser, temperatur og fuktighet eller ved stor strålingsasymmetri
Turbulent diffusjon	Transport av masse, varme eller moment i et system på grunn av kaotiske tidsavhengige bevegelser
Varmegjennomgangs koeffisient (U-verdi)	Angir den mengde varme som per tidsenhet passerer en kvadratmeter av konstruksjonen ved en temperaturforskjell på en kelvin mellom konstruksjonens to sider. Angis i W per m <sup>2</sup> K

## Nomenklatur

---

Symbol	Forklaring	Benevning
$t_{op}$	Optimal operativ temperatur	°C
$t_a$	Lufttemperatur	°C
$t_r$	Gjennomsnittlig strålingstemperatur	°C
$t_u$	Turbulensintensitet	%
$S_D$	Standardavvik av lufthastighet	m/s
$v_a$	Lokal gjennomsnittlig lufthastighet	m/s
$PD$	Prosentandel misfornøyde	%
$\bar{v}$	Middellufthastighet	m/s
$U(h)$	Vindhastighet i høyde (h)	m/s
$U_m$	Vindhastighet målt i åpent landskap ved værstasjon	m/s
$h$	Høyde fra bakkenivå	m
$h_m$	Høyde på referansemåling	m
$k$	Terrengkonstant	-
$a$	Terrengkonstant	-

---

# 1 Introduksjon

---

I dag utgjør energibruk til drift av bygninger rundt 40 % av Norges totale landbaserte energibruk (Novakovic et al., 2007). De siste årene har en opplevd et stadig strengere regelverk med hensyn til energibruk og energieffektivitet i bygninger, en utvikling man regner med kommer til å fortsette mot fremtidens nær null-energibygninger. Et tiltak for energibesparelse kan være å benytte seg av naturlige drivkrefter i forbindelse med ventilering for å spare vifteenergi. Samtidig har SINTEF Byggforsk gjort beregninger som tilsier at varmetap fra ventilasjon utgjør opp mot 5 % av energibruken i Norge (Enova, 2011). Viktigheten av høyeffektiv varmegjenvinning av ventilasjonsvarme er derfor stor. Inneklima i bygninger er også en viktig faktor, både med tanke på helse og komfort, men også i forhold til produktivitet. Dårlig inneklima kan føre til nedsatt arbeidsevne, ubehag, mistriivsel, forverring av eksisterende sykdom og i noen tilfeller utløsning av sykdom. Barn er en spesielt risikoutsatt gruppe med hensyn til plager relatert til dårlig inneklima (Folkehelseinstituttet, 2015). Barn i skolealder tilbringer store deler av dagen inne på skolen. I følge Opplæringsloven (1998) har elever i grunnskole og videregående skole rett til et godt fysisk miljø som fremmer helse, trivsel og læring. Myndighetene har de siste årene hatt fokus på inneklima i norske skoler, og det er sett behov for forbedring.

Hybride mixed-mode løsninger er de siste årene lansert som et alternativ til mekanisk ventilasjon. Slike løsninger kombinerer selvstendige naturlig ventilasjonssystem ofte i form av åpningsbare vinduer, med mekanisk ventilasjonsanlegg. En kan med slike løsninger tilrettelegge for naturlig ventilasjon i perioder der utetemperaturen er høy. Samtidig kan en i perioder med lav utetemperatur gjøre nytte av mekanisk ventilasjon med høyeffektiv varmegjenvinning. Moderne bygninger har dessuten kjølebehov store deler av året, grunnet strenge krav til tett bygningskropp. Det kreves gjerne store luftmengder for å fjerne overskuddsvarmen, hvilket øker forbruket av strøm til drift av vifter. Ved å utnytte naturlig ventilasjon for fjerning av overskuddsvarme, kan man redusere strømforbruk til vifter, i tillegg til at det er potensial for neddimensjonering av det mekaniske ventilasjonsanlegget.

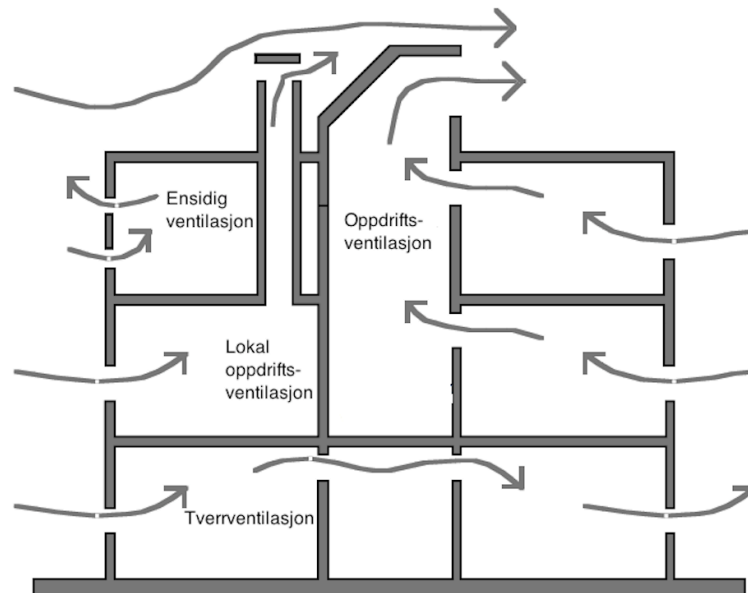
Målet med denne oppgaven er evaluere hybride mixed-mode ventilasjonsløsninger med hensyn på energibruk og inneklime. Mesterfjellet skole, som er den nyeste ferdigstillingen i Larvik kommunes satsing på hybrid ventilasjon, er brukt som case. I Kapittel 4 gis det beskrivelse av skolen, både med hensyn på bygningsfysiske parametere og teknisk anlegg. Det er blitt utført målinger for evaluering av inneklime i et av skolens trinnrom. Beskrivelse av trinnrom og bruksmønster, samt metode og resultater for målingene er beskrevet i Kapittel 5 og 6. Simuleringsprogrammet IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE) er blitt brukt for evaluering av bygningens energiforbruk og inneklime. Fremgangsmåte blir beskrevet i Kapittel 7, mens resultater presenteres i Kapittel 8. Måledata er i Kapittel 9 brukt for å vurdere simuleringenes grad av validitet. I tillegg til evalueringen av Mesterfjellet skole er det i Kapittel 2 gjennomført et teori-/ litteraturstudie av ventilasjonsformer og da spesielt mixed-mode. Evalueringsparametere samt betydning av inneklime er undersøkt og drøftet nærmere i Kapittel 3. I disse kapitelene studeres også inneklimeet i to andre mixed-mode bygninger i Larvik kommune. I Kapittel 10 drøftes resultat og erfaringer fra målinger og simuleringer ved Mesterfjellet skole. I tillegg drøftes mixed-mode som ventilasjonskonsept i moderne bygninger. I Kapittel 11 konkluderes det, samt presenteres forslag til videre arbeid.

## 2 Ventilasjonsformer

---

### 2.1 Naturlig ventilasjon

Naturlig ventilasjon er et ventilasjonsprinsipp som baserer seg på naturlige drivkrefter forårsaket av termiske oppdriftskrefter og vindtrykk. De naturlige drivkreftene kan brukes for ulike basisstrategier; ensidig ventilasjon, tverrventilasjon og oppdriftsventilasjon. I praksis brukes kombinasjoner av disse strategiene for å best utnytte de individuelle fordelene hver enkelt strategi har (Santamouris og Wouters, 2006).



Figur 2.1: Naturlige ventilasjonsstrategier (Emmerich et al., 2001)

Ensidig ventilasjon har man i et rom der det kun er åpning i den ene av rommets yttervegger. En kombinasjon av vind og oppdriftskrefter skaper luftstrømning gjennom åpningen. Vindkreftene kan variere over åpningen og skape en pumpeeffekt. Med høyere innetemperatur enn utetemperatur vil oppdriftskreftene sørge for at kald luft strømmer inn i nedre del, mens varm luft strømmer ut av øvre del av åpningen (Santamouris og Wouters, 2006).

I tverrventilasjon utnyttes det at vindkreftene skaper overtrykk og undertrykk på fasader som er henholdsvis vindutsatte og i le. Luftstrømningen drives dermed av



trykkforskjellene som genereres på tvers av bygningssnittet. Et problem med denne strategien er at den er avhengig av vindens retning og hastighet. Når vindretningen forandres vil vindtrykkoeffisientene også forandre seg. Dette kan føre til at drivende vindtrykk faller til relativt lave verdier selv med vindfulle forhold, hvilket gjør at den naturlige ventilasjonsraten blir liten. Når vindhastigheten avtar vil drivende vindtrykk avta uavhengig av vindretning. Variasjonen i drivende vindtrykk gjør at det kreves spesielle tiltak som selvregulerende ventiler for trykkvariasjon, vindtårn eller et bygningsdesign som gjør bygget mindre følsomt for vindvariasjoner (Santamouris og Wouters, 2006).

Oppdriftsventilasjon baserer seg på den såkalte skorsteinseffekten. Termiske oppdriftskrefter får varm luft til å stige og strømme ut av øvre del, mens kald luft vil strømme inn i nedre del av bygningen for å erstatte den. I perioder der utetemperaturen nærmer seg innetemperaturen, blir det drivende oppdriftstrykket relativt lite i forhold til drivende vindtrykk i de fleste bygninger. I praksis har konfigurasjoner basert på denne strategien ofte oppnådd akseptable ventilasjonsrater grunnet vindkreftene som også driver strømmen i oppdriftsventilasjonssystemer, og dermed kompliserer systemets adferd. Da ingen vind er lite sannsynlig og kortvarige på de fleste steder, er det sjeldent at et system utelukkende drevet av oppdriftskrefter forekommer i praksis. (Santamouris og Wouters, 2006).

## **2.2 Mekanisk ventilasjon**

I de siste 50 år har ventilasjonsanlegg med mekaniske drivkrefter vært det mest vanlige for kommunale bygg og næringsbygg. I slike anlegg kan en tillate seg mindre kanaldimensjoner og mer kompliserte kanalføringer. Dette fører til at man ofte må dimensjonere tilluft- og avtrekksvifte til å kunne yte mer enn 1000 Pa for å sikre nødvendige luftmengder, som igjen resulterer i høyere elektrisitetsforbruk, uønsket oppvarming av tilluft og støy. Vifteeffektens andel av bygningens totale energiforbruk kan ligge opp i mot 15 %. I senere tid har lavtrykksanlegg med lav spesifikk vifteeffekt (SFP) blitt mer etterspurt. Dette reduserer de nevnte problemene, men krever igjen en mer integrert byggeprosess. Der man går aktivt inn for å velge kanalføringer, dimensjoner samt komponenter med lave trykktap (Schild et al., 2003).

Den enkleste form for mekaniske ventilasjonsanlegg er avtrekksanlegg. Her tilføres luften direkte utenfra gjennom spalteventiler, mens en avtrekksvifte trekker den brukte luften ut gjennom kanaler. I balansert mekanisk ventilasjon har en både tillufts- og avtrekksanlegg. Frisk luft tilføres her rommene etter filtrering og oppvarming til tilfredsstillende tilluftstemperatur. Kapasitetsregulering av anleggene skjer enten ved å variere temperaturen på tilluften, med konstant luftmengde (CAV-anlegg). Eller ved å holde tilluftstemperaturen konstant, mens luftmengden varieres (VAV-anlegg) (Stensaas og Hovland, 2001).

### 2.3 Hybrid ventilasjon

Hybride ventilasjonsanlegg har også vifter, men de naturlige drivkreftene utnyttes her bevisst for å generere minst mulig vifteeffekt. En kombinerer i slike anlegg de ulike fordelene til naturlig- og mekanisk ventilasjon for å skape et mest mulig optimalt system. Summen av de naturlige og de mekaniske drivkreftene skal hele tiden være tilstrekkelige for å overvinne trykktap i anlegget. Når naturlige drivkrefter er store nok til å alene sørge for ønsket ventilasjonsmengde med tilfredsstillende tilluftstemperatur og luftkvalitet, slås viftene av (Schild et al., 2003).

Man deler i hovedsak inn i tre ulike hybride ventilasjonsprinsipp.

- **Naturlig og mekanisk ventilasjon (mixed-mode).** Ved hjelp av en kontrollstrategi varierer en i dette prinsippet mellom to selvstendige ventilasjonssystemer. Ulike typer kontrollstrategi kan benyttes ved denne typen ventilasjonsprinsipp. Man kan ha operasjon der systemet bytter periodisk mellom naturlig og mekanisk drift. Anlegget kan også opereres slik at det er samtidig drift av naturlig og mekanisk system på samme sted til samme tid. En tredje mulighet er å ha ulik drift fra sone til sone.
- **Vifte assistert naturlig ventilasjon.** Prinsippet baseres på et naturlig ventilasjonssystem, men i perioder med svake naturlige drivkrefter eller store luftmengdebehov, assisteres systemet av lavtrykks mekaniske vifter.
- **Mekanisk ventilasjon med støtte fra naturlige drivkrefter.** I dette prinsippet har en et mekanisk ventilasjonssystem som basis. Dette er tilrettelagt for å ta de naturlige drivkreftene i optimal bruk. Naturlige drivkrefter står for en betydelig

del av det nødvendige trykket, mens resterende dekkes av mekaniske lavtrykks vifter.

For å kategorisere en hybrid ventilasjonsstrategi er det i tillegg nødvendig å beskrive; kontrollstrategi for inneluftkvalitet og sommerkomfort, grensebetingelser og komponenter, samt nivå av bygningsintegrasjon (Santamouris og Wouters, 2006).

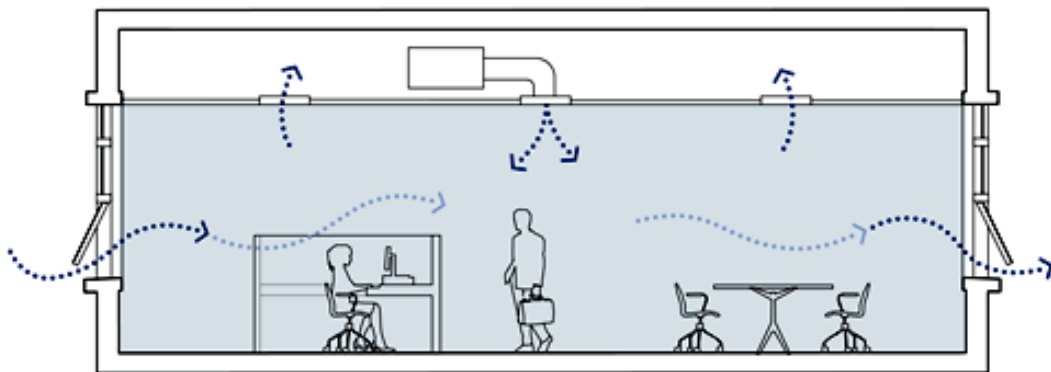
## 2.4 Mixed-mode ventilasjon

Mixed-mode er det hybride ventilasjonsprinsippet som vil bli studert i denne oppgaven. Her kombinerer en naturlig ventilasjon ofte fra vinduer som kan åpnes (automatisk eller manuelt) med mekanisk ventilasjon. En godt designet mixed-mode bygning er ofte utformet med et sofistikert kontrollsystem som gjør at bygningen kan veksle mellom disse to modusene over ulik tid av dagen eller sesongen. Dette for å skape best mulig komfort og lavest mulig energibruk og driftskostnader (Brager et al., 2000).

### 2.4.1 Mixed-mode designstrategier

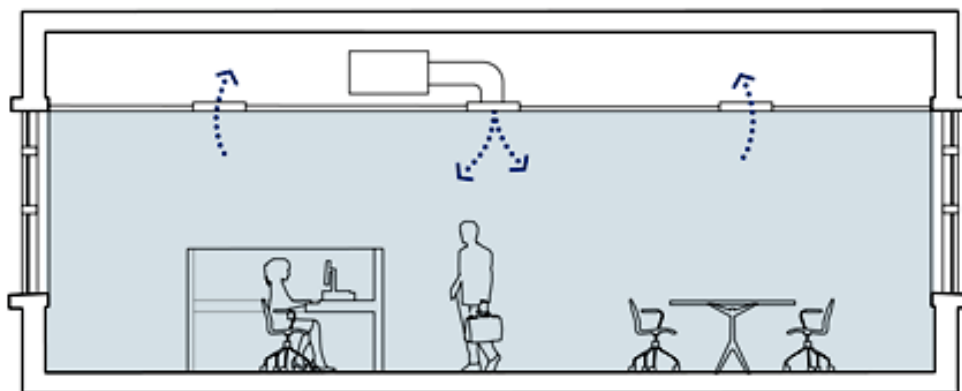
Det er svært mange ulike designstrategier for mixed-mode. Dette fordi de skal tilpasses svært ulike bygninger. Det er likevel normalt å klassifisere dem etter driftsstrategi, vanligvis i form av om de to modusene eksisterer på samme plass eller opererer på samme tid. De ulike klassifiseringene er (CBE, 2013):

- **Parallellsystem (samme plass, samme tid).** Dette er den vanligste mixed-mode designstrategien. Det naturlige- og mekaniske ventilasjonssystemet opererer på samme plass og til samme tid. Det mekanisk ventilasjonssystemet kan supplere vindusventileringen eller tjene som bakgrunns ventilasjon, samtidig kan brukerne åpne vinduer etter individuelle preferanser.



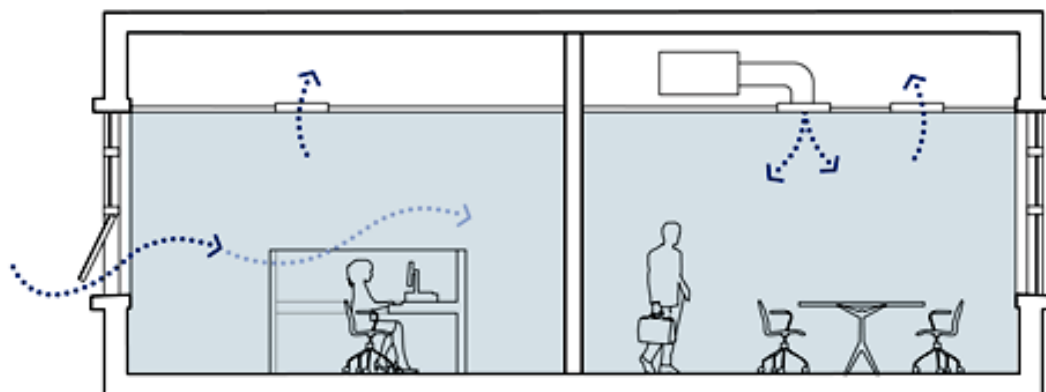
Figur 2.2: Parallellsystem (CBE, 2013)

- **Omkoblingssystem (samme plass, ulik tid).** I et omkoblingssystem varieres det mellom naturlig- og mekanisk modus på sesongmessig eller daglig basis. Bygningens automasjonssystem bestemmer modus ut fra utetemperatur, tilstedeværelse sensor, vindu (åpnet/ lukket) sensor eller basert på gitte instruksjer.



Figur 2.3: Omkoblingssystem (CBE, 2013)

- **Sonesystem (ulik plass, samme tid).** I en bygning med sonesystem, har ulike soner i bygningen forskjellig ventilasjonsstrategier. En kan da benytte naturlig- og mekanisk ventilasjon i ulike deler av bygningen på samme tid.



Figur 2.4: Sonesystem (CBE, 2013)

Det har vist seg at i mange mixed-mode bygninger avviker den faktiske driftsstrategien fra den opprinnelige. For eksempel kan en bygning som originalt er designet for sesongmessig omkobling mellom naturlig- og mekanisk ventilasjon i praksis operere som et parallellsystem (Brager et al., 2000).

### 2.4.2 System kontroll

Systemet i mixed-mode bygninger styres ut fra ulike parametere. I normal modus er de mest vanlige styrevariablene CO<sub>2</sub>-konsentrasjon og innetemperatur. Disse parameterne overvåkes kontinuerlig, ofte ved hjelp av et gjennomsnitt av distribuerte sensorer i sonen. Når nivå eller konsentrasjon avviker fra sine respektive nominelle verdier vil det sendes signal om at det er et større behov for ventilasjon. Styresignal basert på innetemperatur er betraktet som relativt billige og er nøyaktige og effektive. CO<sub>2</sub>-sensorer fungerer som en erstatning for tilstedeværelse sensorer, og gir mulighet for mer energieffektiv og behovsstyrt ventilasjon. Disse er relativt dyre og det trengs regelmessig kalibrering. Fuktighet brukes også i enkelte tilfeller som styrevariabel, men sjeldent for å kontrollere innendørs fuktighet mot komfort (Brager et al., 2007).

For å unngå at værforhold påvirker innendørs komfort, kan ventilasjonsbehovssignalet modifiseres for å ta hensyn til utetemperatur, vindhastighet, vindretning eller nedbør. Hvis utetemperaturen eksempelvis er under et gitt nivå, kan systemet få beskjed om å kjøre etter minimale luftmengder gjennom det mekaniske ventilasjonssystemet med varmegjenvinner. Systemet kan også ta hensyn til nedbør og vind, ved å for eksempel begrense vindusåpninger ved uteforhold der det er fare for at det regner inn (Brager et al., 2007).

Som en respons på signal fra styringsvariablene eller modifikatorene kan en rekke kontrollerende tiltak bli iverksatt. Ventilasjonsmengden kan reguleres ved å endre antall vinduer som er åpne, eller åpningsgraden av vinduene. En kan også regulere den mekaniske ventilasjonsmengden som respons på vinduenes åpningsgrad og inneklimateforhold (Brager et al., 2007).

### 2.4.3 Potensielle fordeler og ulemper med mixed-mode bygninger

Mixed-mode ventilasjonssystem fører med seg en rekke potensielle fordeler og ulemper sammenlignet med konvensjonelle ventilasjonssystem. Disse kan sees av Tabell 2.1.

Tabell 2.1: Potensielle fordeler og ulemper ved mixed-mode bygninger (CBE, 2013)

Fordeler	Ulemper
<b>Redusert energiforbruk.</b> En bygning med et godt designet mixed-mode ventilasjonssystem kan redusere bruken av mekanisk ventilering. Dette vil medføre til et lavere utslipp av klimagasser samt lavere driftskostnader.	<b>Utendørs forurensning.</b> Vinduslufting er ikke ønskelig i alle situasjoner grunnet luftbåren forurensning og allergener eller utendørs støy.
<b>Høyere brukertilfredshet.</b> Et mixed-mode ventilasjonssystem har potensial til å tilby brukerne større grad av kontroll over sitt lokale termiske- og atmosfæriske miljø.	<b>Økt designtid.</b> Da mixed-mode system er mindre kjent kan det være nødvendig med lengre designtid enn for konvensjonelle systemer.
<b>Fleksibilitet og pålitelighet.</b> Mixed-mode strategier gir fleksibilitet og pålitelighet i bygningens ventilasjonssystem. Hvilket potensielt resulterer i lengre levetid for enkelte komponenter, større tilpasningsevne til variert bruk og reduserte livssyklus-kostnader.	<b>Kompleksitet.</b> Mixed-mode bygninger krever avanserte og komplekse kontrollsystemer. Hvilket fører til behov for mer kunnskap både i bygge- og driftsperiode.
<b>Neddimensjonering.</b> Fornuftig bruk av mixed-mode ventilasjon kan potensielt føre til neddimensjonert mekanisk ventilasjon- og/eller mekanisk kjøleanlegg	<b>Konflikt mellom systemene.</b> Det er en bekymring i bransjen for at det mekaniske- og det naturlige systemet skal komme i konflikt med hverandre.
	<b>Brann og sikkerhet.</b> Potensialet for røykspredning i bygninger med ventilasjon drevet av vind og/eller oppdrift. I bygninger med operable vinduer bør også bygningssikkerheten vurderes.

## **2.5 Referanse bygninger med mixed-mode ventilasjon**

Larvik kommune har vært en foregangskommune på hybrid ventilasjon i barnehage- og skolebygg i Norge. Flere bygninger benytter seg nå av mixed-mode ventilasjon. Mixed-mode ventilasjon er både blitt benyttet i nybygging samt renovasjon av eldre bygninger. Det vil her kort presenteres to av disse bygningene.

### **2.5.1 Brunla ungdomsskole**

Brunla ungdomsskole ble ferdigstilt i 1967, i januar 2012 ble ventilasjonssystemet oppgradert. Det benyttes i dag mekanisk avtrekksventilasjon i kombinasjon med motorkontrollerte vinduer. Ønsket luftkvalitet og temperatur er styringsparametere for ventilasjonen, der kontroll av temperatur er tyngre vektlagt enn å holde CO<sub>2</sub>-nivået lavt. Vinduene åpnes og lukkes ut fra styringsparameterne, samt målinger fra værstasjon på tak. Værstasjonen registrerer utetemperatur og nedbør, samt vindhastighet og -retning. Ønsket romtemperatur og CO<sub>2</sub>-nivå stilles inn individuelt i hver sone. Gjennom overstyringsknapper i klasserommene har brukerne også mulighet til å åpne eller lukke vinduene etter egne preferanser. Vinduene vil ved overstyring gå tilbake til automatisk drift etter en gitt periode. Rommene varmes opp av et vannbårent oppvarmingssystem, lavtemperatur radiatorer er montert under vinduene (Algrøy, 2014).

I hovedsak benyttes det to ulike årstids tilpassede driftsstrategier. I oppvarmingssesong benyttes det en vinterstrategi. Her tilføres luft for å opprettholde en tilfredsstillende luftkvalitet. Da lave luftmengder kan føre til uakseptabel luftkvalitet, mens høye luftmengder vil gi et høyt energiforbruk, er det ønskelig å finne en middelvei. I kjølesesongen benyttes det en sommerstrategi, luft tilføres her for å opprettholde termisk komfort. Grunnet høyere utetemperatur er energiforbruk i denne sesongen av mindre betydning (Algrøy, 2014).

### **2.5.2 Solstad barnehage**

Solstad barnehage er en lavenergibygning åpnet i juni 2011. Barnehagen har et hybrid ventilasjonssystem, som kombinerer lufttilførsel gjennom motorkontrollerte vinduer og balansert mekanisk ventilasjon. Ventilasjonsmengden er regulert av CO<sub>2</sub>- og temperatursensorer. På sommerstid vil termisk komfort være hovedprioritering, hvilket innebærer lite eller ingen mekanisk ventilasjon. Dersom innetemperaturen i en sone overskrider settpunkt, vil vindu tilknyttet denne sonen åpnes og starte nedkjøling av





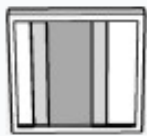


inneluften. Mekanisk ventilasjon startes når CO<sub>2</sub>-nivået overskrider et gitt settpunkt, dette nivået er på sommerstid relativt høyt. På sommerstid kan også nattkjøling aktiveres. Vinterstid er hovedprioritet å sikre tilfredsstillende luftkvalitet. Tilførsel av luft gjennom vinduer er i denne sesongen begrenset, grunnet lav utetemperatur. Settpunkt for CO<sub>2</sub>-nivå er i denne sesongen lavere for det mekaniske systemet enn for vindussystemet. Dette medfører at vinduslufting kun vil forekomme i perioder der det mekaniske systemet ikke er tilstrekkelig for å senke CO<sub>2</sub>-nivået, eller innetemperaturen er høyere enn et gitt settpunkt. Når gjennomsnittlig utetemperatur over dagen er lavere enn settverdi, byttes det automatisk fra sommer- til vinterstrategi (Ogård, 2014).

Vinduene har en maksimal åpningsvinkel. Denne styres ut fra vindhastighet, vindretning samt nedbør og hindrer overventilering og skader på materialer grunnet høye vindhastigheter og drivregn. Ettersom høy grad av brukerinteraksjon er viktig for tilfredshet med inneklime, kan de fleste vinduene manuelt overstyres. Vinduene vil da stå i gitt posisjon i 30 minutt før det vil gå tilbake til automatisk operasjon (Ogård, 2014).

## **2.6 Vinduslufting**

I mixed-mode bygninger blir luft tilført naturlig gjennom vindusåpninger eller ved hjelp av et mekanisk ventilasjonsanlegg. Ved vinduslufting finnes det en rekke muligheter med hensyn til vindustype, -plassering og -størrelse. Valg av vindustype tas som oftest på et arkitektonisk grunnlag, men klima er også tungtveiende. Roetzel et al. (2010) har sammenlignet ulike vindustyper opp mot en rekke faktorer, dette kan sees av Tabell 2.2.

Tabell 2.2: Sammenligning av ulike vindustyper med hensyn på en rekke arkitektoniske og klimatiske faktorer (Roetzel et al., 2010)

	Sidehengt, åpner mot innsiden	Bunnhengt åpner mot innsiden	Glidende åpning	Horisontal dreining, øvre del åpnes mot innsiden	Topphengt åpner mot utsiden
					
<b>Beskyttelse mot vær</b>	Dårlig	Bra	Dårlig	Medium	Medium
<b>Største mulige ventilasjonsrate</b>	Bra	Dårlig	Medium	Bra	Medium
<b>Reguleringsmulighet av åpningsstørrelse</b>	Bra	Dårlig	Bra	Bra	Bra
<b>Fleksibilitet for plassering av møbler</b>	Dårlig	Bra	Bra	Medium	Bra

Heiselberg et al. (2001) har sammenlignet strømningskarakteristikken ved vinduslufting fra et sidehengt og et bunnhengt vindu. Man fant ut at det på vinterstid var fordelaktig med bunnhengt vindu. Dette fordi luften måtte strømme lengst distanse og dermed ble best innblandet med romluften, før den kom inn i oppholdssone. Lufthastigheten ville derfor være lavere enn ved et sidehengt vindu, der luften tilføres direkte til oppholdssonen. Risikoen for trekk ble dermed mindre. Kontroll er dessuten vanskelig ved sidehengt vinduslufting, da luftmengde og lufthastighet øker svært raskt

med økende åpningsvinkel. På sommerstid vil derimot bunnhengte vinduer kunne få problemer med å levere tilfredsstillende ventilasjonsrater.

Vindusplassering og -størrelse påvirker også luftvekslingsraten. Richter et al. (2003) sammenlignet ulike vinduskonfigurasjoner. Resultatene viste at plassering av vindu på fasade samt vindusstørrelse påvirket ventilasjonsraten betydelig. Luftvekslingsraten kan økes ved å fordele fasadens totale åpningsareal over flere strategisk plasserte vinduer. Effekten kan dessuten forsterkes ved å bruke justerbare vindusåpninger (Roetzel et al., 2010).

### **2.6.1 Ventilasjonsrater gjennom vindu**

Luftstrømningen gjennom et vindu er avhengig av valgt naturlig ventilasjonsstrategi. Ved oppdrifts- og tverrventilasjon vil luft strømme inn gjennom en åpning og ut av en annen, se Figur 2.1. Luftstrømmen vil genereres av en trykkdifferanse over åpningen skapt av vind- og termiske oppdriftskrefter og vil generelt være mye høyere enn ved ensidig ventilasjon (Heiselberg et al., 2001).

Ved ensidig ventilasjon er utregninger av ventilasjonsrate svært komplekst, da vindusåpningen på samme tid brukes som både inntak og avkast. Det er derfor muligheter for luftinnblanding og resirkulasjon. I tillegg kompliserer turbulenseffekter utregningene ytterligere sammenlignet med tverrventilasjon der disse kan neglisjeres (Caciolo et al., 2011). Warren (1977), De Gids og Phaff (1982), Dascalaki et al. (1996) og Larsen og Heiselberg (2008) har alle forslått empiriske modeller til utregning av luftvekslingsraten for kombinasjon av termiske oppdriftskrefter og vindkrefter ved ensidig ventilasjon. Full skala eksperimentelle studier på hvordan kombinasjonen av termisk oppdriftskrefter og vindkrefter påvirker ventilasjonsraten, er blitt utført av Caciolo et al. (2011). Resultatene viste at strømningen som ble skapt av kombinasjonen av de naturlige drivkreftene ble karakterisert av stor grad av luftinnblanding på grunn turbulent diffusjon. Hvilken effekt kombinasjonen av termiske oppdriftskrefter og vindkrefter har på ventilasjonsraten var avhengig av vindretningen. I åpninger i le vil turbulent diffusjon redusere effektiv temperaturdifferanse og dermed også skorsteinseffekten. Konsekvensen var at ventilasjonsraten ble mindre enn det den ville vært uten påvirkning av vindkrefter. I vindutsatte åpninger vil skorsteinseffekten også

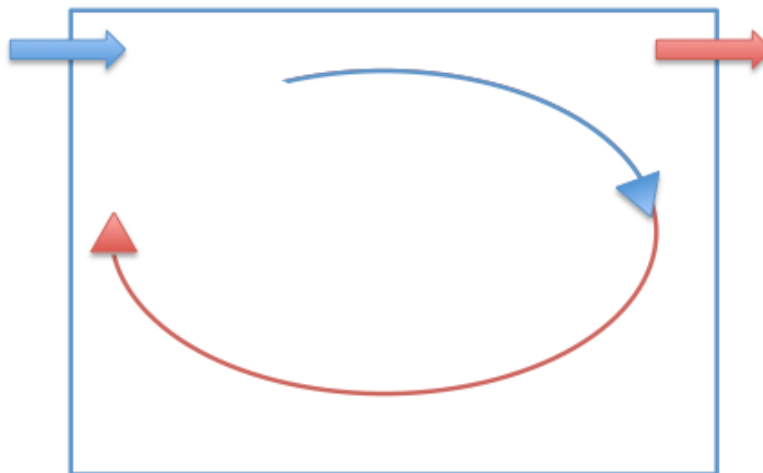
bli redusert grunnet turbulens diffusjon. Vindkreftene vil dog skape et positivt bidrag som gjør at ventilasjonsraten i dette tilfelle blir større den hadde vært uten vind.

I en helt eller delvis naturlig ventilert bygning, brukes det som oftest en kombinasjon av de naturlige basisstrategiene, som illustrert av Figur 2.1. Dette for å håndtere variasjonen av ventilasjonsbehov på en best mulig måte (Terpiger Andersen et al., 2002).

## 2.7 Luftdistribusjon i rom

### 2.7.1 Omrøringsventilasjon

Ved omrøringsventilasjon tilføres luften med høy hastighet, slik at hele luftvolumet i rommet blir satt i bevegelse. Romluft blandes med tilført luft. Dette medfører en tilnærmet lik lufttemperatur og forurensningskonsentrasjon i hele rommet samt i avtrekksluften. Luften tilføres med en hastighet på 1 m/s eller noe mer. Luftbevegelsene i et rom er proporsjonale med tilluftshastigheten. Fare for trekk må derfor tas med i betraktningen ved valg av tillufthastighet (Nilson, 2003).

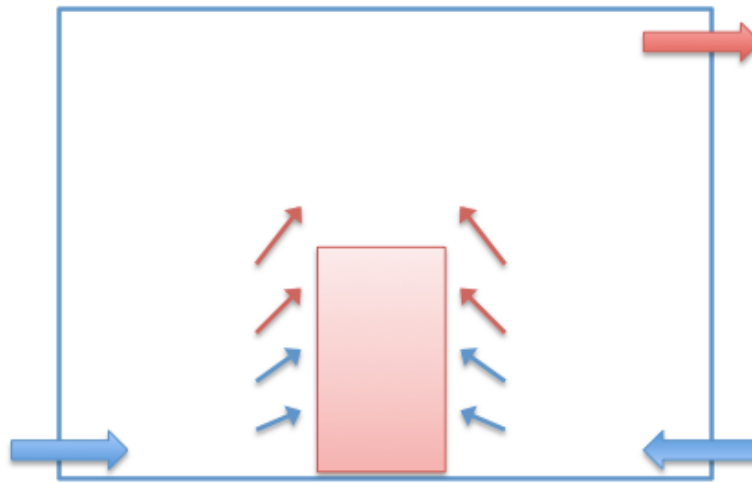


Figur 2.5: Prinsippkisse omrøringsventilasjon basert på (Nilson, 2003)

### 2.7.2 Fortrengningsventilasjon

Fortrengningsventilasjon bruker det faktum at avgitt varme og forurensning ofte kommer fra samme kilde. Luft blir tilført nær gulv, med temperatur lavere enn romlufttemperaturen. Tilluften vil nå brukerne før den er fullt forurenset, luften i pustesonen vil dermed holde høy kvalitet. Når luften kommer i kontakt med brukeren

vil det avgis både varme og forurensninger. Oppdriftskrefter vil få den varme forurensede luften til å stige til tak hvor den vil strømme ut gjennom avtrekk (Nilson, 2003).



Figur 2.6: Prinsskisse fortrengningsventilasjon basert på (Nilson, 2003)

### 2.7.3 Aktiv fortrengningsventilasjon

Ved aktiv fortrengningsventilasjon tilføres luften ved tak, med lav hastighet og undertemperatur. Da luften er kaldere en romlufttemperaturen vil den synke ned mot gulvet og samtidig blande seg med romluften. Luften vil så bre seg utover langs gulvet hvor den vil komme i kontakt med brukerne som vil tilføre luften varme og forurensninger. Dette vil få luften til å stige opp mot taket, hvor den vil bli trukket ut gjennom avtrekk (Tjelflaat, 2014).

### 2.7.4 Stempelventilasjon

Stempelventilasjon er den enkleste type strømning. Luften beveger seg da som et stempel enten fra tak til gulv eller omvendt. Eller fra en av rommets vegger til motsatt vegg. Luften tilføres rommet gjennom store tilførselsrister som normalt dekker en hel overflate i et rom, eksempelvis en vegg, tak eller gulv. Denne løsningen er ikke vanlig da det er behov for store luftmengder, hvilket medfører et stort energibehov (Nilson, 2003).



### 3 Inneklima

---

I dag bruker nordmenn omlag 90 % av levetiden innendørs. Innemiljøet har derfor stor betydning på enkeltpersoners helse og velvære, likeledes på effektivitet og produktivitet på arbeidsplassen. Verdens helseorganisasjon (WHO) definerer at begrepet inneklima omfattes av termisk-, atmosfærisk- akustisk-, aktinisk- og mekanisk miljø. Begrepet innemiljø inkluderer i tillegg estetiske- og psykososiale faktorer (Novakovic et al., 2007).

I denne oppgaven er det faktorene knyttet til inneklima begrepet som sees på. I all hovedsak er de faktorer knyttet til det termiske- og atmosfæriske miljø som vil bli undersøkt. Dette fordi det er disse som er mest utsatt for avvik ved implementering av mixed-mode ventilasjon. Det kan også forekomme endringer i akustisk miljø, grunnet utendørs støy gjennom åpne vindu. Denne problemstillingen nevnes som en mulig ulempe med vinduslufting, men vil ikke undersøkes noe nærmere i denne oppgaven.

#### 3.1 Termisk komfort

Når en snakker om et godt termisk miljø i sammenheng med inneklima, snakker man om en tilstand der brukerne opplever termisk komfort. Termisk komfort er definert som sinnstilstanden hvor en uttrykker full tilfredshet med de termiske omgivelsene. Den påvirkes av følgende miljøfaktorer; luftens tørrkuletemperatur, termisk stråling i rommet, luftens hastighet og turbulens samt luftfuktighet. I tillegg til personfaktorene aktivitetsnivå, bekleddningsnivå og oppholdstid (Novakovic et al., 2007).

Energiomsettingen i kroppen avhenger av fysisk aktivitet. Den angis i W per m<sup>2</sup> kroppsoverflate, eller den relative enheten met. 1 met tilsvarer 58,14 W per m<sup>2</sup> kroppsoverflate. Sittende arbeid ved kontor og skoler tilsvarer et nivå på mellom 1,1 til 1,5 met. Varmeutveksling mellom kroppen og omgivelsene påvirkes sterkt av klærnes isolerende effekt. Isolasjonsverdien mellom hudens overflate og bekleddningens utvendige overflate angis i m<sup>2</sup>K/W eller den relative enheten clo. 1 clo tilsvarer 0,155 m<sup>2</sup>K/W. Dette er nivået som vil holde en stillesittende person komfortabel ved operativ temperatur, relativ fuktighet og lufthastighet på henholdsvis 21 °C, 50 % og 0,1 m/s.

Standard innendørs vinterbekledning tilsvarer 1,0 clo mens vanlig sommerbekledning tilsvarer 0,5 clo (Novakovic et al., 2007).

Termisk nøytralitet innebærer at kroppen ikke har noe generelt ønske om høyere eller lavere omgivelsestemperatur. At omgivelsene gir termisk nøytralitet for kroppen som helhet er en nødvendig, men ikke tilstrekkelig betingelse for termisk komfort. Det kan gjøres vurderinger på dette ut fra PMV- (Predicted Mean Vote) og PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) indeksene. Vurderinger i PMV-indeksen gjøres ved brukerne angir hvordan de opplever de termiske forholdene. Det benyttes en psykofysisk 7-punkts skala som strekker seg fra (+3) hett til (-3) kaldt, 0 angir termisk nøytralitet (Novakovic et al., 2007). PMV-indeksen anslår gjennomsnittsverdien av de termiske vurderingene til en stor gruppe mennesker utsatt for samme miljø. PPD-indeksen angir en kvantitativ prognose over prosentandel misfornøyde. Personer som gir vurderingene ( $\pm 2$ ) og ( $\pm 3$ ) på PMV-indeksen ansees som misfornøyde NS EN ISO 7730(2005). PMV-PPD indeksen baseres på 1 times middelveier. Man vil med PMV-verdi på 0 oppnå en PPD-verdi på 5 %, hvilket betyr at en maksimalt kan oppnå 95 % fornøyde. Det er viktig å understreke at termisk nøytralitet ikke er en tilstrekkelig betingelse for termisk komfort. Selv om en uttrykker termisk nøytralitet kan lokalt termisk ubehag forekomme. Dette kan være gjennom stor strålingsasymmetri, trekk, for varme eller kalde gulv og store vertikale temperaturgradienter (Novakovic et al., 2007). De vanligste målene for termisk inneklima er som følger.

### **3.1.1 Temperatur**

#### ***Lufttemperatur***

Den vanligste parameteren for å beskrive de termiske omgivelsene er lufttemperaturen. Lufttemperaturen måles midt i rommet (1,2 meter over gulv), ved en persons arbeidsplass og på steder med erfaringsmessig høyest og lavest temperatur. I rom tilpasset sittende arbeid måles temperaturer i 0,1-, 0,6- og 1,1 meter over gulvet, hvilket svarer til en persons ankelhøyde, tyngdepunkt og hodehøyde. Store temperaturforskjeller mellom ankel- og hodenivå kan føre til ubehag (Byggforskserien, 1999). Internasjonal-, europeisk- og amerikansk standard (ISO, CEN og ASHRAE) setter krav til at temperaturforskjellen skal være mindre enn 3 °C (Novakovic et al., 2007). Lufttemperaturen kan måles med vanlige væsketermometere, termografer eller med



ulike typer termoelementer, men det er viktig at instrumentet beskyttes mot stråling (Byggforskserien, 1999).

### ***Gjennomsnittlig strålingstemperatur***

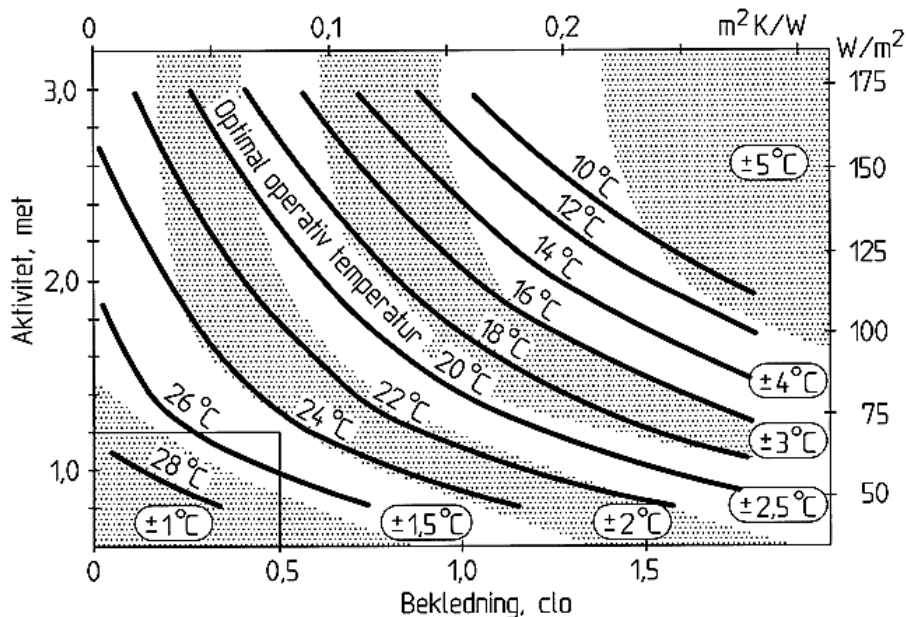
En stor del av kroppens varmetap skyldes strålingsutveksling med omgivende flater. Dette varmetapet bestemmes av overflatetemperaturen på flatene. Gjennomsnittlig strålingstemperatur er en fiktiv ensartet temperatur på omgivende flater som medfører samme varmeavgivelse som de reelle og uensartede overflatetemperaturene. Den måles som middelverdien av alle overflatetemperaturene i rommet, veid mot størrelsen på de respektive overflatene sett fra betrakningspunktet (Byggforskserien, 1999).

### ***Operativ temperatur***

I rom med store strålingskilder i rommet er det mest hensiktsmessig å benytte operativ temperatur som mål. Operativ temperatur ( $t_{op}$ ) integrerer lufttemperatur og strålingstemperatur. Den defineres som ensartet temperatur på luft og omgivende flater der kroppen gir samme varmeavgivelse som ved reelle og uensartede omgivelser. I mange tilfeller kan den beregnes som det aritmetiske middelet av gjennomsnittlig strålingstemperatur ( $t_r$ ) og lufttemperatur ( $t_a$ ). Forskjellen mellom disse må da være mindre enn 4 °C, i tillegg må lufthastigheten være mindre enn 0,2 m/s (Byggforskserien, 1999).

$$t_{op} = 0,5 \cdot (t_a + t_r) \quad 3.1$$

Optimal operativ temperatur gir en gjennomsnittlig vurdering PMV lik 0 og er avhengig av aktivitet og bekledding.



Figur 3.1: Optimal operativ temperatur. Avhengig av temperatur og bekledning. De heltrukne kurvene viser tilstander der PMV er null for en gitt temperatur (optimal operativ temperatur). De skraverte og hvite feltene markerer temperaturintervaller rundt optimal operativ temperatur der ventet gjennomsnittlig vurdering, PMV, ligger i intervallet  $\pm 0,5$ . Dette tilsvarer mindre enn 10 % misfornøyde (Byggforskserien, 1999)

### Anbefalinger og krav

I veiledning til byggt teknisk forskrift (TEK10, 2011) anbefales det at lufttemperaturen holdes under  $22^{\circ}\text{C}$  ved tilstedeværelse av oppvarmingsbehov, så langt dette er mulig. *Lufttemperaturen tilpasses rommets funksjon og bruk, og muligheter for individuelle reguleringsmuligheter bør tilstrebes* (TEK10, 2011). Veiledningen fastslår også at forskjellen i lufttemperatur mellom hode og føtter ikke bør overstige  $3\text{-}4^{\circ}\text{C}$ . Dagstemperaturvariasjonen bør dessuten ikke overstige ca.  $4^{\circ}\text{C}$ .

Veiledningen anbefaler også verdier for operativ temperatur, ut fra arbeidsintensitet.

Tabell 3.1: Anbefalte verdier for operativ temperatur ut fra aktivitet (TEK10, 2011)

Aktivitetsgruppe	Lett arbeid	Middels arbeid	Tungt arbeid
Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	19-26	16-26	10-26

På varme sommerdager er det vanskelig å holde operativ temperaturen innenfor anbefalte verdier. En kan derfor overskride disse verdiene i varme sommerperioder, når lufttemperaturen ute er over den som overskrides med 50 timer i et normalår (TEK10, 2011).

I Byggforsk byggedetaljer 421.505, krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger (Byggforskserien, 2000), stilles det mer spesifikke anbefalinger til operativ temperatur for ulike bygningstyper. Disse kan sees i Tabell 3.2 og viser overordnede krav til operativ temperatur for tre forskjellige innemiljøkvalitets kategorier. Kategori 1 tilsvarer et høyt ambisjonsnivå med lav prosentandel misfornøyde. Kategori 2 er et middels ambisjonsnivå og tilsvarer i all hovedsak nivået i byggeteknisk forskrift (TEK10). Kategori 3 er et moderat ambisjonsnivå (Byggforskserien, 2000).

**Tabell 3.2: Anbefalte verdier for operativ temperatur på henholdsvis sommer- og vintertid. Verdiene er for henholdsvis skole og barnehage ved tre ulike ambisjonskategorier (Byggforskserien, 2000)**

Type bygning	Kategori	Operativ temperatur (°C)	
		Sommer	Vinter
<b>Skole, klasserom</b>	1	24,5 ± 0,5	22,0 ± 1,0
	2	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0
	3	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0
<b>Barnehage</b>	1	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0
	2	23,5 ± 2,0	20,0 ± 2,5
	3	23,5 ± 2,5	20,0 ± 3,5

### 3.1.2 Lufthastighet og turbulens

Vår termiske komfort er sterkt avhengig av luftbevegelser i oppholdssonen. Trekk kan føre til nedsatt termisk komfort og er en hyppig årsak til klager. Begrepet trekk er imidlertid ikke entydig. Strålingstrekk skyldes stor strålingsasymmetri, mens konvektiv trekk har sammenheng med relative luftbevegelser, temperatur og fuktighet (Novakovic et al., 2007). Videre i denne oppgaven defineres trekk som en uønsket, lokal, konvektiv avkjøling av kroppen. Naken hud er mest følsom for trekk, utsatte områder for trekkplager er derfor ansikt, hender og nedre del av bena. Årsaker til trekk kan være for store lufthastigheter fra ventilasjonsanlegg, kaldras fra avkjølte flater og infiltrasjon i bygningskroppen (Byggforskserien, 1999). I Tabell 3.3 sees overordnede krav til maksimal lufthastighet for tre ulike ambisjonskategorier, kategoriene er av samme karakter som de beskrevet for anbefalinger til operativ temperatur.

Tabell 3.3: Anbefalte verdier for maksimal lufthastighet på henholdsvis sommer- og vintertid. Verdiene er for henholdsvis skole og barnehage ved tre ulike ambisjonskategorier

Type bygning	Kategori	Maksimal lufthastighet (m/s)	
		Sommer	Vinter
Skole, klasserom	1	0,18	0,15
	2	0,22	0,18
	3	0,25	0,21
Barnehage	1	0,16	0,13
	2	0,20	0,16
	3	0,24	0,19

Ubehag ved trekk skyldes ikke kun lokalt varmetap, men også svingninger i hudtemperatur. En høyturbulent luftstrøm (hurtige hastighetssvingninger) vil derfor oppleves som mer ubehagelig enn en lavturbulent luftstrøm, selv om varmetapet er det samme. Disse svingningene kan kvantifiseres ved hjelp av turbulensintensiteten ( $t_u$ ) (Byggforskserien, 1999).

$$t_u = (100 \cdot S_d) / v_a \quad 3.2$$

hvor:

$S_d$  = standardavviket av lufthastigheten, normalt over en måleperiode over 3 minutt (m/s).

$v_a$  = lokal gjennomsnittlig lufthastighet, normalt over en måleperiode over 3 minutt (m/s).

I rom med mekanisk omrøringsventilasjon er turbulensintensiteten normalt i område mellom 30- til 60 %. I rom som er naturlig ventilert og i rom med fortrenningsventilasjon er den lavere (Byggforskserien, 1999). Fanger et al. (1988) undersøkte sammenhengen mellom turbulensintensitet og trekkrisiko. En fant her ut at trekkførmelsen er sterkt påvirket av fluktuasjonene. På bakgrunn av forsøkene ble det satt opp en modell som angir forventet prosentandel mennesker som er utilfredse grunnet trekk. Dette som en funksjon av lufttemperatur ( $t_a$ ), middellufthastighet ( $\bar{v}$ ) og turbulensintensiteten ( $t_u$ ). Prosentandel misfornøyde (PD) er gitt som (Novakovic et al., 2007);

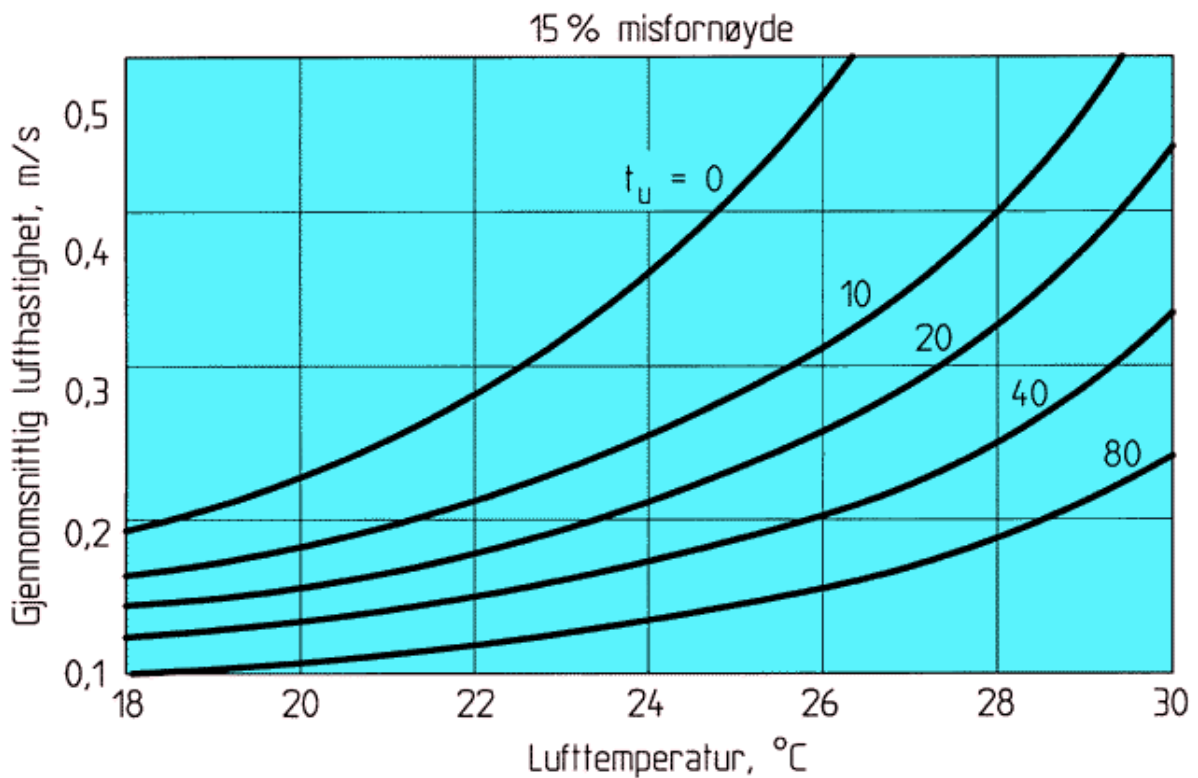
$$PD = (34 - t_a)(\bar{v} - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{v} \cdot t_u + 3,14)$$

3.3

For  $\bar{v} < 0,05$  m/s settes  $\bar{v} = 0,05$  m/s.

For  $PD > 100$  % brukes  $PD = 100$  %.

Figur 3.2 viser kombinasjonen av middellufthastigheten, lufttemperatur og turbulensintensiteten som gir en prosentandel misfornøyde på 15 % (Byggforskserien, 1999). En kan se at dersom turbulensintensiteten økes for en gitt lufttemperatur, må lufthastigheten senkes for å holde prosentandelen misfornøyde på 15 %.



Figur 3.2: Kombinasjonen av middellufthastigheten, lufttemperatur og turbulensintensiteten som gir en prosentandel misfornøyde på 15 % (Byggforskserien, 1999).

Røykempuller kan enkelt måle lufthastighet og luftbevegelsesmønster på kritiske steder. Ulike typer anemometre kan brukes til ytterlige målinger. Nyere instrumenter måler både øyeblikkshastighet, middelhastighet for de siste 3 minutt og turbulensintensitet (Byggforskserien, 1999).

### 3.1.3 Luftfuktighet

Parametere som duggpunkt, våtkule- og tørrkuletemperatur samt luftens vanndamptrykk kan alle nyttes til å beskrive luftens vanndampinnhold. Luftens relative fuktighet benyttes imidlertid oftest i sammenheng med inn klima. Denne er definert av forholdet mellom vanndampens partialtrykk og vanndampens metningstrykk ved samme lufttemperatur (Novakovic et al., 2007). Innenfor variasjonsområde 20- 60 % har luftens relative fuktighet ved normale forhold liten innflytelse på inn klimaet. Fuktigheten vil derimot i varme omgivelser være av stor betydning. Øvre grense for relativ luftfuktighet bestemmes ut fra fare for mikrobiologiskvekst og fare for kondens med påfølgende bygningsskader. I tillegg bør luftfuktighet under 15 % unngås, grunnet problemer med blant annet uttørking av hud. Tabell nedenfor viser anbefalinger med hensyn til luftens relative fuktighet (Byggforskserien, 2000).

**Tabell 3.4: Anbefalt intervall for relativ fuktighet på henholdsvis sommer- og vinterstid. Verdiene er for tre ulike ambisjonskategorier (Byggforskserien, 2000)**

Årsted	Kategori		
	1	2	3
<b>Vinter (kaldeste måneder)</b>	20 < RF < 40	RF < 40	RF < 40
<b>Sommer (varmeste måneder)</b>	RF < 60	RF < 70	RF < 70

### 3.1.4 Praktisk komfortkontroll og temperaturstyring

Nøyaktige bestemmelser av aktivitetsnivå og isolasjon av bekledning kan i praksis være vanskelig. Små endringer i aktivitet og bekledning kan dessuten føre til relativt store endringer i optimal operativ temperatur. Beregninger av optimal operativ temperatur og dermed forventet andel misfornøyde (PPD) er derfor vanskelig. Komfortkontroll bør som konsekvens av dette baseres på måling av lufttemperatur og på brukernes erfaringer med hensyn til varmekomfort (Byggforskserien, 1999).

Grunnet høy isolasjonsgrad på dagens bygninger avviker gjennomsnittlig strålingstemperatur vanligvis lite fra lufttemperaturen. Praktiske systemer for å regulere operativ temperatur er i liten grad utviklet. Det er derfor mer hensiktsmessig å regulere lufttemperaturen. Denne er dessuten mer ensartet enn den operative temperaturen. Strålingstemperaturen vil være noe høyere og lavere henholdsvis på

sommer og vinter enn lufttemperaturen. For å kompensere for dette settes lufttemperaturen lavere enn optimal operativ temperatur på sommeren og omvendt på vinteren (Byggforskserien, 1999). Begrepet temperatur henviser i denne oppgaven til lufttemperatur, dersom annet ikke er oppgitt..

## **3.2 Atmosfærisk miljø**

Utrykket atmosfærisk innemiljø beskrives delvis av luftens kjemiske, fysiske og mikrobiologiske sammensetning og delvis av folks oppfattelse av luften (Halvarsson og Hanssen, 2014). Akseptabel inneluft kvalitet er definert av (ASHRAE, 2001) som *luft hvor det ikke er noen skadelige konsentrasjoner av kjente forurensninger, bestemt av kompetent myndighetsorgan. Betydelig flertall (80 % eller mer) av personer som eksponeres skal ikke uttrykke misnøye.*

### **3.2.1 CO<sub>2</sub>-nivå**

Den vanligste indikatoren på luftkvalitet i bygninger hvor mennesker er den dominerende forurensningskilden er rommets CO<sub>2</sub>-nivå. En person tilfører rommet mellom 15 til 20 liter CO<sub>2</sub> i timen gjennom utånding. Hvor stor grad av denne mengden som forblir i rommet, er avhengig av romstørrelse og ventilasjonsgrad. CO<sub>2</sub> innholdet i inneluften bør ikke overstige 1000 ppm. Dette tilsvarer et nivå 600 ppm over middelveidien til uteluften i Norge, som er 400 ppm. Nivået er satt ut fra komfortbaserte vurderinger, altså hvordan mennesker kvalitativt opplever luften i rommet. Dersom CO<sub>2</sub>-nivået overstiger denne grensen er dette kun en indikator på at vi har for dårlig ventilasjon i forhold til personbelastning. For å se mulige negative effekter av CO<sub>2</sub> isolert sett, må en ha nivåer over 10 000 ppm. En komfortbasert grenseverdi basert på opplevd luftkvalitet er allikevel fornuftig for ikke industrielle bygg, da det må være et minimumskrav at opplevd inneluftkvalitet er tilfredsstillende (Novakovic et al., 2007).

### **3.2.2 Utendørs forurensning**

Utendørs forurensning kan skape avvik i atmosfærisk innemiljø. I urbane miljø kan forurensning fra trafikk være en begrensende faktor både med tanke på luftkvalitet og akustiske forhold.

I andre områder kan pollenstøv være problematisk. Pollen er små partikler som frigis til luften på bestemte tider av året. Partiklene spres av vind eller insekter for å bestøve

planter av samme art. Pollentypene som har størst betydning for pollenallergi i Norge kommer fra tresortene or, hassel og bjørk, i tillegg til samtlige gressarter. Av Tabell 3.5 kan man se sesongen til ulike pollentyper. Dataene er gjennomsnittlig verdier for de siste 10 år i Oslo. I dag er det antatt at i overkant av 20 % av befolkningen har en mer eller mindre alvorlig form for pollenallergi (NAAF, 2015b).

**Tabell 3.5: Gjennomsnittlig varighet av ulike pollensesonger, basert på data fra Oslo i perioden 2005 til 2014 (NAAF, 2014)**

Pollentype	Varighet
Or	08 mars – 12 april
Hassel	15 mars – 09 april
Bjørk	25 april – 20 mai
Gress	03 juni – 05 august

### 3.2.3 Luftmengder

Nødvendige luftmengder for å oppnå ønsket komfort er i tillegg til ønsket inneluftkvalitet avhengig av innendørs forurensningskilder, ventilasjonseffektivitet og uteluftkvalitet (Nilson, 2003). Da økte luftmengder også øker energibruk er det ønskelig å ikke ha luftmengder større enn nødvendig.

TEK10 (2011) fastslår at i byggverk for publikum og arbeidsbygning skal gjennomsnittlig frisklufttilførsel grunnet forurensninger fra personer med lett aktivitet være minimum 26 m<sup>3</sup> pr. time pr. person. Dersom det er høyere aktivitet skal frisklufttilførsel økes slik at luftkvaliteten er tilfredsstillende. Det settes også krav om gjennomsnittlig frisklufttilførsel på 2,5 m<sup>3</sup> pr. time pr. m<sup>2</sup> og 0,7 m<sup>3</sup> pr. time pr. m<sup>2</sup> henholdsvis i og utenfor driftstid. Dette for å ventilere bort lukt og emisjoner fra bygningsmaterialer og inventar.

### 3.2.4 Hovedfaktorer for et godt atmosfærisk innemiljø

Ventilasjon er bare en av fire bestemmende hovedfaktorer for atmosfærisk innemiljø. Hovedfaktorene kan sees av Tabell 3.6. Særlig renhold er en undervurdert påvirkningsfaktor (Novakovic et al., 2007).



Tabell 3.6: Hovedfaktorer for bestemmelse av innendørs luftkvalitet (Novakovic et al., 2007).

<b>Forurensningskilder</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• ute og inne</li><li>• kildestyrke</li><li>• lokalisering</li></ul>	<b>Ventilasjonsystem</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• type og kapasitet</li><li>• regulering og styring</li><li>• vedlikehold</li></ul>
<b>Rommets utforming</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• innredning</li><li>• utstyr</li></ul>	<b>Renhold</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• prosedyrer</li><li>• muligheter</li></ul>

### 3.3 Konsekvenser av et dårlig inneklima

#### 3.3.1 Helseeffekter

I utviklingsland utgjør luftforurensing fra hushold HAP (household air pollution) et stort problem. 2,8 milliarder mennesker er fremdeles avhengig faste brennstoff (som ved, jordbruksavfall, gjødsel og kull) og enkle ovner for matlaging og oppvarming. Estimert fra WHO for 2012 rapporterte om 4,3 millioner dødsfall som resultat av HAP fra matlaging. HAP er ansvarlig for nesten 5 % av den globale sykdomsbyrde GBD (global burden of disease), hvilket gjør den til den viktigste enkelt miljørisiko faktoren i global sammenheng (WHO, 2014).

I industrialiserte land er dårlig inneluftkvalitet en viktig årsak til allergier, andre overømfintlighetsreaksjoner, luftveisinfeksjoner og kreft. Lungekreft er relatert til høye innendørsnivåer av radon og eksponering for tobakksrøyk. Allergier, luftveisinfeksjoner og SBS (sick building syndrome) er ofte forbundet med fuktighet og for lave ventilasjonsrater (Sundell, 2004). SBS-symptomer er akutte symptomer, slik som øye- og neseirritasjoner og hodepine, forbundet med opphold i en bestemt bygning uten å indikere en bestemt sykdom. I en undersøkelse av 100 kontorbygg i USA rapporterte 23 % av kontorarbeiderne at de ofte opplevde SBS-symptom på jobb (Fisk, 2002). Fisk et al. (2009) utførte analyser av data fra ulike studier, for å se på sammenhengen mellom utbredelsen SBS-symptom hos kontorarbeidere og ventilasjonsraten. Analysene tyder på at den gjennomsnittlige utbredelsen av SBS-symptomer øker med 23 % ved at ventilasjonsraten senkes fra 10 til 5 L/s per person og 29 % ved at ventilasjonsraten senkes fra 25 til 10 L/s per person. En studie av (Simoni et al., 2010) viste at skolebarn

eksponert for CO<sub>2</sub> -nivå høyere enn 1000 ppm hadde signifikant høyere risiko for tørrhoste og betennelse i nesen.

### 3.3.2 Produktivitet

Største andel av årlige kostnader i mange bygninger er lønnsutbetalinger til de ansatte. En potensiell reduksjon i produktivitet grunnet avvik fra optimalt inneklima kan dermed føre til store kostnadstap. Sammenligning av flere studier viser en gjennomsnittlig reduksjon i produktiviteten på 2 % per °C når temperaturen er over 25 °C. En studie av (Wargocki og Wyon, 2013) undersøkte også effektene ved å senke lufttemperaturen fra 25 til 20 °C. Resultatene viste at den normaliserte ytelseshastigheten økte med rundt 10 %. Mindre data er tilgjengelig vedrørende redusert produktivitet ved lave temperaturer. Det er imidlertid blitt gjort studier som viser at lave temperaturer er relatert til ytelse av kroppsarbeid gjennom fingerferdigheter. Ved lave temperaturer begrenses blodtilførselen til hendene, hvilket forårsaker at temperaturen på hendene faller før kjernen av legemet kjøles ned (Seppanen et al., 2004). I en studie av Meese et al. (1984) ble det utført ulike fingerferdighetstester ved forskjellig temperaturer. Testene viste at ytelsen var 5 til 15 % lavere ved omgivelses temperatur på 18 °C enn ved en temperatur på 24 °C.

En studie av Wargocki et al. (1999) viste sammenheng mellom produktivitet og tilstedeværelse av forurensningskilde. Forsøkspersoner ble satt til å gjøre kontorarbeid eksponert for kontoromgivelser henholdsvis med og uten tilstedeværelse av en skjult forurensningskilde. Det ble rapportert om høyere tilfredshet med inneluft kvalitet og lavere tilstedeværelse av hodepine i omgivelsene uten forurensningskilden. I en skrivetest ble det også avdekket at forsøkspersonene skrev 6,5 % mer tekst i omgivelser uten tilstedeværelse av forurensningskilden. Wargocki og Wyon (2013) gjorde en studie i klasserom, der luftmengden øktes for å oppnå bedre luftkvalitet. Resultatene viste at hvis luftmengden per person øktes fra 3 L/s til 9,5 L/s ble normalisert ytelseshastighet forbedret med 8 %. Twardella et al. (2012) utførte en studie, der hensikten var å finne en sammenheng mellom gjennomsnittlig CO<sub>2</sub>-konsentrasjon i luften og konsentrasjonsytelse. 2366 tester fra totalt 417 studenter ble analysert. En fant her ut at totalt antall feil økte med 65 % ved et gjennomsnittlig CO<sub>2</sub>-nivå på 2115 ppm sammenlignet med et gjennomsnittlig CO<sub>2</sub>-nivå på 1045 ppm.

### 3.4 Inneklima og mixed-mode bygninger

Et av argumentene for mixed-mode ventilasjon er større grad av brukerkontroll (CBE, 2013). Et litteraturstudie av Frontczak og Wargocki (2011) konkluderer med at tilrettelegging for økt brukerkontroll forbedrer termisk komfort samt brukernes tilfredshet med inneluftkvaliteten. Brager og Baker (2009) studerte brukertilfredsheten i bygninger med mixed-mode ventilasjon sammenlignet med bygninger med konvensjonell ventilasjon i USA. En fant her ut at kun 59 % av brukerne i bygningene med konvensjonell ventilasjon uttrykte tilfredshet med de termiske omgivelsene. Misnøye var hyppigst relatert til for lite kontroll over eget innemiljø. Sammenligningen viste at mixed-mode bygningene hadde høyere nivå av brukertilfredshet både med hensyn på termisk miljø og luftkvalitet. Nivå av brukertilfredshet i mixed-mode bygninger viste seg imidlertid å være størst i moderate klima, mens bygninger i kalde klima hadde et lavere gjennomsnittlig nivå.

Algrøy (2014) har gjort målinger ved Brunla ungdomsskole i oktober 2014. Målingene viser tilfredsstillende temperatur nivå, men CO<sub>2</sub>-nivå overstiger anbefalt nivå på 1000 ppm store deler av dagen. Måleresultatene indikerer ikke trekk i klasserommene, men samtaler med de ansatte antyder likevel risiko for trekk. Det er også blitt gjort energi- og inneklimasimuleringer. Disse viser at mixed-mode løsningen delvis tilfredsstillende krav for termisk- og atmosfærisk inneklima. Simuleringer viser dessuten til mulighet for energibesparelse, med riktig utforming og drift av kontrollsystemet (Algrøy, 2014).

Simuleringer ved Solstad barnehage indikerer at mixed-mode anlegget leverer tilfredsstillende luftkvalitet med tanke på CO<sub>2</sub>-nivå. Når det kommer til termisk miljø, viser simuleringene til vanskeligheter med å holde et akseptabelt temperatur nivå uten mekanisk kjøling på de varmeste sommerdagene. Simuleringsresultatene tyder imidlertid på at mixed-mode anlegget ved et moderat sommerklima gir mer akseptable innetemperaturer enn mekanisk balansert ventilasjon. Resultatene tilsier dog at en med mixed-mode ventilasjon, må regne med noe større temperatursvingninger i løpet av driftstiden (Ogård, 2014).

### 3.5 Diskusjon

Et tilfredsstillende inneklima er viktig både av helsemessige og økonomiske hensyn. Et akseptabelt termisk- og atmosfærisk miljø er nært knyttet til graden av brukertilfredshet. Mixed-mode løsninger har potensial for høyere brukertilfredshet gjennom høyere grad av brukerkontroll. Samtidig så viser målinger, simuleringer og erfaringer fra mixed-mode bygninger i Larvik at det er risiko for avvik både i termisk og atmosfærisk inneklima. For at mixed-mode ventilasjonsløsninger skal være konkurransedyktige med konvensjonelle balansert mekanisk ventilasjonsløsninger er det vesentlig at det kan argumenteres for et tilfredsstillende inneklima. Dette er viktig med hensyn på å unngå negative helseeffekter for bygningens brukere som kan relatere til bygningens inneklima. Samtidig er et tilfredsstillende inneklima viktig for å sikre høy produktivitet.

Det er ikke gjort undersøkelser av atmosfærisk miljø med hensyn på annet enn CO<sub>2</sub>-nivå ved Brunla ungdomsskole og Solstad barnehage. Dette vil heller ikke bli gjort i evalueringen av Mesterfjellet skole. Problemer vedrørende luft- og støyforurensning fra trafikk må vurderes i hvert enkelt tilfelle. Vurderinger med hensyn på problemer for pollenallergikere bør også foretas. En blir ofte møtt med argument som "allergikere er i pollensesongen medisinerert allikevel". Dette bør ikke være et valid argument i diskusjonen rundt mixed-mode ventilasjon. Allergimedisin skal redusere plager, men er ikke helbredende (NAAF, 2015c). Allergikere kan derfor oppleve ubehag på tross av medisiner. NAAF (2015a) anbefaler pollenallergikere å unngå utlufting av huset i perioden fra morgen til ettermiddag, hvor pollenutslippet er størst. Dette må tas i betraktning ved vurdering av mixed-mode ventilasjon. Ved skoler og barnehager vil deler av pollensesongen falle inn under skoleferien. I perioden fra mars til juni er det likevel risiko for ubehag for allergikere. Dette er en periode hvor utetemperaturen er godt egnet for ventilering gjennom vinduslufting. En styringsstrategi basert på temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå vil derfor antagelig tillate relativ stor grad av vinduslufting. Samtidig har forskning vist at gradvis eksponering for allergener kan indusere toleranse hos allergikere. Saarinen et al. (2011) viser til at inntak av bjørkepollenhonning før pollensesongen reduserer symptomene i pollensesongen. Desensibilisering (behandling for å slutte å reagere på noe man tidligere ikke har tålt) kan oppnås gjennom lavgradig eksponering for allergener. Mindre eksponering for biodiversitet i miljøet svekker

menneskers mikrobiom (mikroflora hos friske og syke mennesker i nese, bihuler, luftveier, munnhule, hud, mage, tarm og fødselsveier). Alt mennesker spiser, drikker, berører eller puster inn modulerer mikrobiomet og holder immunsystemet friskt. Det er derfor å anbefale at alle grupper og særlig barn får mer tid til å oppholde og utfolde seg i frisk og mangfoldig natur (Bakke, 2014).

Skoler skal fremme høy prestasjonskultur. I perioder er det mange som vil trenge beskyttelse for pollen. I miljø der læring står i sentrum bør det være et mål å skape inneklima som er lite hemmende for alle, også allergikere. Løsninger med pollennett kan tenkes å fremme et bedre inneklima i pollensesongen. Nettene festes med borrelåslister og hindrer i overkant av 80 % av pollenstøvet å slippe gjennom (NAAF). Slike nett vil dog sette begrensninger på vinduet, da det forutsettes at det åpner utover. Nettene vil dessuten begrense luftmengden tilført gjennom vinduene, grunnet ekstra strømningsmotstand. Ved vurdering av implementering av mixed-mode ventilasjonssystem må allergi problematikken tas på alvor. Brukere med allergier bør bli fulgt ekstra opp, slik at man kan avdekke ubehag knyttet til pollenspredning.



## 4 Mesterfjellet skole

---

Mesterfjellet skole i Larvik sto høsten 2014 klar til å ta i mot 530 elever. Skolens ventilasjon er basert på mixed-mode med motorisert vinduslufting. Skolen inneholder både barne- og ungdomstrinnene og har et bruttoareal i underkant av 6000 m<sup>2</sup>, fordelt over 5 etasjer. Den er med dette den første bygningen i slik stor skala som inngår som del av Larvik kommunes satsing på hybrid ventilasjon i skoler og barnehager.



Figur 4.1: Mesterfjellet skole

Buer entreprenør har vært totalentreprenør. Asplan Viak har vært rådgivende ingeniør ventilasjon (RIV). Koordinator for Integrerte Tekniske Bygningsinstallasjoner (ITB) har vært Ventilasjonsbygg AS og Building System Integrator AS (BSI). Sistnevnte har levert det motoriserte vindusluftingssystemet fra WindowMaster AS, med alt fra vindusmotorer og værstasjon til programmering av komponenter og toppsystem for komplett styring.

#### 4.1 Bygningstekniske parametere

Mesterfjellet skole er designet som en lavenergibygning. Dette betyr at det er strenge krav til netto energibehov hvilket igjen fører til strenge krav til bygningskropp og tekniske installasjoner. Kravene for passivhus og lavenergibygninger står nærmere beskrevet i (NS3701). Innvendig er det ved skolen hovedsakelig benyttet linoleum på gulvflatene, mens innerveggene har granspiler, fibergips eller trefinerplater. Ytterfasadene er kledd i stående låvepanel i kebony (Joelson, 2014). I tabell nedenfor kan man se bygningstekniske parametere for Mesterfjellet skole.

Tabell 4.1: Bygningstekniske parametere for Mesterfjellet skole (Rambøll, 2014) (Rambøll, 2013)

Bygningstekniske parametere Mesterfjellet skole		
<b>U-verdi yttervegg</b>	0,16	W/m <sup>2</sup> K
<b>U-verdi tak/ gulv</b>	0,13	W/m <sup>2</sup> K
<b>U-verdi vindu og dører</b>	0,85	W/m <sup>2</sup> K
<b>Infiltrasjonstall</b>	0,42	h <sup>-1</sup>
<b>Normalisert kuldebroverdi</b>	0,05	W/m <sup>2</sup> K

#### 4.2 Oppvarming

Oppvarmingssystemet ved Mesterfjellet skole er vannbårent og består av lavtemperatur radiatorer og gulvvarme. Skolen er koblet på et nærvarmeanlegg ved Farrishallen. Anlegget består av en pellets kjel på 920 kW samt en elektrokjel på 250 kW. Nærvarmeanlegget leverer varme til Farrishallen, Mesterfjellet skole og Torstrand skole. Pelletskjelen er avhengig av å kunne levere 200 kW kontinuerlig for å kunne være i fornuftig drift. Denne har derfor driftstid på vinteren, mens elektrokjelen har driftstid på sommerstid samt som spisslast. Da Farrishallen og Torstrand skole har egne elektrokjeler som dekker spisslaster og sommersdrift, leverer elektrokjelen i nærvarmeanlegget hovedsakelig til Mesterfjellet skole.

#### 4.3 Energi

Det ble i byggeperioden foretatt energieuvaluering av Mesterfjellet skole i programmet SIMIEN (Rambøll, 2014). Det ble her simulert et energiforbruk på 496 314 kWh/år, hvilket tilsvarer et spesifikt energiforbruk på 89 kWh/m<sup>2</sup> år. Det faktiske



energiforbruket ved Mesterfjellet skole er blitt hentet inn. I utgangspunktet skal energiforbruket kunne avleses over ønsket periode. Systemet som registrerte og lagret denne informasjonen virket imidlertid ikke slik som det skulle. Det var derfor kun mulig å hente ut energiforbruket fra oppstart 16 mai 2014 frem til aktuell dato.

Energiforbruket det første året ved Mesterfjellet skole er blitt hentet ut, altså i perioden 16 mai 2014 til 15 mai 2015. Dette kan sees av Tabell 4.2. En kan se at snøsmelting anlegget står for omtrent  $\frac{1}{4}$  av energiforbruket til oppvarming. Dette ble i løp av vinteren avskrudd av driftspersonell, grunnet høyt energiforbruk. Anlegget er det første året i prøvedriftsfase. Her blir det gjort optimaliseringer for et mest mulig fornuftig energiforbruk, det er derfor grunn til å forvente et lavere energiforbruk kommende år.

Tabell 4.2: Målt energiforbruk Mesterfjellet skole i perioden fra oppstart 16 mai 2014 frem til 15 mai 2015

Energiforbruk Mesterfjellet skole		
	<i>kWh</i>	<i>kWh/m<sup>2</sup></i>
<b>Gulvvarme</b>	57 342	10,3
<b>+ Ventilasjonsvarme</b>	21 920	3,9
<b>+ Radiatorvarme</b>	44 800	8,0
<b>+ Varme til snøsmelting anlegg</b>	53 020	9,5
<b>+ Varmtvannsoppvarming</b>	40 948	7,3
<b>= Fjernvarme/ nærvarme</b>	218 030	39,1
<b>+ Elektrisitet</b>	203 734	36,5
<b>= Totalt energiforbruk</b>	<b>421 764</b>	<b>75,6</b>

#### 4.4 Ventilasjon

På Mesterfjellet skole kombineres den motoriserte vindusluftingen med et balansert ventilasjonsanlegg. Skolen er delt inn i soner, de ulike sonene baseres på en av de tre følgende ventilasjonsformene (Hansen, 2015b):

- VAV + vinduslufting
- VAV
- CAV

#### 4.4.1 Mekanisk ventilasjonsanlegg

Det mekaniske ventilasjonsanlegget er dimensjonert for en total luftmengde på 44 000 m<sup>3</sup> i timen. Et tilsvarende ventilasjonsanlegg uten vinduslufting er estimert til å ha en dimensjonerende luftmengde på 98 000 m<sup>3</sup> i timen (Hansen, 2015b).

Dimensjonerende luftmengde er altså neddimensjonert i overkant av 50 %. Lavere dimensjonerende luftmengde skyldes at en dimensjonerer luftmengder fra det mekaniske anlegget til soner med vinduslufting + VAV utfra luftkvalitetskrav på vinterstid. På sommerstid er det tenkt at man stort sett skal baserer seg på vinduslufting og at man dermed ikke trenger store luftmengder fra det mekaniske anlegget for å fjerne overskuddsvarme. Dette har gjort at man kan nedskalere komponenter i ventilasjonsanlegget, hvilket har vært både material- og plassbesparende. I trinnrommene er mekanisk tilluftsrist plassert ved gulv, mens avtrekk er plassert høyt i rommet, luftdistribusjonen er basert på fortrenningsventilasjon (Hansen, 2015a). Av tabell nedenfor kan en se nøkkelinfo fra det mekaniske ventilasjonsanlegget ved Mesterfjellet skole.

Tabell 4.3: Nøkkelinno fra det mekaniske ventilasjonsanlegget (COVENT, 2013)

Mekanisk ventilasjonsanlegg Mesterfjellet		
<b>Luftmengde</b>	44 000	m <sup>3</sup> /h
<b>Totalt trykkfall tilluft/ avtrekk</b>	701/ 671	Pa
<b>Roterende gjenvinner virkningsgrad</b>	81,5	%
<b>Spesifikk vifteeffekt (SFP)</b>	1,8	kW/ m <sup>3</sup> /s

#### 4.4.2 Vinduslufting

En stor andel av vinduene på Mesterfjellet er åpningsbare. Disse styres med styresystem fra firmaet WindowMaster. Her kommuniserer motorkontroller med integrerte kjedemotorer i vinduskarmen for å oppnå et kontrollert luftskifte. Åpningsgraden til vinduene angis prosentvis. Figur 4.2 viser et vindu med 100 % åpningsgrad, hvilket tilsvarer at hele kjedelengden på 24,5 cm er ute. De motoriserte vinduene er plassert høyt på veggen for å unngå at luften tilføres rett inn i oppholdssone. Vinduene er dessuten bunnhengslet som gjør at luften presses opp mot taket. Strategien her er at luften klebes til taket ved hjelp av coandaeffekten, før den faller ned i oppholdssone.

Etter planen med en temperatur og hastighet som ikke skaper avvik i termisk komfort (Hansen, 2015b).



Figur 4.2: Vindu med integrert kjedemotor, med maksimal åpningsgrad

#### 4.5 Styring og kontrollstrategi

WindowMaster systemet NV Advanced™ er brukt som styringssystem i de hybride sonene. Inneklimaet og utendørs værforhold overvåkes kontinuerlig og danner grunnlag for justering av ventilasjon. Styringen av vinduene gjøres på bakgrunn av vindtrykkoeffisienter for 16 forskjellige vindretninger. Disse er definert ut fra CFD-beregninger, vindretning og vindhastighet. Ønskede verdier for temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå brukes som parametere på inneklima. Utetemperatur, vindhastighet og -retning samt nedbør i forhold til fasade-/ åpningsretning brukes som parametere for utendørs værforhold. Et vindu kan for eksempel lukkes eller ha en begrenset åpningsgrad hvis det regner eller blåser for mye. Brukerne har dessuten mulighet til å manuelt overstyre vinduene. Systemet vil da skifte tilbake til automatisk drift etter en gitt periode.

##### 4.5.1 Kalendermoduler og driftsformer

Det er også mulig å definere ulike kalendermoduler. Disse kan settes opp til fastsatte tider ut fra årstid eller kan gis av ulike styringsparametere. De ulike driftsformene er (WindowMaster og BSI):

- **Styrt hybrid ventilasjon**

Vindu og spjeldåpninger reguleres avhengig av romtemperatur og CO<sub>2</sub>-verdi, samt utetemperatur, regn, vindhastighet og vindretning.

- **Pulsutlufting**

Vinduene åpnes kortvarig til definerte tider i løpet av dagen. Periodelengde, intervaller og åpningsgrad bestemmes på bakgrunn av inne- og uteklima, årstid samt rommets personbelastning.

- **Spalteventilasjon**

I kjøligere perioder åpnes vinduene og VAV spjeldene trinnvis for å sikre et kontrollert luftutskifte. Åpningsgrad justeres ut i fra CO<sub>2</sub>- og temperaturutvikling i rommet.

- **Komfortventilasjon**

Utenfor oppvarmingsperiodene styres vinduene fra 0- 100 % ut i fra temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå. På den måten kan man sikre store luftutskiftninger og en kjølede effekt på en energieffektiv måte.

- **Nattkjøling**

I varme perioder kan systemet anvendes til nattkjøling av bygningen.

Nattkjølingsprogrammet inneholder en optimeringsfunksjon som sikrer avkjøling av bygningens masse og inventar.

- **Frisk luft**

I perioder hvor det ikke anvendes nattkjøling, kan systemet sikre en sjokkutluftning av lokalene før brukerne kommer eller i definerte pauser.

#### **4.5.2 Vinter- og sommermodus**

NV Advance™ styres etter to driftsmodus tilpasset årstid, henholdsvis sommer- og vintermodus. Bestemmelse av driftsmodus skjer på bakgrunn av temperatur utvikling i rommet. En har et komfortsettpunkt som beskriver ønsket temperatur i rommet. Hvis temperaturen i rommet ligger under dette settpunktet over en gitt periode, vil systemet settes i vintermodus og varmpådrag vil starte. I vinterdrift benyttes hovedsakelig spalteventilasjon i brukstiden, vinduene åpner da gradvis ved CO<sub>2</sub>-nivå over 800 ppm (Hansen, 2015a). Åpningsgrad er da avhengig av utetemperatur for å unngå trekk. I vinterdrift får vinduene støtte fra det mekaniske ventilasjonsanlegget for utnyttelse av varmegjenvinner.

I tillegg har man et kjølesettpunkt, dette ligger typisk 1-2 grader over varmesettpunkt. Ligger temperaturen over kjølesettpunkt utover en definert periode så settes rommet i sommerdrift og kjøling starter. I sommerdrift benyttes hovedsakelig temperaturstyrt komfortventilasjon med overvåking av CO<sub>2</sub>-nivå, hvilket gir store luftskifter. Risikoen for trekk i denne driftsformen er minimal da utetemperaturen er høyere. Forskjellen mellom komfortsettpunkt og kjølesettpunkt er et såkalt dødbånd. En aksepterer en vandring mellom disse. De ulike sonene i bygget kan være i forskjellig modus samtidig. Dette fordi driftsmodus i hver enkelt sone bestemmes av temperaturutviklingen i den respektive sonen. Det kan oppstå midlertidig vinter-/ sommermodus dersom sonen får en rask og uventet over- eller undertemperatur (Hansen, 2015a). I både vinter- og sommerdrift benyttes det forhåndsinnstilte kalendermoduler med eksempelvis frisk luft ventilasjon på morgenen og pulsutlufting i friminutter.

#### **4.5.3 Sonestyring**

Mesterfjellet er delt inn i soner på romnivå. I hver enkelt sone kan verdier for ønsket temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå justeres individuelt. En kan også lage kalendermoduler tilpasset hver enkelt sone. Data som temperatur, CO<sub>2</sub>-nivå, relativ fuktighet og vinduenes absolutte åpningsposisjon er tilgjengelig fra hver sone og kan enkelt visualiseres og hentes ut fra bygningens SD-anlegg (sentralt driftskontrollanlegg).

#### **4.5.4 Styringssystem**

For styring på Mesterfjellet benytter man et KNX system. KNX er et åpent bussbasert styringssystem. KNX er godkjent som standard i Europa, USA og Kina i tillegg til internasjonal standard. KNX varemerket sikrer derfor samvirke og funksjonalitet mellom produkter fra ulike produsenter. De ulike bussenhetene utveksler informasjon igjennom KNX mediet som de alle er koblet opp mot. Bussenhetene kan enten være sensorer eller kontrollere for styring av bygningsutstyr som; belysning, persiener, sikkerhetssystemer, energistyring, oppvarming, ventilasjon og klimaanlegg, signalisering- og overvåkingssystemer etc. (KNX, 2014). På Mesterfjellet skole har man fra server-pc tilgang til overvåking og styring av blant annet vinduer, mekanisk ventilasjon, oppvarmingsanlegg og persiener

#### 4.6 Investeringskostnader

Det er av interesse å sammenligne investeringskostnadene for mixed-mode ventilasjonsløsninger med mekaniske ventilasjonsløsninger. I mixed-mode løsninger må man investere i både naturlig- og mekanisk ventilasjonsanlegg og man er også avhengig av et mer komplekst styringssystem. På den andre siden har man i slike løsninger mulighet for betydelig nedskalering av det mekaniske ventilasjonsanlegget. På Mesterfjellet skole er dimensjonerende luftmengde fra det mekaniske anlegget i overkant av 50 % lavere enn ved et tilsvarende anlegg bestående av ren mekanisk ventilasjon (Hansen, 2015b). Dette fører til at man kan nedskalere komponenter i det mekaniske ventilasjonsanlegget som er både plass- og materialbesparende. Mindre materialbruk samt mer effektiv arealutnyttelse er kostnadsbesparende. Generell erfaring fra Building System Integrator tilsier at investeringskostnadene til et mixed-mode ventilasjonsanlegg vil ligge på samme nivå som et komplett tilsvarende behovstyrt mekanisk anlegg med tilhørende SD-anlegg (Hansen, 2015a).

## 5 Målinger

---

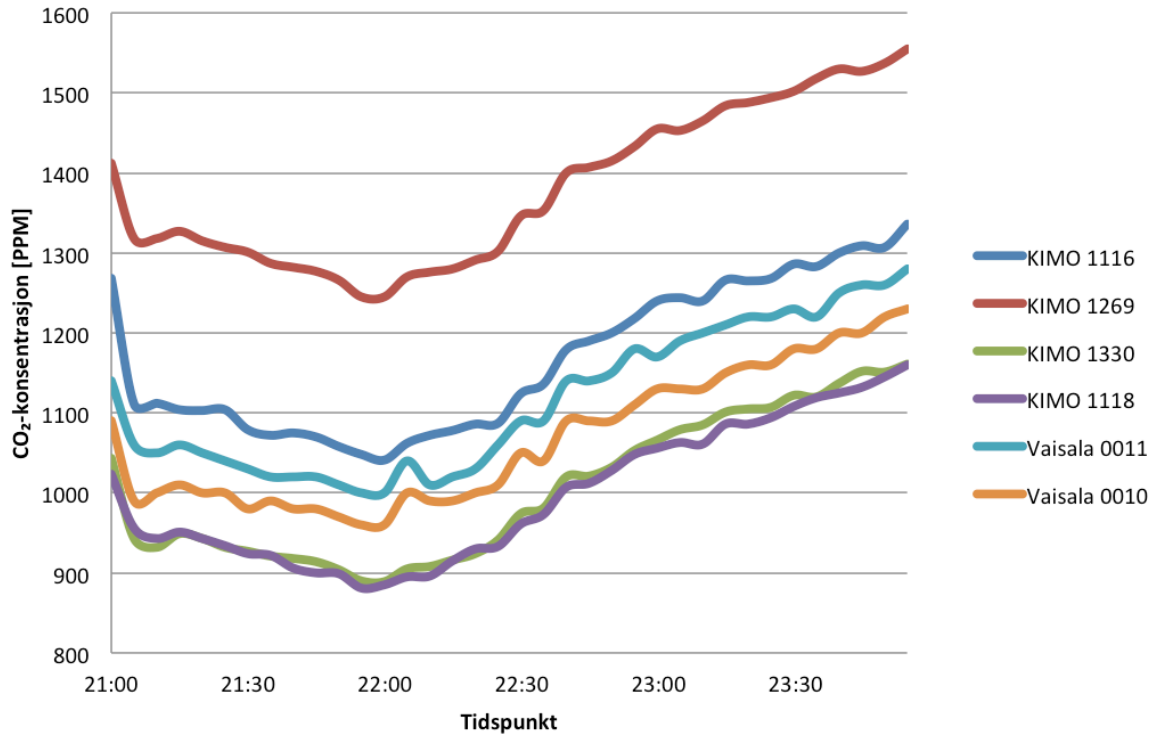
### 5.1 Forberedelser

Det ble foretatt tre besøk til Mesterfjellet skole henholdsvis 10.03, 13.03 og 10.04. Ved det første besøket gikk tiden med til å snakke med vedlikeholdstekniker samt lærer for klassen hvor målingene skulle utføres. Inspeksjon angående plassering av utstyr samt planlegging av måletidsrom ble også foretatt. Det ble utført dagsmålinger den 13.03 og den 10.04. Her ble det gjort målinger med hensyn på CO<sub>2</sub>-nivå, temperatur og lufthastighet, i tillegg ble tilstedeværelsesgrad logget. Det ble i tillegg utført temperaturmålinger i tidsrommet mellom 13.03 til 10.04.

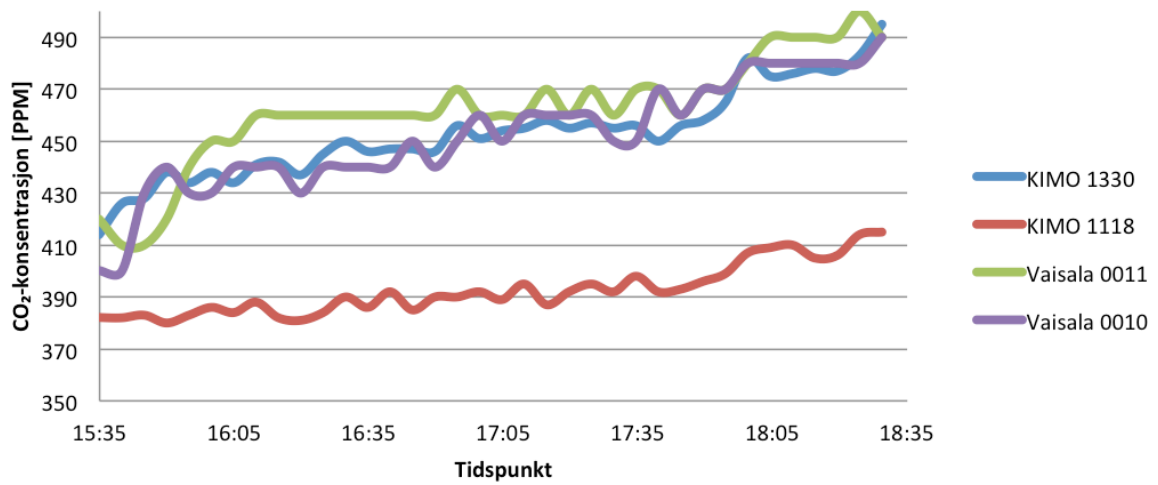
### 5.2 Måleutstyr og plassering

#### 5.2.1 CO<sub>2</sub>-målinger

For å måle CO<sub>2</sub>-konsentrasjon ble det benyttet målere av typen KIMO AQ 200 samt Vaisala M170 med GM70 prober. Da erfaringer fra andre studenter tilsa at det var lenge siden enkelte av målerne ble kalibrert, ble det foretatt prøvemålinger. Resultatet fra den første målingen kan sees av Figur 5.1. Denne ble gjennomført innendørs på et rom som ikke var i bruk. Man kan se at to av KIMO målerne 1330 og 1118 måler omtrent likt. De to Vaisala målerne måler også relativt likt, men ligger noe over nivået til KIMO 1330 og 1118. KIMO 1116 og 1269 lå over nivået til Vaisala målerne, disse ble ikke brukt i målinger ved Mesterfjellet skole. Det ble senere foretatt en ny prøvemåling av de fire målerne brukt for målinger ved Mesterfjellet skole. Denne gangen utendørs. Resultatene fra denne målingen kan sees av Figur 5.2. De to Vaisala målerne målte i likhet med KIMO 1330 her relativt likt CO<sub>2</sub>-nivå, mens KIMO 1118 målte et noe lavere CO<sub>2</sub>-nivå. Av Figur 5.3 kan det sees hvordan de fire målerne måler i forhold til hverandre ved de to forsøksmålingene. I målingene ved Mesterfjellet vil det ikke bli gjort noe korrigerings for å ta hensyn til denne variasjonen, men det tillegges en større usikkerhet til resultatene.

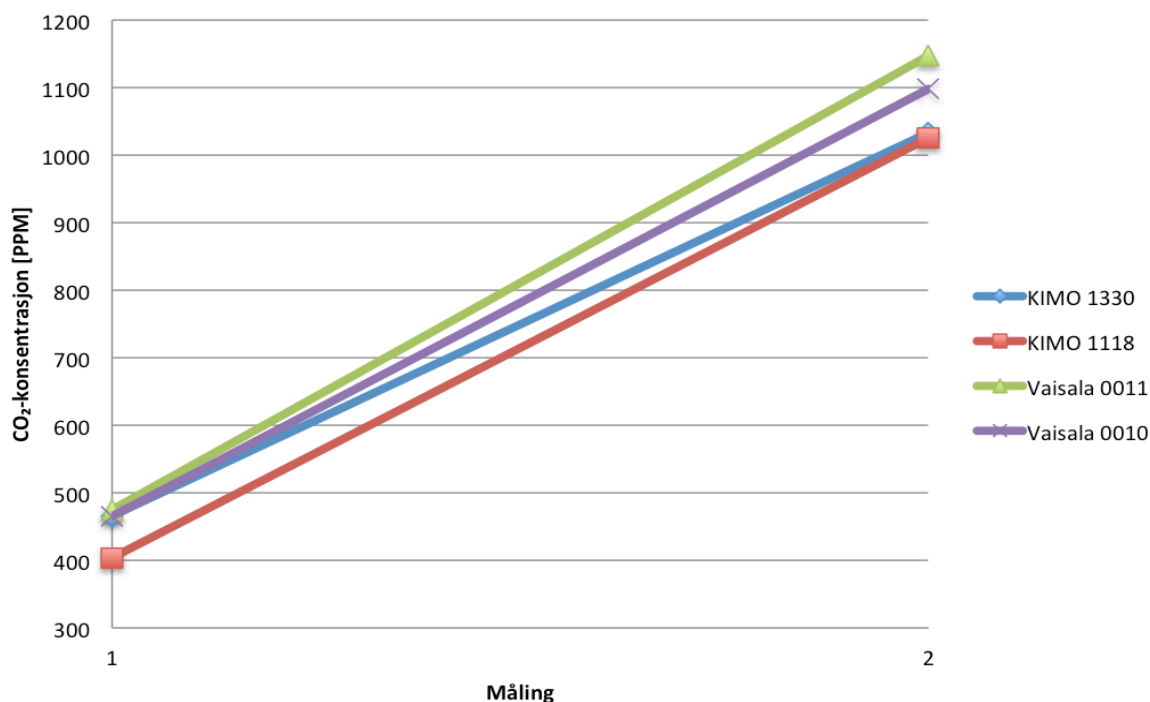


**Figur 5.1: Test CO<sub>2</sub>-målinger innendørs**



**Figur 5.2: Test CO<sub>2</sub>-målinger ute**





Figur 5.3: Variasjon av målt verdi av de forskjellige CO<sub>2</sub>-målerne ved måling ute =1 og måling inne =2

CO<sub>2</sub>-målinger gjennomføres når ventilasjon fungerer normalt. Når antall personer i rommet varierer, bør dessuten målingene utføres i slutten av perioder med stor personbelastning. Målepunktene bør ikke være plassert i nærhet av tilluftsventil eller vindu da luftfornyelsen på disse stedene er bedre enn i resten av rommet. Målepunkter for nær gulv må også unngås, da utåndingsluften stiger opp i rommet. Det bør generelt tilstrebes etter å gjennomføre målinger i oppholdssonen til de personene som oppholder seg i rommet (Folkehelseinstituttet, 2015).

CO<sub>2</sub>-målerne ble plassert ut fra dette. Det ble plassert en måler ved avtrekk og en ved sensoren til SD-anlegget. De to andre målerne ble plassert i oppholdssone. Den ene måleren ble plassert i høyde 1,6 meter over gulv, hvilket vil være i pustesonen til en stående person. Den andre ble plassert 1,1 meter over gulv. Målerne posisjon kan sees av planskisse i Vedlegg 7.

Usikkerheten til CO<sub>2</sub>-målerne blir beskrevet i de representative datablad. KIMO målerne har en usikkerhet  $\pm 50$  ppm eller 3 % av målt verdi i område fra 0 til 5000 ppm.

Vaisala målerne har en usikkerhet på av 2 % av målt verdi ved temperatur på 25 °C.

Kalibrering bør utføres en gang i året for å sikre avvik innen denne grensen. Kalibrering av KIMO målerne er ikke blitt foretatt siden 2011, mens det for Vaisala målerne er ukjent når sist kalibrering har funnet sted. En kan se av testmålingene at det er relativ stor spredning på resultatet. Det bør derfor tillegges en større usikkerhet enn det som er antydnet i datablad.

### **5.2.2 Temperaturmålinger**

For å måle lufttemperatur ble det benyttet 15 Thermochron iButton dataloggere. 7 av disse ble innstilt på å logge temperatur hvert andre minutt, disse ble brukt i dagsmålingene. De 8 andre ble innstilt til å logge temperaturen hvert 10 minutt. Disse var tilstede i klasserommet i tidsperioden mellom 13.03 til 10.04.

I følge (Byggforskserien, 1999) bør lufttemperaturen registreres midt i rommet 1,2 meter over gulv ved en persons arbeidsplass samt på steder hvor man erfaringsmessig har de høyeste og laveste temperaturene. Arbeid i klasserommet foregår i stor grad sittende. Temperaturer bør derfor måles i 0,1-, 0,6- og 1,1 meter over gulvet, hvilket svarer til en persons ankelhøyde, tyngdepunkt og hodehøyde.

Loggerne for dagsmålinger ble derfor hengt i en vertikal tråd i høyder på 0,1-, 0,6- og 1,1 meter over gulv. Det ble også tatt måling i en høyde 1,6 meter over gulv, som antas å være pustesonen til en stående person. Tråden ble hengt ved arbeidsstasjonene nærmest vindusfasaden. Dette fordi en her oftest opplever termisk ubehag. En annen logger ble hengt opp under en arbeidsstasjon midt i klasserommet. Temperaturen ble i tillegg målt ved avtrekk og over vindu. Plassering av loggerne for dagsmåling kan sees av Vedlegg 8.



Figur 5.4: Temperaturloggere brukt i dagsmålinger, festet i tråd i ulike høyder

Loggerne som ble liggende i klasserommet i beskrevet tidsperiode, ble gjemt for elevene. Dette fordi barn i denne alderen mest sannsynlig ikke lar måleutstyr ligge i fred. Loggerne ble her hengt opp på vegg ved lærers arbeidsstasjon i 0,1-, 0,6- og 1,1 meters høyde. Loggere ble også hengt opp ved avtrekk og SD-anleggets temperatur sensor. I tillegg ble loggere hengt opp ved arbeidsstasjon under vindu i høyder på 0,1-, 0,6- og 1,1 meter over gulv. Skisser av loggerens plassering kan sees av Vedlegg 9.

Loggerne ble innstilt med en usikkerhet på  $\pm 0,5$  °C fra -10 °C til 65 °C. Ved denne nøyaktigheten har hver logger datalagringskapasitet til 8000 logger.

### 5.2.3 Målinger av lufthastighet

For måling av lufthastighet ble to apparater av typen VelociCalc plus TSI 9555 benyttet. Ved målingen 13 mars ble det benyttet en eldre modell. Denne modellen hadde ingen god måte å måle luftens gjennomsnittshastighet. Det ble derfor kun målt hvilket hastighetsintervall lufthastigheten varierte over. Ved målinger den 10.04 ble det benyttet en nyere versjon av VelociCalc apparatet. Dette apparatet hadde mulighet for måling av gjennomsnittshastighet samt maksimal- og minimalhastighet. Begge

apparatene ble innstilt med en tidskonstant på 1 sekund. Den 13.03 ble lufthastigheten målt i 14 punkter, der den største tettheten av målepunkter var i nærhet til vindu. Da dette var noe tidskrevende og forstyrrende for undervisningen, var det ønskelig å redusere antall målepunkter den 10.04. Det ble da benyttet en røykappull for å få et innblikk i luftstrømningen i trinnrommet. Det ble utfra dette satt opp 5 punkter som var kritiske med tanke på høy lufthastighet. Oversikt over målepunkter av lufthastighet de to dagene kan sees av Vedlegg 10. Målingene ble i hvert punkt utført i 0,1- og 1,1 meters høyde, hvilket tilsvarer ankel- og hode høyde for en sittende person. Måleperioden i hvert punkt var 3 minutter. Det ble utført målinger i 2 tidsintervaller. Det første med personer tilstede og vindusåpning styrt etter NV Advance™. Andre tidsintervall var etter skoletid uten andre personer tilstede i rommet. Vindusåpningene ble da manuelt overstyrt til full åpning.

Apparatene har i følge brukermanual en usikkerhet på  $\pm 1,5\%$  ved en lufthastighet på 10 m/s. Det anbefales også årlig kalibrasjon. Det er ikke kjent når den eldste modellen av VelociCalc sist ble kalibrert, men den nyere modellen ble kalibrert i 2014.

#### **5.2.4 Tilstedeværelse målinger**

Måling av hvor mange personer som var tilstede i tidsrommet dagsmålingene fant sted, ble utført ved opptelling og logging av personer tilstede i et Excel ark hvert 5 minutt.

#### **5.2.5 Målefeil**

Så å si alle målinger har målefeil og usikkerhet. En kan grovt sett dele inn målefeilene i følgende tre hovedtyper (Novakovic et al., 2007):

- Grove feil  $U_G$ . Feil av denne typen kan være avlesningsfeil, ombytting av tall, feilplassering av komma og så videre. Denne type feil skyldes som oftest manglende oppmerksomhet eller slurv.
- Systematiske feil  $U_S$ . Disse feilene kan skyldes hysteresis og friksjon i måleinstrumentet, ukalibrerte instrumenter, feilaktig utført måling eller bruk av feil funksjonssammenheng. Feil av denne typen kan både skyldes måleinstrument og operatør. Når en kartlegger systematiske feil skiller en derfor mellom instrument- og metodefeil.

- Tilfeldige feil  $U_T$ . Denne typen feil kan skyldes dårlig oppløsning på analoge eller digitale instrumenter, utilfredsstillende måledynamikk eller eksterne usystematiske påvirkninger.

Det er viktig at grove feil og metodefeil reduseres til et minimum, da denne typen feil ikke forsvinner ved gjentatte målinger. Etter eliminasjon av grove og systematiske feil, vil gjentatte målinger gi verdier spredt rundt sann verdi (Novakovic et al., 2007).

### 5.3 Trinnrom

Målinger ble utført i trinnrom 24A i 4 etasje, hos klasse 6A. Trinnrommet har 3 vinduer, som alle vender mot sør. 2 av disse er åpningsbare, med integrert kjedemotor for automatisk styring. De andre veggene i rommet grenser mot tilstøtende soner. I trinnrommet er det lagt gulvbelegg av linoleum oppå dekket av betong. Det er nedsenket himling og innerveggene er utført i henholdsvis granspiler og fibergips. Både tilluft og avtrekk var lokalisert på motstående vegg for vinduene. Nøkkeldata om rommet kan sees av tabellen nedenfor.

Tabell 5.1: Nøkkelfo om trinnrom

Nøkkelfo om trinnrom	
<b>Lengde x bredde x høyde</b>	8 x 7 x 3,2 m
<b>Gulv areal</b>	56 m <sup>2</sup>
<b>Volum</b>	180 m <sup>3</sup>
<b>Vindu åpningsbart type 1</b>	Bredde x høyde = 1,2 x 1,2 m    Areal = 1,44 m <sup>2</sup>
<b>Vindu åpningsbart type 5</b>	Bredde x høyde = 2,4 x 2,4 m    Areal = 5,76 m <sup>2</sup>
<b>Vindu fast type 3</b>	Bredde x høyde = 1,8 x 1,8 m    Areal = 3,24 m <sup>2</sup>
<b>Dimensjonert brukerbelastning</b>	30 personer
<b>Solavskjerming</b>	Utvendig screen
<b>Ventilasjon</b>	VAV + vinduslufting

## 5.4 Timeplan

Dagsmålingen ble utført i perioden fra 08.00 til 12.30. Klassens timeplan kan sees av Tabell 5.2. Elevene var nysgjerrige på utstyret, men lot det henge i fred. I friminuttene måtte elevene ut, trinnrommet ble dermed tømt. De siste timene av dagen hadde elevene svømming, de møtte da opp i trinnrommet for samlet avgang til svømmehall.

Tabell 5.2: Timeplan for 6A, fredag 13 mars

Timeplan 6A	
08.30- 09.30	Fremføring
09.30- 09.50	Friminutt
09.50- 11.20	Norsk
11.20-12.00	Friminutt
12.00- 12.15	Oppmøte og avgang til svømmehall

## 5.5 SD-anlegg

Som tidligere beskrevet registreres data individuelt for sonene på en server-pc. Målinger av temperatur, CO<sub>2</sub>-nivå og relativ fuktighet i de ulike sonene skjer ved hjelp av en sensor. I trinnrom 24A var denne sensoren plassert på motstående vegg til vinduene om lag 1,6 meter over bakken. Sensoren var imidlertid plassert rett i mellom tilluftsrist og døren ut til gangen, som vist av Figur 5.5. Dette er en uheldig plassering. Tilluften skal i utgangspunktet ha lavere temperatur enn romtemperaturen og dermed synke ned mot gulvet etter å ha strømmet ut gjennom tilluftsristen. I perioder der døren står oppe vil strømningsbildet forandre seg grunnet trykkforskjeller mellom sonene. Det er da fare for at tilført luft vil strømme via sensor og ut døren. Målte verdier i sensor vil da gi et feil bilde av hvordan inneklimate i rommet er.



**Figur 5.5: Sensor plassering i trinnrom 24A**

Sensorens usikkerhet er henholdsvis  $\pm 120$  ppm,  $\pm 250$  ppm og  $\pm 300$  ppm i de respektive CO<sub>2</sub>-intervallene 300- 1000 ppm, 1000- 2000 ppm og 2000- 5000 ppm. Sensorens usikkerhet ved temperatur målinger er  $\pm 1$  °C, mens ved målinger av relativ fuktighet er usikkerheten  $\pm 5$  % (THEBEN). Informasjon om åpningsgraden til vinduene registreres ved hjelp av motorkontroller. Målinger av værdata fra værstasjon på taket registreres også i server-pc-en.

CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur fra sensor i trinnrommet for de to måledagene er blitt hentet ut. Dette for å sammenligne disse dataene opp mot målte verdier. I tillegg er sensorens målinger av relativ fuktighet hentet ut. Informasjon om vinduernes åpningsgrad samt værdata for de aktuelle måledagene er også innhentet.





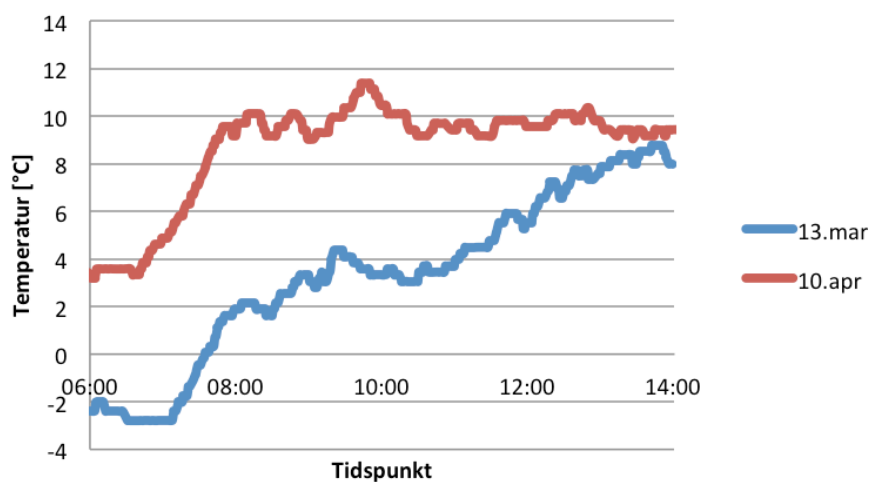
## 6 Resultat målinger

---

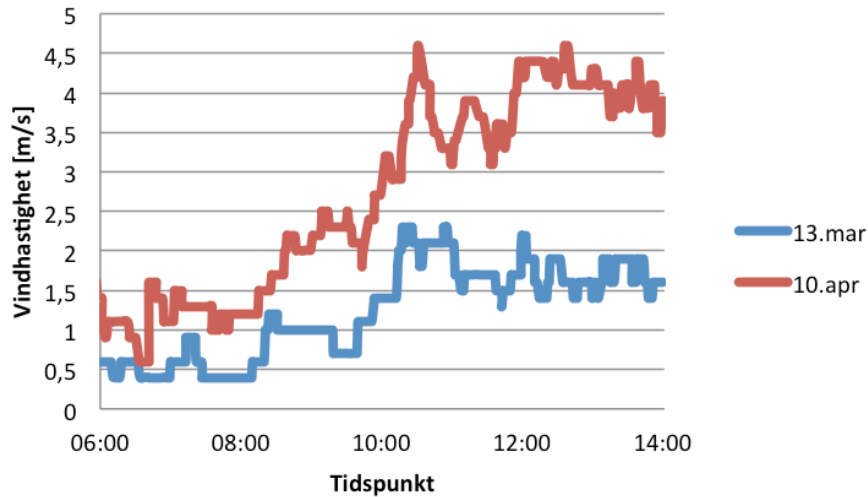
Resultatene som presenteres her er et utvalg av målingene som er blitt utført. I tillegg vil beskrevet data fra bygningens SD-anlegg presenteres. I Vedlegg 11 til 13 presenteres det et bredere utvalg av resultater fra målingene. Det er resultatene presentert i dette kapittelet som vil bli tatt utgangspunkt i ved diskusjon og konklusjon.

### 6.1 Værdata

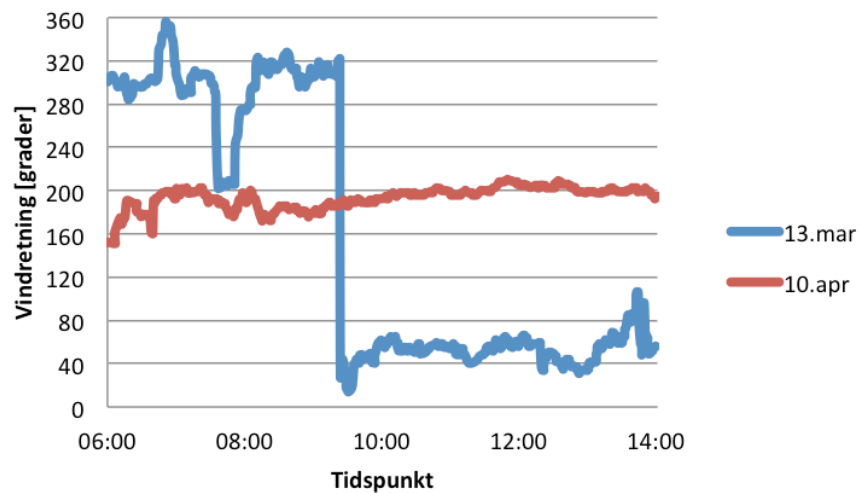
Både den 13 mars og 10 april var regnfrie dager. Utetemperatur, vindhastighet og vindretning i måleperioden kan sees av figurene under. Disse dataene er hentet fra bygningens SD-anlegg og er registrert av værstasjon på taket av skolen.



Figur 6.1: Utetemperatur i måleperioden 13 mars og 10 april



Figur 6.2: Vindhastighet i måleperioden 13 mars og 10 april

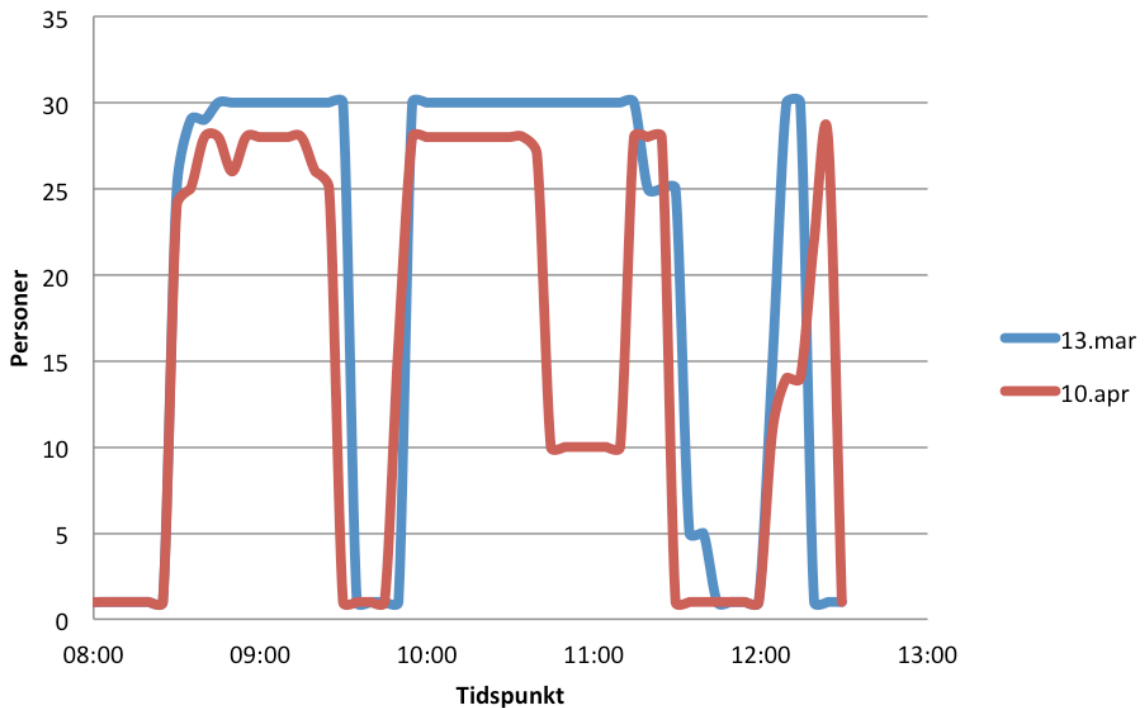


Figur 6.3: Vindretning i måleperioden 13 mars og 10 april. Nord = 0 grader, vest = 270 grader, sør = 180 grader og øst = 90 grader

Det kan sees at temperaturen på morgenen er en del lavere den 13 mars enn den 10 april, men at den gradvis stiger slik at den ved slutten av perioden er relativ lik. Den 10 april er det mer vind enn 13 mars. Vindretningen er denne dagen fra sør, mens den 13 mars varierer vindretningen fra nord-vest på morgenen til nord-øst på formiddagen.

## 6.2 Tilstedeværelse

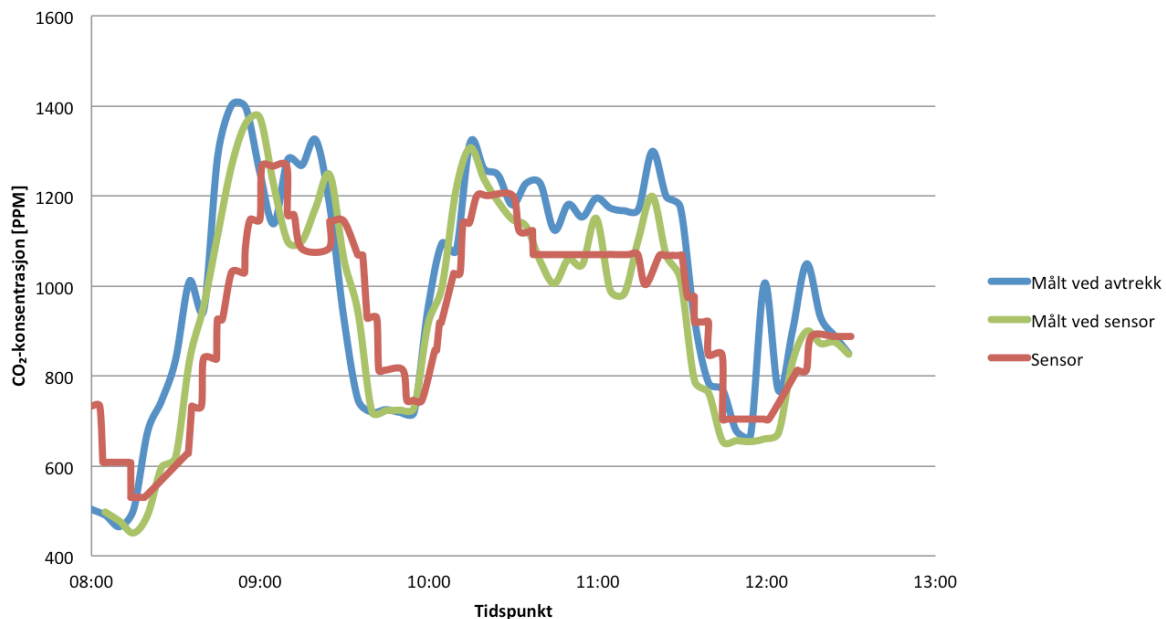
Antall personer tilstede i trinnrommet for de to datoene kan sees av Figur 6.4. Elevene hadde som beskrevet i Tabell 5.2 pause mellom 09:30-09:50 og 11:20-12:00. Den 10 april holdt elevene på med gruppearbeid i timen før langfri, de fikk derfor jobbe andre steder enn i trinnrommet. Aktivitetsnivået til elevene var sittende rolig arbeid, mens bekledningsnivået var standard innendørs bekledning.



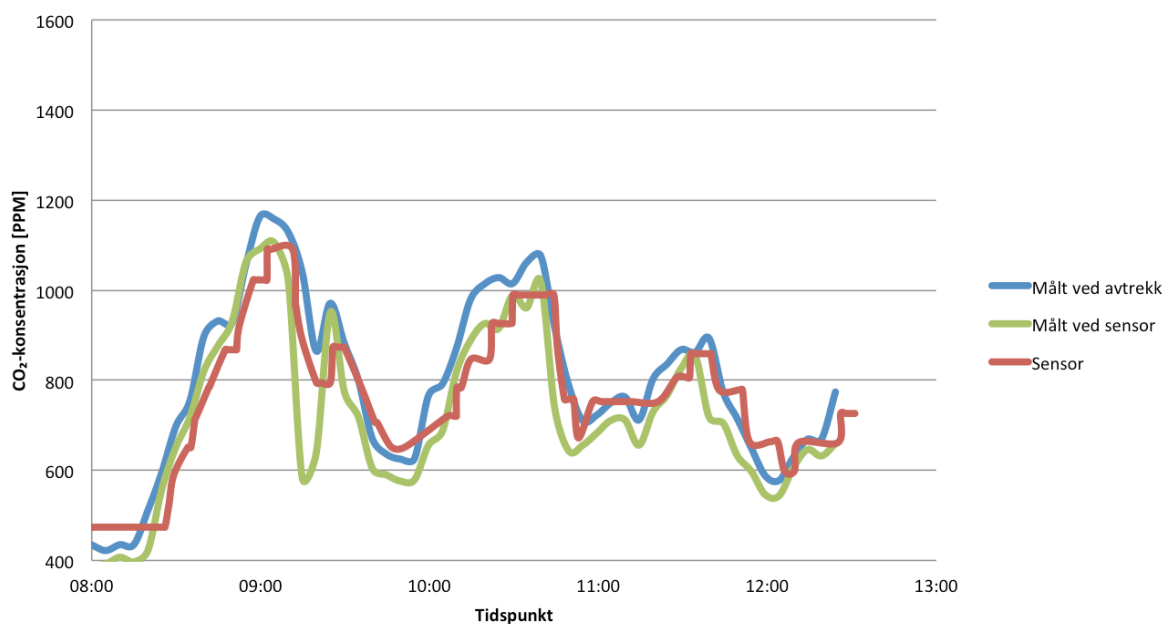
Figur 6.4: Antall personer tilstede i trinnrom i måleperioden 13 mars og 10 april

## 6.3 CO<sub>2</sub>-nivå

CO<sub>2</sub>-målinger for 13 mars og 10 april ved henholdsvis sensor og avtrekk presenteres henholdsvis i Figur 6.5 og Figur 6.6. I tillegg vises målinger fra sensor for sammenligning. I Vedlegg 11 er målingene fra alle CO<sub>2</sub>- målerne presentert.



**Figur 6.5: CO<sub>2</sub>-målinger 13 mars**



**Figur 6.6: CO<sub>2</sub>-målinger 10 april**

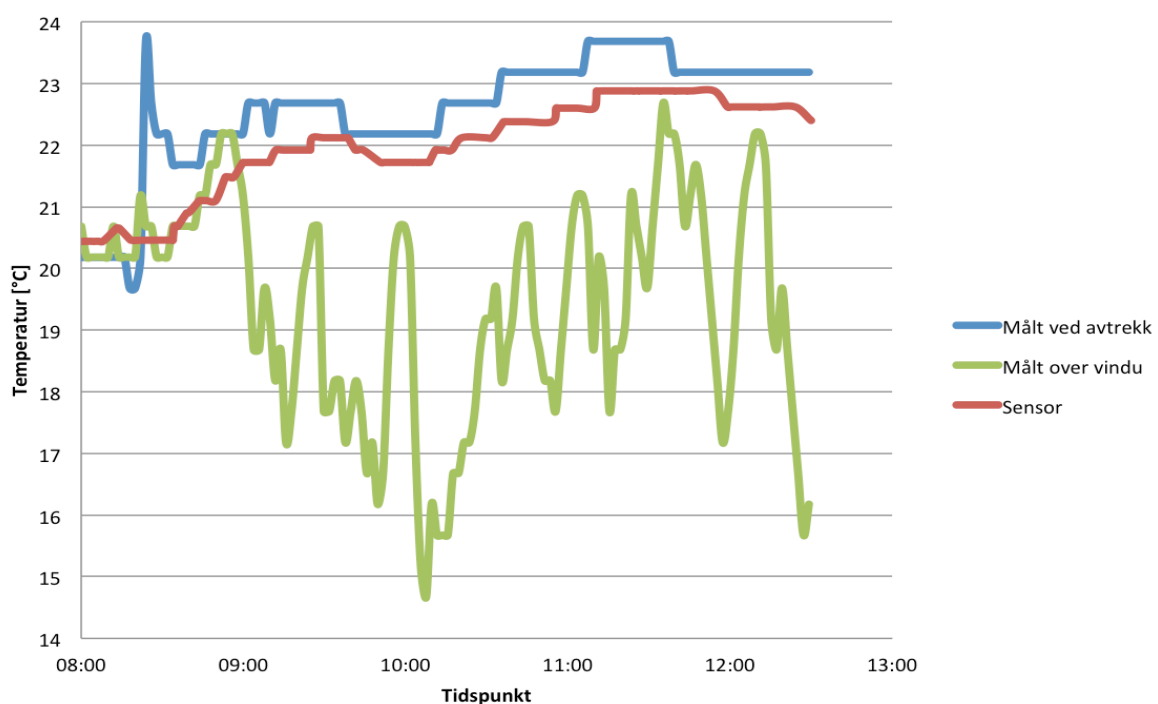
Som tidligere beskrevet må det tillegges CO<sub>2</sub>-målingene en ekstra usikkerhet, da det var lenge siden apparatene var kalibrert. Målingene fra sensoren har også relativ stor usikkerhet, henholdsvis  $\pm 120$  ppm og  $\pm 250$  ppm i CO<sub>2</sub>-intervallene 300- 1000 ppm og 1000- 2000 ppm. Denne usikkerheten kan sees ved å sammenligne målt verdi ved

sensor og sensorverdi. Trendene følges men nivået varierer noe. Ut fra målingene kan det også sees at sensoren har en liten tidsforsinkelse.

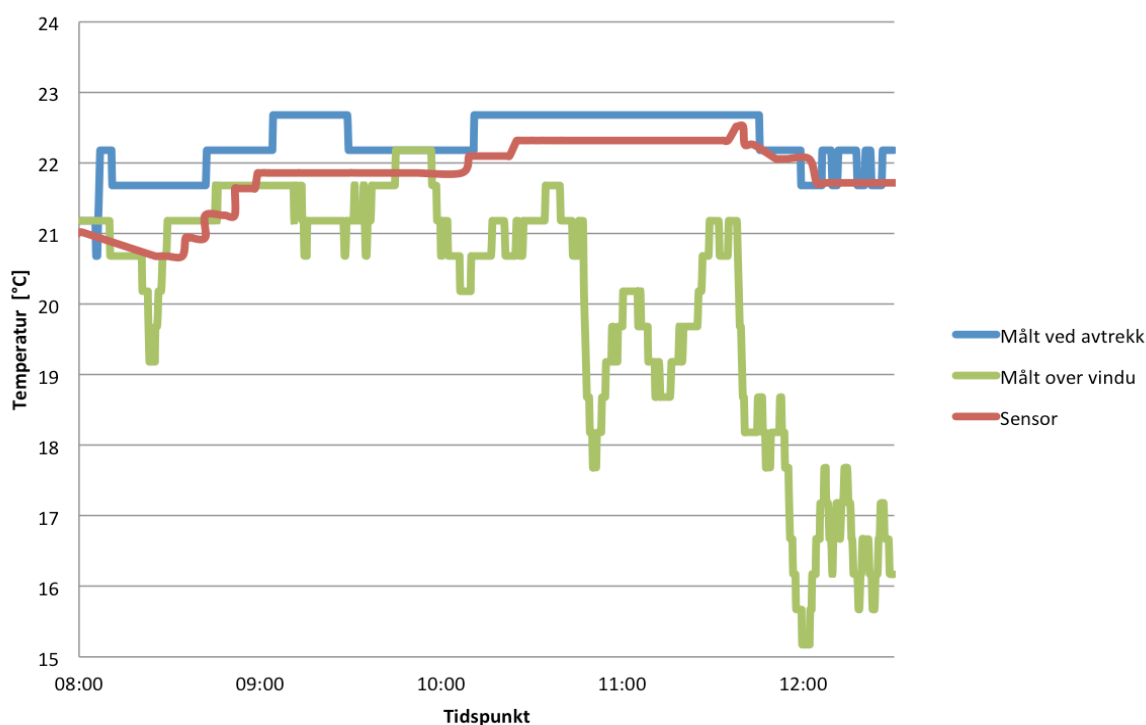
Selv om både målte verdier og sensorverdier har relativt stor usikkerhet kan det konkluderes med at CO<sub>2</sub>-nivået i perioder overstiger anbefalt verdi på 1000 ppm. Dette gjelder særlig den 13 mars, her er nivået store deler av dagen over 1000 ppm. I pausene mellom 09:30-09:50 og 11:20-12:00 synker nivået betraktelig, da elevene forlater trinnrommet. Grunnen til at det er et høyere CO<sub>2</sub>-nivå den 13 mars skyldes i viss grad at det denne dagen er en jevnt over høyere brukerbelastning, se Figur 6.4. Samtidig så er det en større grad av vinduslufting den 10 april enn 13 mars, mens det den 13 mars er større grad av støtte fra mekanisk ventilasjon. Dette presenteres og diskuteres nærmere i Kapittel 6.7.

#### 6.4 Temperatur

Temperaturmålinger for begge måledagene presenteres her. Figur 6.7 og Figur 6.8 viser målingene fra temperaturlogger ved avtrekk og over vindu, samt målinger fra sensor. Fra Vedlegg 12 kan målinger fra uken 16- 22 mars sees. Temperaturen fra denne målingen er stor sett i område 19- 23 °C. Unntaket er korte perioder med lavere temperaturer, men disse er målt utenfor skolens åpningstid.



Figur 6.7: Temperaturmålinger 13 mars

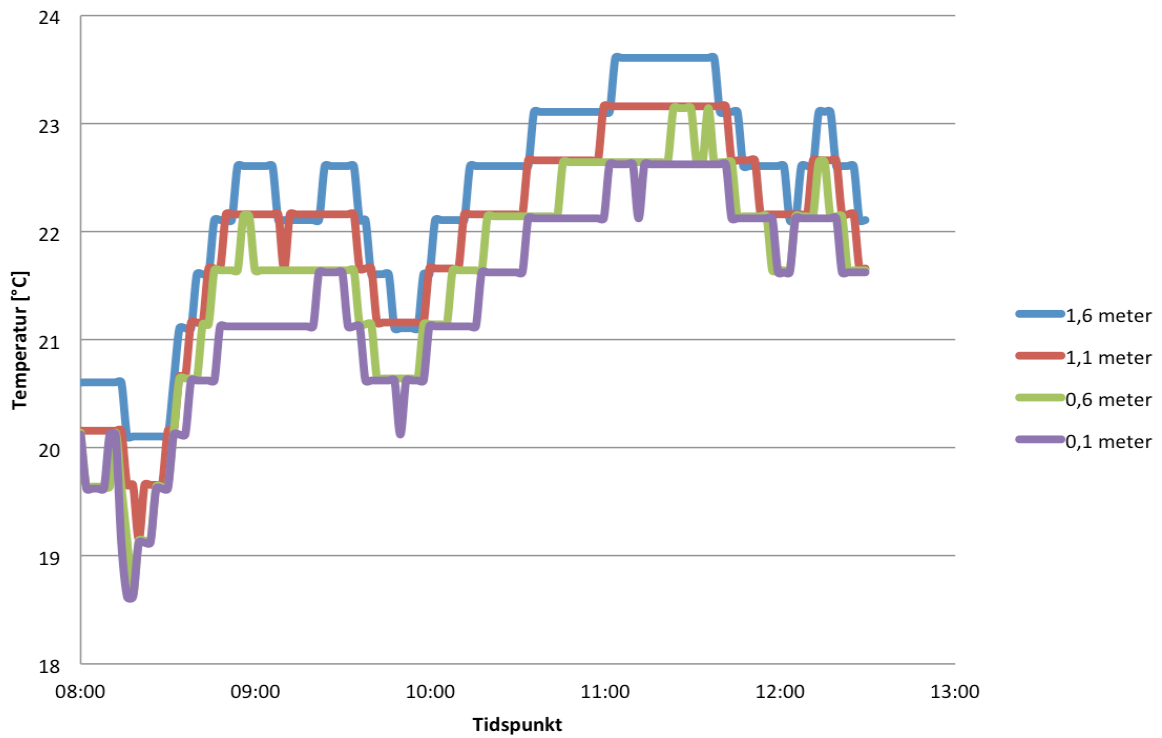


Figur 6.8: Temperaturmålinger 10 april

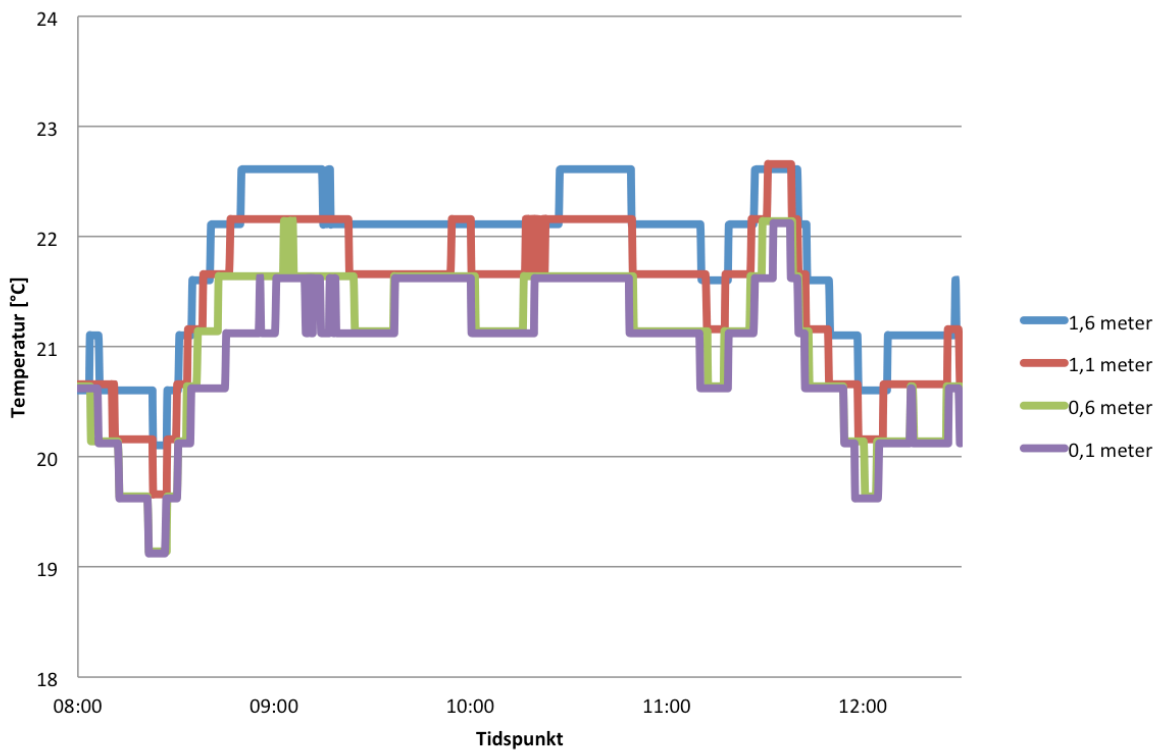
Det kan sees at temperaturen, målt av sensor for begge dagene stort sett er under temperaturen målt ved avtrekk. Sensoren er plassert ca. 1,5 meter under avtrekket. Dette er derfor som forventet, da luften vil bli oppvarmet og dermed stige opp, for så å trekkes ut gjennom avtrekk. Det ble tidligere uttrykt bekymring vedrørende sensorens plassering mellom tilluftsrist og dør, i forhold til å gi et riktig bilde av inn klimaet i rommet. Den 13 mars var imidlertid døren stengt, mens den 10 april var mekanisk ventilasjon lite i bruk se Figur 6.13. En kan derfor ikke ut fra temperatur- og CO<sub>2</sub>-målingene disse dagene si at sensoren gir et riktig bilde av rommets inn klima for hele året. Når en sammenligner måledata fra sensor og temperaturloggere må det også tas i betraktning at sensoren har en usikkerhet på  $\pm 1$  °C, mens temperaturloggernes usikkerhet er på  $\pm 0,5$  °C. Temperaturen over vinduet varierer relativt mye. Denne luften tilføres direkte til oppholdssonen.

Av Figur 6.9 og Figur 6.10 kan en se resultat fra temperaturloggere for henholdsvis 13 mars og 10 april. Temperaturloggerne ble hengt på tråd i ulike høyder over gulvet i

brukernes oppholdssone. Trådens plassering var med arbeidsstasjoner ved vindu, se Vedlegg 8.



Figur 6.9: Temperaturmålinger 13 mars, temperaturloggere hengt i tråd i ulike høyder over gulv



Figur 6.10: Temperaturmålinger 10 april, temperaturloggere hengt i tråd i ulike høyder over gulv

Fra elevene ankommer rommet 08:30 til de er ferdige med skoledagen 12:30 varierer temperaturen i området mellom 19 °C til 23,5 °C. Dette er i utgangspunktet innenfor akseptabelt område. Likevel tilsa tilbakemeldinger fra elevene samt personlige erfaringer at det opplevdes kaldt å sitte ved arbeidsstasjonene ved vindusrekken begge dagene. Figur 6.7 og Figur 6.8 tyder på at temperaturen på luften som tilføres oppholdssonen fra vinduene er svært variabel og i perioder noe lav.

Temperaturloggerne kan ha problemer med å registrere hurtige temperatursvingninger da materialet i loggeren skal endre temperatur. Dette kan være grunnen til at temperaturloggerne i oppholdssonen ikke gir noen indikasjon på lav temperatur.

Luftmengden fra vinduene vil varierer relativt mye, grunnet vindforhold.

Tilbakemeldingene gikk på at det opplevdes kaldt, og at det periodevis var trekk fra vinduene. Dette skyldes antagelig at temperaturen på tilluften ikke ble tilstrekkelig varmet opp før den kom i kontakt med brukerne. En annen grunn til trekkførmelse er høy lufthastighet.

## 6.5 Lufthastighet

Som beskrevet var det mangelfullt med funksjoner for måling av gjennomsnittslufthastighet på apparatet brukt den 13 mars. Målingen som presenteres her er fra den 10 april, her ble både maksimal og minimal lufthastighet registrert, samt luftens gjennomsnittshastighet. Ut fra Formel 3.2 ble også turbulensintensiteten utregnet. Tabell 6.1 beskriver resultatene av målingene gjort med tilstedeværelse av elever og vindusåpning styrt etter NV Advance™. I Vedlegg 13 kan resultatet av målingene som ble gjort uten tilstedeværelse av elever og med vinduer overstyrt til maksimal åpningsgrad sees. Målepunktene plassering kan som beskrevet sees i Vedlegg 10.



Tabell 6.1: Lufthastigheter målt den 10 april, med tilstedeværelse av elever og styring etter NV Advanced™

Målepunkt	Høyde [meter]	Minimal lufthastighet [m/s]	Maksimal lufthastighet [m/s]	Gjennomsnitts lufthastighet [m/s]	Turbulens intensitet [%]
1	0,1	0,01	0,20	0,11	41
1	1,1	0	0,32	0,08	93
2	0,1	0,01	0,34	0,16	49
2	1,1	0	0,20	0,07	72
3	0,1	0	0,56	0,20	77
3	1,1	0	0,21	0,05	104
4	0,1	0,01	0,31	0,17	47
4	1,1	0	0,25	0,13	52
5	0,1	0	0,16	0,07	86
5	1,1	0	0,16	0,06	84

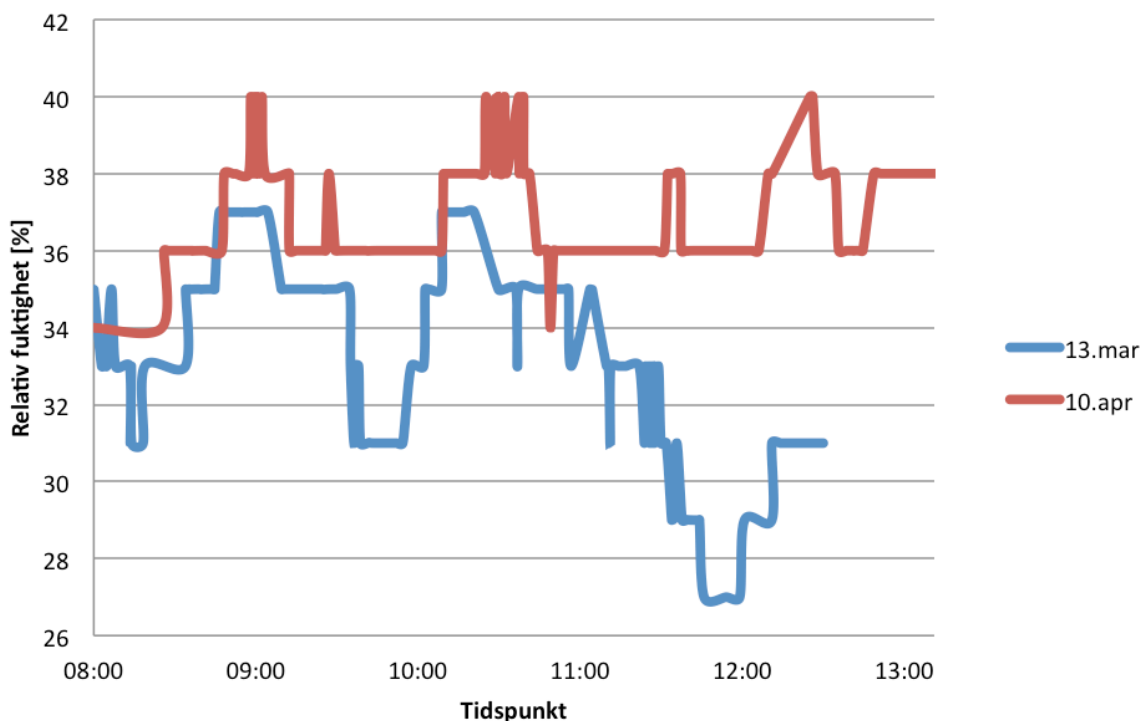
Det kan sees av tabellen at flere av verdiene overskrider grensen for anbefalt maksimumslufthastighet presentert i Tabell 3.3. Ved punktene nær vinduet (1 til 3), samt i punkt 4 midt i trinnrommet, overstiger maksimallufthastighet anbefalte verdier for bygninger i både kategori 1, 2 og 3. Normalt intervall for turbulensintensitet er som tidligere beskrevet mellom 30- 60 % for mekanisk omrøringsventilasjon. I naturlig ventilerte rom og rom med fortrengningsventilasjon er intervallet lavere.

Turbulensintensiteten i trinnrommet er langt høyere enn normalt. Dette vil ha innvirkning på trekkførmelsen og føre til en høyere andel misfornøyde. Problemer med trekk var noe elever og lærere gav tilbakemelding på. Dette var særlig problematisk ved arbeidsstasjoner langs vindusraden. Målinger fra 13.03 kan sees av Vedlegg 13.

Lufthastigheten var ved disse innenfor anbefalt grense. Denne dagen var vindretningen som vist i Figur 6.3 på nord-vest og nord-øst. Dette medfører at vinduene i trinnrommet som ligger mot sør vil bli liggende i le , i motsetning til den 10 april da vindretningen var fra sør. Det er grunn til å være noe skeptisk til lufthastighetsmålingene presentert i Vedlegg 13 fra den 13 mars, da det også denne datoen var tilbakemeldinger fra elever samt personlige opplevelser med trekk. Apparatet som ble brukt denne datoen var en eldre modell og det er uvisst når apparatet sist ble kalibrert.

## 6.6 Relativ fuktighet

Figur 6.11 viser målinger av relativ fuktighet de to måledagene. Disse er som beskrevet hentet ut av bygningens SD-anlegg og registreres av sensor i rommet.



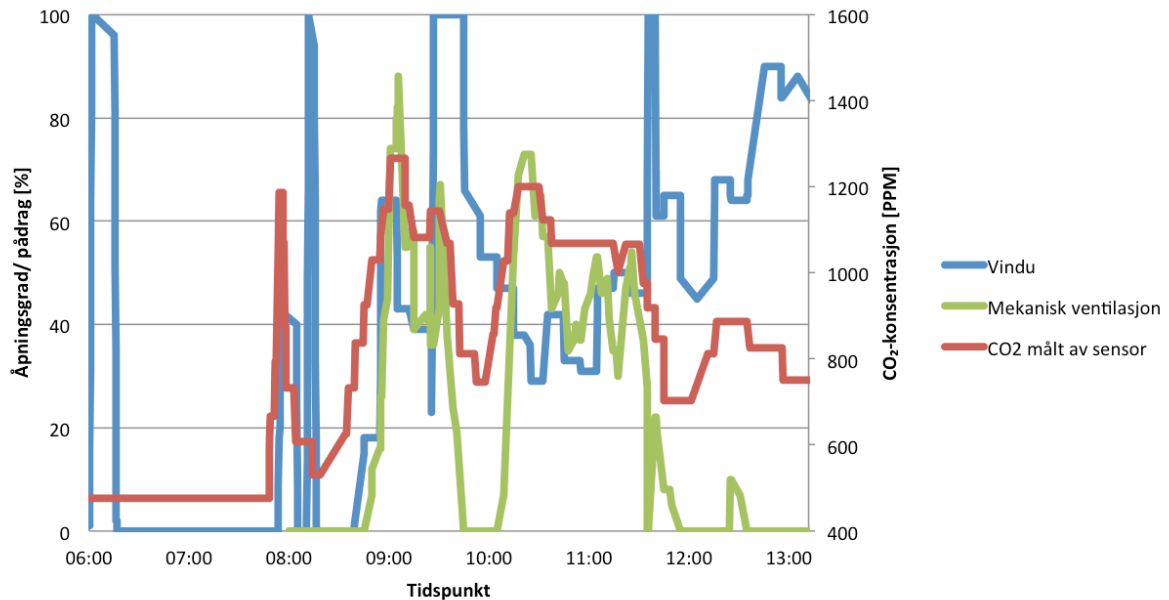
Figur 6.11: Relativ fuktighet i måleperioden 13 mars og 10 april

Det kan sees at relativ fuktighet disse dagene er innenfor området 27- 40 %. Dette er innenfor anbefalt nivå. En kan ikke ut fra dette konkludere med at bygningen tilfredsstiller kravene til de ulike bygningskategoriene, presentert i Tabell 3.4. Da grenseverdiene som danner grunnlag for disse kravene skal måles henholdsvis de kaldeste og varmeste månedene.

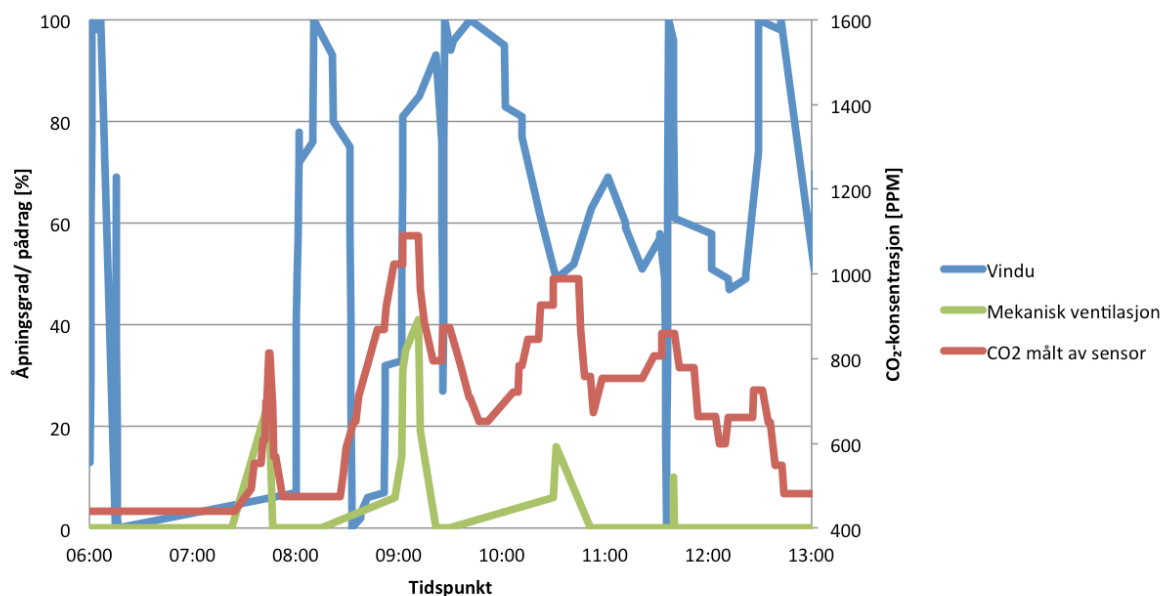
## 6.7 Naturlig- og mekanisk ventilasjon

Det er for trinnrommet hentet ut data om vinduenes åpningsgrad, samt åpningsgraden til VAV-spjeld i det mekaniske ventilasjonsanlegget. Disse er angitt i %. En vindusåpningsgrad på 100 % tilsvarer maksimal åpning, altså er hele kjedelengden på 24,5 cm ute som vist i Figur 4.2. VAV-spjeldene brukt ved Mesterfjellet skole er av typen LEO fra TROX Auranor. Disse har lineær strømningskarakteristikk, slik at ved eksempelvis 50 % åpningsgrad vil 50 % av maksimalt dimensjonert luftmengde tilføres trinnrommet. Man kan altså si at relativ åpningsgrad til VAV-spjeldene beskriver det

mekaniske ventilasjonsanleggets relative pådrag i trinnrommet. Data fra begge måledagene presenteres her. Vinduene og VAV-spjeld i det mekaniske ventilasjonsanlegget styres i stor grad av CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur fra sensoren i trinnrommet. CO<sub>2</sub>-nivået målt av sensoren er derfor lagt inn i Figur 6.12 og Figur 6.13 mens sensorens temperaturmålinger er lagt inn i Figur 6.14 og Figur 6.15.

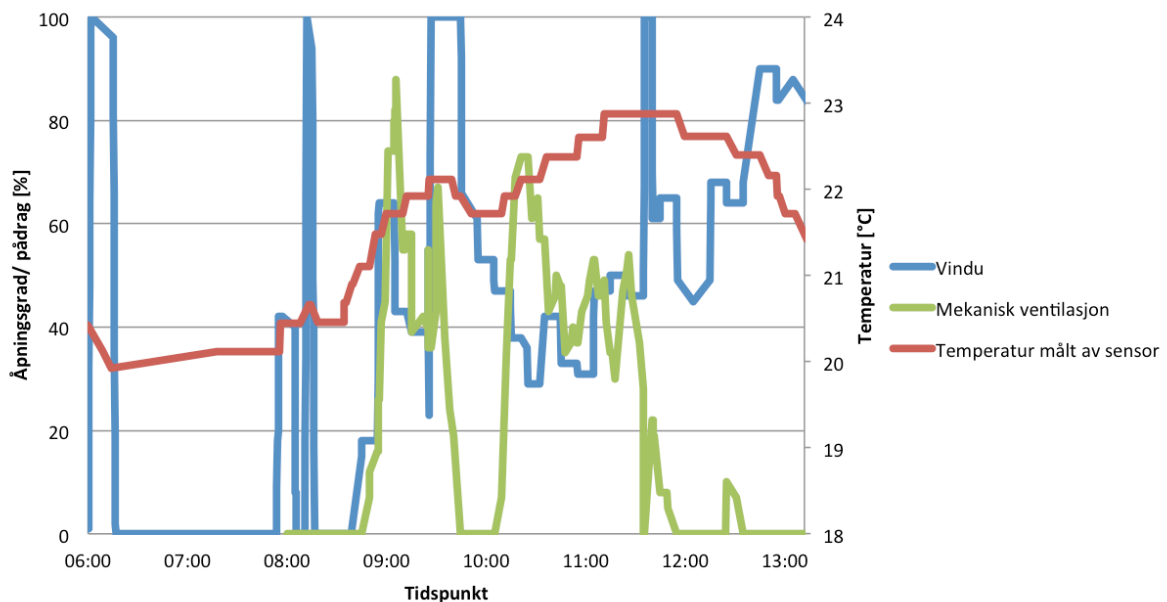


**Figur 6.12:** Relativ åpningsgrad for vindu og relativt pådrag på mekanisk ventilasjon på y-akse til venstre. CO<sub>2</sub>-nivå målt av sensor på y-akse til høyre. I gitt tidsrom den 13 mars

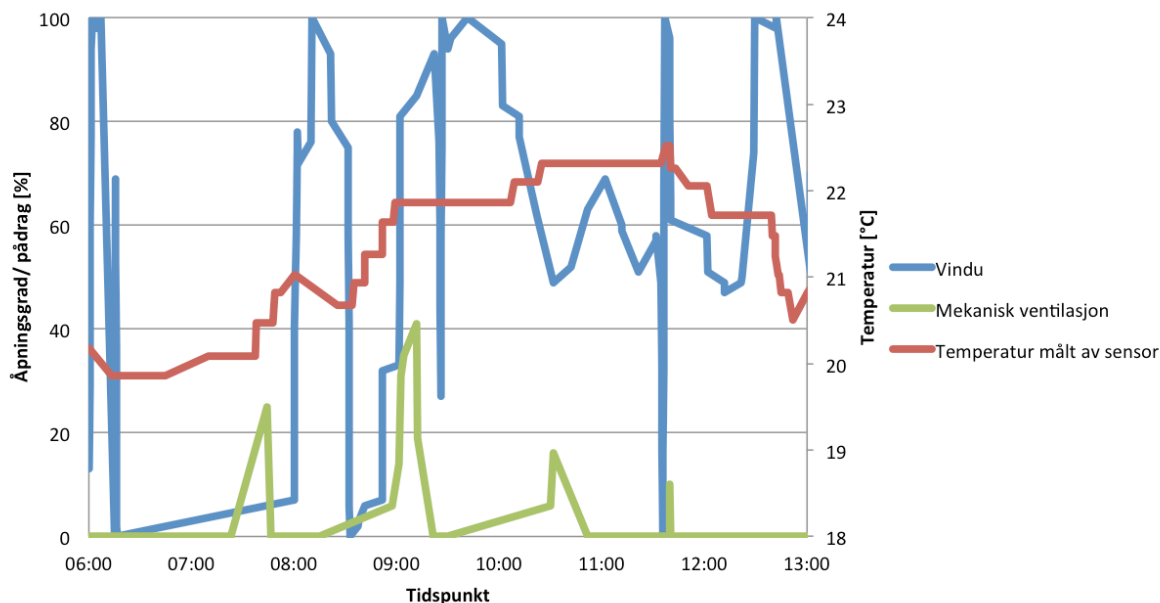


**Figur 6.13:** Relativ åpningsgrad for vindu og relativt pådrag på mekanisk ventilasjon på y-akse til venstre. CO<sub>2</sub>-nivå målt av sensor på y-akse til høyre. I gitt tidsrom den 10 april

Som tidligere beskrevet er CO<sub>2</sub>-nivået høyere den 13 mars enn den 10 april. I tillegg til en noe større grad av brukerbelastning antas dette å skyldes hvordan kombinasjonen av vinduslufting og mekanisk ventilasjon er de to dagene. Det kan sees at det er en større grad av vinduslufting den 10 april enn den 13 mars mens den mekaniske ventilasjonen er mer i bruk den 13 mars. Ut fra figurene ser det ut som VAV-spjeldet begynner å åpne ved CO<sub>2</sub>-nivå rundt 1000 ppm. Da CO<sub>2</sub>-nivået den 10 april kun i korte perioder overstiger dette nivået er det denne dagen svært begrenset drift av det mekaniske ventilasjonsanlegget. 13 mars er derimot CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen over dette nivået relativt store deler av dagen, hvilket medfører større grad av støtte fra det mekaniske ventilasjonsanlegget.



**Figur 6.14:** Relativ åpningsgrad for vindu og relativt pådrag på mekanisk ventilasjon på y-akse til venstre. Temperatur målt av sensor på y-akse til høyre. I gitt tidsrom den 13 mars



**Figur 6.15: Relativ åpningsgrad for vindu og relativt pådrag på mekanisk ventilasjon på y-akse til venstre. Temperatur målt av sensor på y-akse til høyre. I gitt tidsrom den 10 april**

Fra Figur 6.14 og Figur 6.15 sees sensortemperatur i sammenheng med vinduenes relative åpningsgrad og den mekaniske ventilasjonens relative pådrag. Man kan se at i de korte periodene med pulsutlufting, synker temperaturen noe. Temperaturen er høyest i perioden hvor det er høy tilstedeværelsesgrad, samtidig som vindusåpningsgraden er lavere. I halv tolv tiden begynner temperaturen å falle. Dette skyldes at elevene tar friminutt.

En kan se at vinduenes åpningsgrad over dagen er større den 10 april enn den 13 mars. I Kapittel 6.8 sees det nærmere på hvilke driftsformer og årstidsmodus vinduene styres etter de to dagene. Grunnen til at vinduene i større grad er åpne den 10 april antas å skyldes at utetemperaturen denne dagen er høyere enn den 13 mars, som vist i Figur 6.1. Da lav temperatur på tilført luft fra vinduene vil skape termisk ubehag er det ønskelig å begrense vinduenes åpningsgrad på dager med lav utetemperatur.

## 6.8 Driftsform og årstidsdriftmodus

Som beskrevet styres vindusluftingen etter to driftsmodus tilpasset årstid, henholdsvis sommer- og vintermodus. Ut fra årstidsdriftmodus settes systemet i forhåndstidsinnstilte driftsformer. Systemet kan også sette ulike driftsformer ut fra styringsparametere som eksempelvis CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur i rommet. De to

måledagene sto systemet stort sett i sommermodus, unntaket var på morgenen mellom 06:45 og 08:00 den 10 april. I perioden systemet står i sommerdrift kan en se fra Tabell 6.2 at det styres ut fra driftsformen komfortventilasjon, med frisk luft drift til fastsatte tider. Ved komfortventilasjonsdrift styres vinduene ut fra et komfortsettpunkt for temperatur. Settpunktene kan variere over dagen. Det tillates at temperaturen varierer i dødbåndet mellom komfort- og kjølesettpunkt. På morgenen den 10 april var temperaturen under komfortsettpunkt, systemet skifter da til midlertidig vintermodus. Driftsformen varierer i denne perioden mellom spalteventilasjon og pulsventilasjon før temperaturen igjen er over komfortsettpunkt og systemet settes tilbake i sommermodus. En kan tydelig se fra figurene i Kapittel 6.7 hvordan vinduenes åpningsgrad påvirkes av endret driftsform, særlig når en går fra komfortventilasjon til frisk luft drift.

**Tabell 6.2: Systemets driftsform i måleperioden den 13 mars og 10 april**

<b>13 mars</b>		<b>10 april</b>	
<i>Tidspunkt</i>	<i>Driftsform</i>	<i>Tidspunkt</i>	<i>Driftsform</i>
06:00-06:15	Frisk luft	06:00-06:15	Frisk luft
06:15-08:10	Komfortventilasjon	06:15-06:45	Komfortventilasjon
08:10-08:15	Frisk luft	06:45-07:23	Spalteventilasjon
08:15-09:25	Komfortventilasjon	07:23-08:00	Pulsventilasjon
09:25-09:30	Frisk luft	08:00-08:02	Frisk luft
09:30-11:35	Komfortventilasjon	08:02-08:10	Komfortventilasjon
11:35-11:40	Frisk luft	08:10-08:15	Frisk luft
11:40-13:00	Komfortventilasjon	08:15-09:25	Komfortventilasjon
		09:25-09:30	Frisk luft
		09:30-11:35	Komfortventilasjon
		11:35-11:40	Frisk luft
		11:40-13:00	Komfortventilasjon

## 6.9 Brukertilbakemeldinger

Tilbakemeldinger fra elever og lærere i 6A gikk hovedsakelig på at brukerne ved arbeidsstasjoner langs vinduene opplevde termisk ubehag. Dette utartet seg i form av kald trekk i nakke og på ankler fra tilført luft gjennom vinduene. Dette ble også personlig erfart ved utførelser av målinger de to dagene. Normalt ble derfor vinduene hyppig overstyrt av brukerne. Elevene på arbeidsstasjonene lengst unna vindusrekken ga også tilbakemelding på perioder med tung luft.

En av lærerne på skolen ga også tilbakemelding på vinduenes begrensede åpningsgrad var et irritasjonsmoment. I friminutter var det ønskelig med sjokkutlufting i form av å sette vinduene på vidt gap. De motoriserte vinduene har begrenset åpningsgrad til kjedelengden på 24,5 cm. Se Figur 4.2

Vedlikeholdstekniker på Mesterfjellet skole fortalte også at de hadde problemer med trekk i inngangspartiet i underetasjen. I denne etasjen har man et inngangsparti på sørfasaden og et på nordfasaden. Vindkreftene skaper her overtrykk og undertrykk på henholdsvis vindutsatt- og le-fasade. Grunnet relativt store åpningsareal generer trykkforskjellene på tvers av bygningssnittet store luftstrømninger mellom inngangspartiene. Dette har tidvis skapt avvik i termisk komfort. Man har løst dette ved å holde det ene inngangspartiet permanent lukket.





## 7 Simuleringer

---

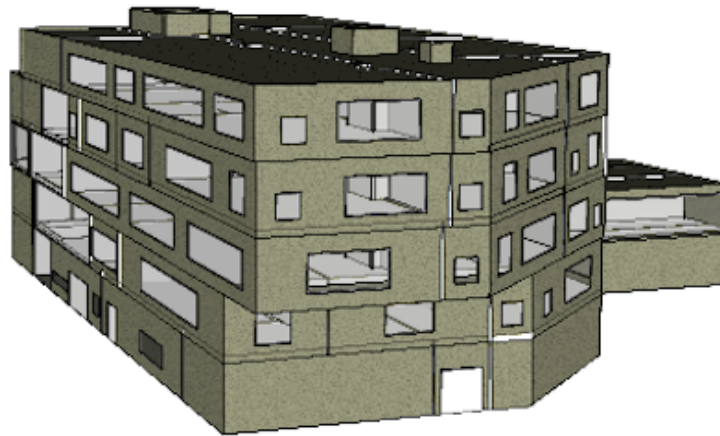
På bakgrunn av studier av ulike simuleringprogram i prosjektoppgaven ble inneklimate og energisimuleringprogrammet IDA ICE valgt for bruk i masteroppgaven. I dette kapitlet beskrives fremgangsmåten og valg gjort i modelleringsprosessen av simuleringmodeller.

### 7.1 Simuleringsmodeller

Det er konstruert to simuleringmodeller. En av hele skolen og en av trinnrom 24A. Simuleringsmodellen av skolen vil brukes til energiberegninger. Det er her konstruert to ventilasjonsscenarioer, et med mixed-mode ventilasjon og en med mekanisk balansert ventilasjon. Dette for å kunne sammenligne energiforbruket. Simuleringsmodellen av trinnrom 24A vil brukes til inneklimate simuleringer. Denne legger grunnlag for evaluering av inneklimate på Mesterfjellet skole. De to simuleringmodellene har input data beskrevet i 7.2, de forskjellige ventilasjonsscenarioene er beskrevet i 7.4 og 7.5.

#### 7.1.1 Hele skolen

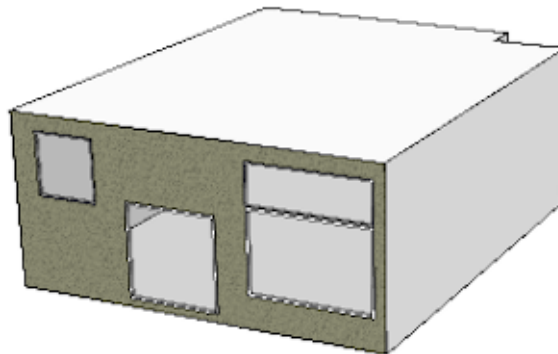
Modellen er konstruert på bakgrunn av plantegninger og IFC-modellen av skolen. Modellen har 5 etasjer med til sammen 55 soner, soneinndelingen kan sees av Vedlegg 2. Rom som grenser mot hverandre med likt bruksområde og ventilasjonsform, er slått sammen. Da modellen er relativt stor med mange variabler har det vært ønskelig å gjøre noen forenklinger for å begrense simuleringstiden. Åpningsbare vinduer på samme fasade er derfor slått sammen i hver enkelt sone. Det samme gjelder for faste vindu. Oversikt over vindussammenslåingen kan sees av Vedlegg 3. Det er i tillegg gjort forenklinger med hensyn til skråtak på sørøst fasaden. Forenklingene har ført til at bruksareal (BRA) av simuleringmodellen er noe større enn BRA som driftspersonell på skolen opererer med. Ved energisammenligner mellom simuleringmodell og faktiske målinger benyttes derfor spesifikk energi (kWh/m<sup>2</sup>). Denne modellen skal kun brukes til energisimuleringer, ikke i simulering med hensyn til inneklimate i de ulike sonene. Det er derfor antatt at forenklingene beskrevet her kan forsvares. Simuleringsmodellen kan sees av Figur 7.1.



**Figur 7.1: Modell av hele skolen**

### **7.1.2 Trinnrom 24A**

Dette er en en-sones modell, konstruert på bakgrunn av plantegninger og IFC-modellen av skolen. Modellen er konstruert for å være så lik trinnrom 24A som mulig. Modellen har sørfasade som grenser ut mot uteomgivelser. Resten av veggene samt tak og gulv grenser mot omkringliggende soner.



**Figur 7.2: Modell av trinnrom 24-A**

## **7.2 Input data**

### **7.2.1 Værdata**

Bygningens plassering er Larvik. I IDA ICE ligger det inne forhåndsdefinerte plasseringer med klimafilere. Nærmeste lokalisasjon til Larvik er Oslo/ Fornebu. Det er i

simuleringsmodellene brukt ASHRAE IWEK klimafil fra denne lokasjonen. Klimafilen inneholder informasjon om luftens temperatur, relativ fuktighet, vindretning, vindhastighet, samt direkte normal- og diffus stråling på en horisontal flate. Alle som funksjon av tid, ofte på timesbasis (Kalamees, 2004). I inneklimasimuleringene av trinnrom 24A er målt utetemperatur for de to datoene målingene fant sted lagt inn. Dette er for å kunne gjøre sammenligninger av modell og målinger. Da skolen ligger litt utenfor bykjernen er det valgt ASHRAE "forstads" vindprofil. Denne er basert på Formel 7.1, hvor  $U(h)$  er vindhastigheten i høyde ( $h$ ). ( $U_m$ ) er vindhastighet målt i åpent landskap ved værstasjon. ( $h$ ) er høyden fra bakkenivå, mens ( $h_m$ ) er høyden på referansemåling (10 meter). Parameterne ( $k$ ) og ( $a$ ) er terrengkonstanter, her satt til henholdsvis 0,67 og 0,25 (Jokisalo et al., 2008).

$$U(h) = U_m \cdot k \cdot \left( \frac{h}{h_m} \right)^a \quad 7.1$$

### 7.2.2 Bygningstekniske parametere

Bygningstekniske parametere lagt inn i IDA ICE er de som ble presentert i Tabell 4.1 i Kapittel 4.1. Parameterne er faktiske design verdier, valgt for å tilfredsstille nivået for lavenergibygninger.

### 7.2.3 Intern laster

Brukertettheten i de forskjellige rom er satt på bakgrunn av dimensjonert antall personer i hver sone. I de fleste trinnrom er dette antallet 30 personer, mens i spesialrom som naturfag og skolekjøkken er antallet lavere. På tekniske rom, lager og toalett er brukertettheten satt til 0. Aktivitetsnivået er satt til 1,2 met, hvilket tilsvarer stillesittende aktivitet. Bekledning er satt til 0,8 clo. Dette antas å være bekledningsnivå i mellomsesong.

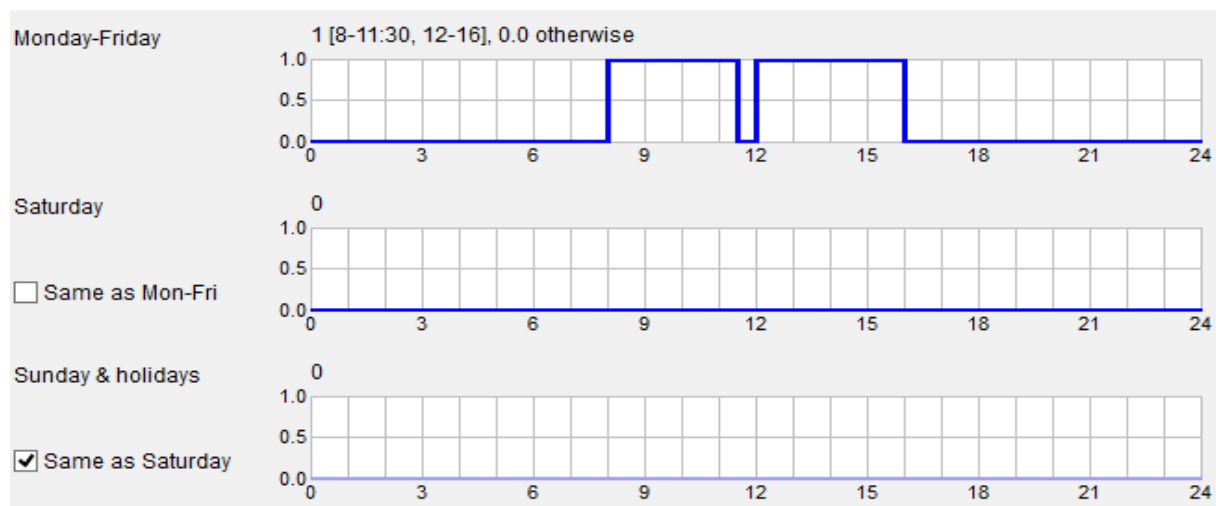
Varme avgitt fra belysning og utstyr er henholdsvis 10 W/m<sup>2</sup> og 6 W/m<sup>2</sup> basert på verdier fra bygningens energiattest (2014). Korridorer og toalett er satt uten varmeavgivelse fra utstyr. For bestemmelse av energiforbruk til tappevann er det tatt utgangspunkt i faktiske energimålinger. Levert energi til tappevann er ut fra dette satt til 7,3 kWh/m<sup>2</sup>.

#### 7.2.4 Tilstedeværelse og driftstid

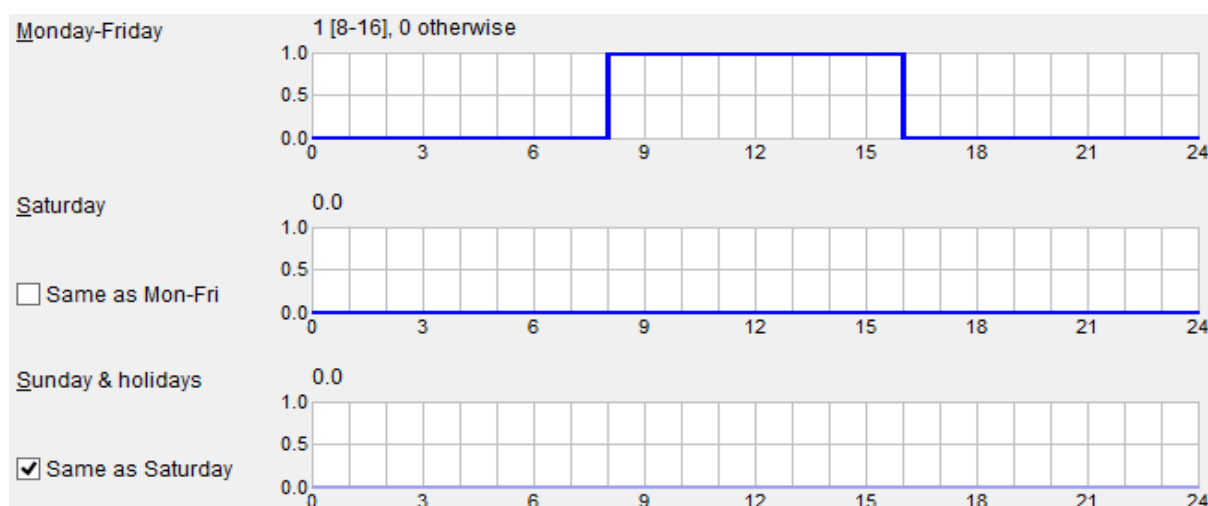
Det er satt opp to tidsplaner for brukertilstedeværelse. I tidsplanen for tilstedeværelse i undervisningsrom er det lagt inn et langfriminutt fra 11:30- 12:00. Det antas da at alle forlater undervisningsrommet. Klassene har flere kortere pauser i løpet av dagen. Da elevene i varierende grad forlot undervisningsrommene i disse pausene, er de neglisjert. Tilstedeværelse i andre rom er basert på skolens åpningstid. Det hadde vært mer riktig å lage detaljerte tidsplaner tilpasset alle typer rom. Flere mer detaljerte tidsplaner krever imidlertid lengre simuleringstid, antall tidsplaner er derfor begrenset til disse to.

Driftstid for belysning og utstyr er også basert på skolens åpningstid.

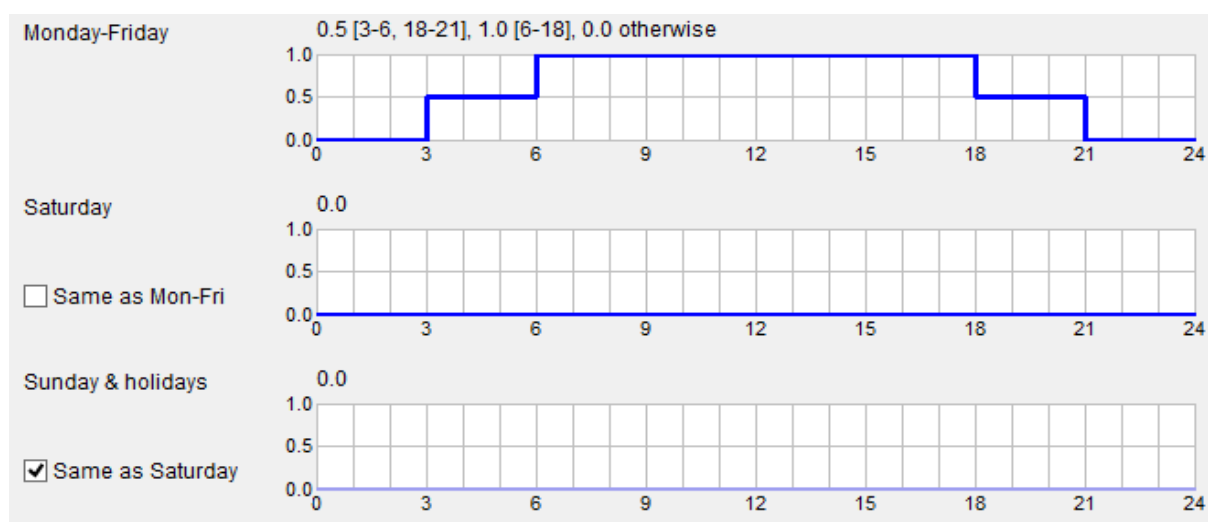
Ventilasjonsanlegget er i simuleringmodellene satt til å ha full drift på hverdager mellom klokka 06- 18, mens det har 50 % drift i tidsperiodene 03- 06 og 18- 21. Mellom 21- 03, samt i helger og ferier er anlegget slått av. Driftsplanen er satt for fjerne emisjoner, fukt og varmeavgivelse fra mennesker og materialer når og etter brukerne har vært tilstede. Samtidig som ventilasjonsanlegget skal fjerne emisjoner fra bygningsmaterialer avgitt utenfor skolens åpningstid, før brukerne kommer på morgenen. Feriedager er, dersom ikke annet er oppgitt, satt på bakgrunn av standard norsk ferie med to uker stengt i slutten juli. Tidsplanene kan sees av Figur 7.3, Figur 7.4 og Figur 7.5



Figur 7.3: Tidsplan brukerbelastning undervisningsrom



Figur 7.4: Tidsplan for brukerbelastning i andre rom, samt driftstid for belysning og utstyr



Figur 7.5: Driftstid ventilasjon

### 7.2.5 Oppvarming og kjøling

Alle sonene med unntak av de toaletter som kun grenser mot omkringliggende soner, har romoppvarming gjennom et ideelt varmeapparat. Det ideelle varmeapparatet sørger for stor nok varmeeffekt for å opprettholde settpunkt temperatur. Da oppvarmingssystemet ikke er en sentral del av denne studien så er det antatt at denne løsningen kan forsvares. Opprettholdelse av settpunkttemperatur gir dessuten en indikasjon på varmeeffektbehovet. Settpunkt for oppvarming er satt til 21 °C, mens vinduenes kjølesettpunkt er satt til 22 °C. Vinduenes maksimale åpningsgrad er i virkeligheten begrenset til maksimal kjedelengde på 24,5 cm, jamfør Figur 4.2. I IDA ICE er vinduenes maksimale åpningsareal tilnærmet til 100 % av vinduenes bredde og 50 %

av vinduenes høyde. Oppvarmingsystemet er som beskrevet ikke en sentral del av denne oppgaven, det er derfor satt inn et standard IDA ICE oppvarmings- og kjøleanlegg. Dette består både av en kjel og en kjølemaskin. Det er antatt at kjelen har en virkningsgrad på 0,9. I realiteten består oppvarmingsanlegget av en pelletskjel og en elektrokjel, reell virknings- og dekningsgrad for disse kjennes ikke. Det er ikke installert noen form for mekanisk kjøling på Mesterfjellet skole. Kjølemaskinen i simuleringsmodellen er derfor skrudd av både i mixed-mode og mekanisk ventilasjonsscenario. I simuleringene er det iverksatt alternative tiltak for å begrense kjølebehovet. Utvendige persienner er satt inn på vinduer som ikke er åpningsbare, hvilke vinduer dette gjelder kan sees av Vedlegg 3. Disse vil lukkes ved temperatur i sonen over 24 °C. I sommersimuleringene er det dessuten lagt inn nattkjøling, dette beskrives nærmere i Kapittel 8.2.1.

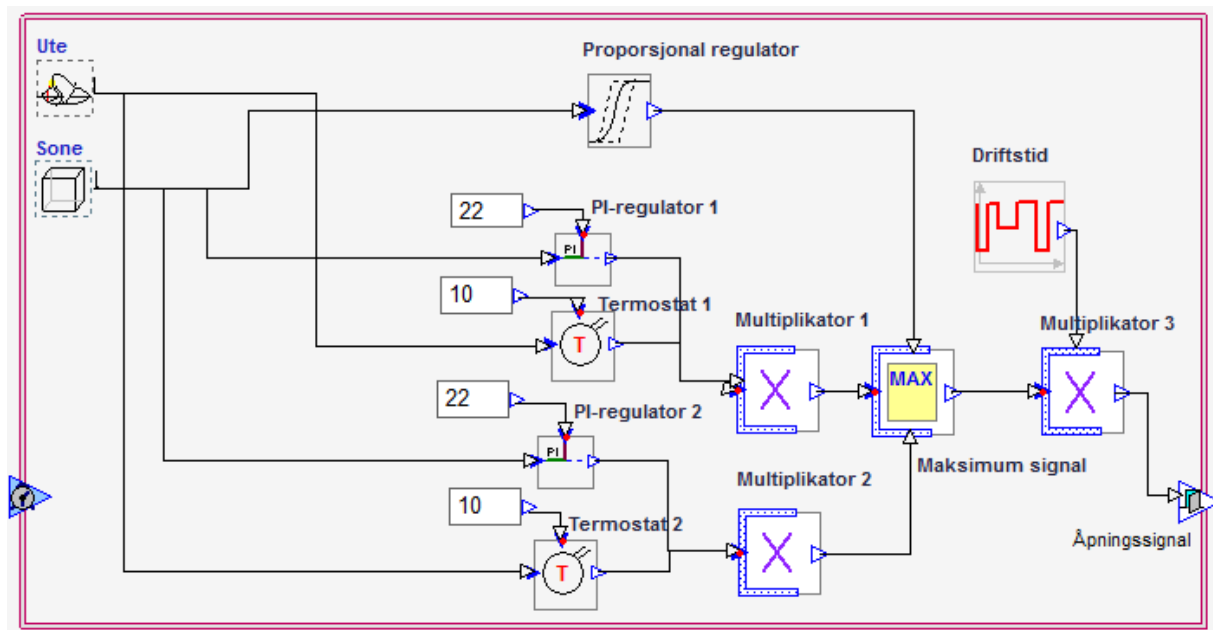
### **7.3 Kontrollstrategier**

#### **7.3.1 Kontrollstrategi vinduer**

Styringen av vindusåpning er som tidligere beskrevet basert på WindowMaster systemet NV Advanced™. Vindusåpningen styres ut fra værparameterne; utetemperatur, vindhastighet og -retning samt nedbør i forhold til fasade-/åpningsretning. I tillegg brukes ønskede verdier på temperatur og CO<sub>2</sub>-nivå som styringskriterier for å oppnå et akseptabelt inneklima. NV Advanced™ bruker også forhåndsdefinerte kalendermoduler til å styre vinduenes åpningsgrad. Grunnet styringssystemets kompleksitet, har det vært utfordrende å definere en god kontrollstrategi i IDA ICE. Firmaet WindowMaster har dessuten vært tilbakeholdne med å gi informasjon om hvordan NV Advanced™ bruker ulike styringsparameterne ved forskjellige driftsformer. Dette har gjort at det har vært nødvendig å gjøre en del antagelser og forenklinger.

Kontrollstrategien er basert på informasjon presentert i Kapittel 4.5. I tillegg er det gjort antagelser på bakgrunn av inneklima- og energimålingene. Kontrollstrategien i IDA ICE tar ikke hensyn til forhåndsdefinerte kalendermoduler som for eksempel pulsutlufting i friminuttene. Det tas heller ikke hensyn til begrensninger i vinduenes åpningsgrad grunnet vind og regn. I denne kontrollstrategien er det heller ikke tatt med nattkjøling utover driftstiden til ventilasjonsanlegget. Ved inneklimasimuleringer av sommerdrift er

det som tidligere beskrevet tatt hensyn til nattkjøling. Kontrollstrategien for vinduslufting kan sees av Figur 7.6.



Figur 7.6: Kontrollstrategi for vinduslufting i IDA ICE

Kontrollstrategien styrer etter CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur i sonen, samt utetemperatur og driftstid for ventilasjon. Hver av linjene bærer med seg et signal. En kan skille mellom målesignal og kontrollsignal. Signal ut fra boksen "ute" er målinger av utetemperatur, mens signal fra boksen "sone" er målinger av CO<sub>2</sub>-nivå og temperatur i sonen. Alle andre linjer bærer med seg kontrollsignal. Kontrollsignalene varierer mellom 0 og 1, der 0 betyr at vinduet er lukket, mens 1 betyr at vinduene er ved maksimal åpningsgrad. Som en kan se er det tre veier som leder til maksimum signal kontrolleren. Denne velger alltid det største av de tre inngangssignalene.

Den øverste veien er gjennom proporsjonal regulatoren. Denne har CO<sub>2</sub>-nivået i rommet som inngangssignal. Proporsjonal regulatoren har et settpunkt for CO<sub>2</sub>-nivå på 800-1350 ppm. Dette betyr at vinduet ikke vil begynne å åpne før CO<sub>2</sub>-nivået overstiger 800 ppm. Når målte verdier i sonen overstiger 800 ppm, vil vinduet begynne å åpne. Maksimalt kontrollsignal fra proporsjonal regulatoren er begrenset til 0,6, dette signalet vil oppnås ved et CO<sub>2</sub>-nivå på 1350 ppm.

Neste vei går gjennom PI-regulator 1 og termostat 1. PI-regulator 1 vil forsøke å holde en settpunkt temperatur på 22 °C i sonen. Når sonetemperaturen overstiger 22 °C vil PI-regulatoren gi et utgangssignal mellom 0 og 1 for å holde temperaturen i sonen på 22 °C. Termostat 1 vil gi ut et utgangssignal på 1 når utetemperaturen er over 10 °C og 0 når utetemperaturen er under denne grensen. Utgangssignalene fra de to kontrollerne er så multiplisert i multiplikator 1. Utgangssignalet fra denne vil da alltid være 0 når utetemperaturen er under 10 °C. Ved utetemperatur over 10 °C vil utgangssignalet være definert utelukkende av PI-regulator 1.

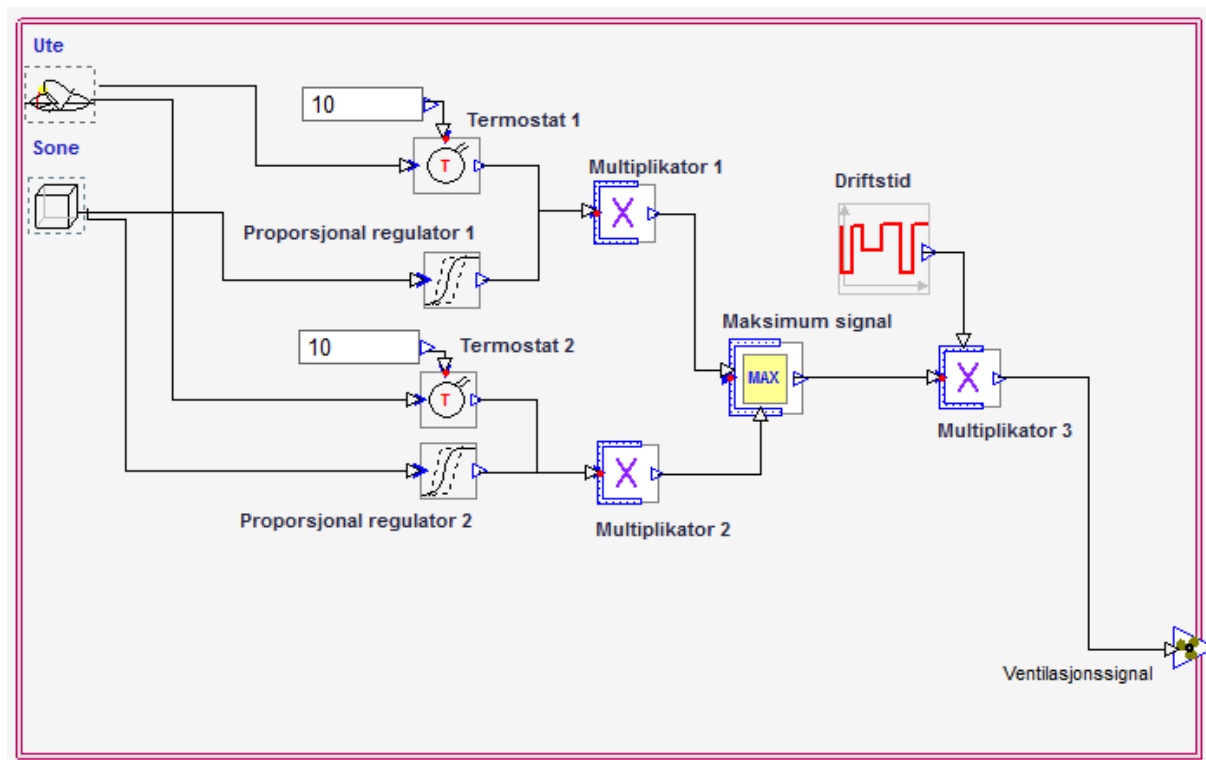
Den siste veien går gjennom PI-regulator 2 og termostat 2. PI-regulator 2 opererer etter samme settpunkttemperatur som PI-regulator 1, men utgangssignalet er her begrenset til 0,6. Termostat 2 vil gi et utgangssignal på 0 hvis utetemperaturen er over 10 °C og 1 dersom utetemperaturen er under 10 °C. Utgangssignalene fra de to kontrollerne er så multiplisert i multiplikator 2. I motsetning til multiplikator 1 vil utgangssignalet fra multiplikator 2 alltid være 0 ved utetemperatur over 10 °C. Ved temperaturer under 10 °C vil utgangssignalet være definert av PI-regulator 2.

Maksimumssignal kontrolleren velger så det største signalet fra disse tre veiene. Dette sendes til multiplikator 3. Her multipliseres det med signal bestemt ut fra ventilasjonsanleggets driftstid. Dette er 1 i tidsrommet når ventilasjonsanlegget er i full drift, 0,5 i perioden med halv drift og 0 utenfor driftstid. Multiplikator 3 sender så ut et åpningssignal til vinduene.

### **7.3.2 Kontrollstrategi mekanisk ventilasjon**

På Mesterfjellet skole er den naturlige vindusluftingen som beskrevet støttet av et mekanisk ventilasjonsanlegg. I ventilasjonsscenariet med mixed-mode ventilasjon er det nødvendig å definere en kontrollstrategi for den mekaniske ventilasjonen i soner med VAV og vinduslufting. Dette for å sikre samhandling mellom vinduslufting og mekanisk ventilasjon. Denne kontrollstrategien kan sees av Figur 7.7. I ventilasjonsscenarioet med mekanisk balansert ventilasjon er disse sonene VAV- styrt etter CO<sub>2</sub>- og temperatur kontroll, mer om dette i Kapittel 7.5.





Figur 7.7: Kontrollstrategi for mekanisk ventilasjon i IDA ICE

Kontrollstrategien styrer den mekaniske ventilasjonen etter CO<sub>2</sub>-nivå i sonen, samt utetemperatur og driftstid for ventilasjon. Oppsettet her er likt som i kontrollstrategien for vindusluftingene. Signal fra boksen "ute" er målinger av utetemperatur, mens signal fra boksen "sone" er målinger av CO<sub>2</sub>-nivå i sonen. Resten av signallinjene er kontrollsignal. Her leder to veier til maksimum signal kontrolleren. Denne velger alltid det største av de to inngangssignalene.

Den øverste veien går gjennom en proporsjonal regulator 1. CO<sub>2</sub>-nivået i rommet er her inngangssignal. Proporsjonal regulatoren har et settpunkt for CO<sub>2</sub>-nivå på 1000- 1350 ppm. Den mekaniske ventilasjonen starter opp når CO<sub>2</sub>-nivået overstiger 1000 ppm og ved 1350 ppm vil utgangssignalet være 1. Signalet fra proporsjonal regulatoren går inn i multiplikator 1 og multipliseres her med signal fra termostat 1. Dette er 1 når utetemperaturen er over 10 °C og 0 når temperaturen er under 10 °C. Signalet ut fra multiplikator vil altså være 0 ved utetemperatur under 10 °C. Ved temperaturer over 10 °C vil signalet være definert av proporsjonal regulator 1. CO<sub>2</sub>- settpunktet er her er høyere enn ved kontrollstrategi for vinduslufting. Dette er fordi det er ønskelig at

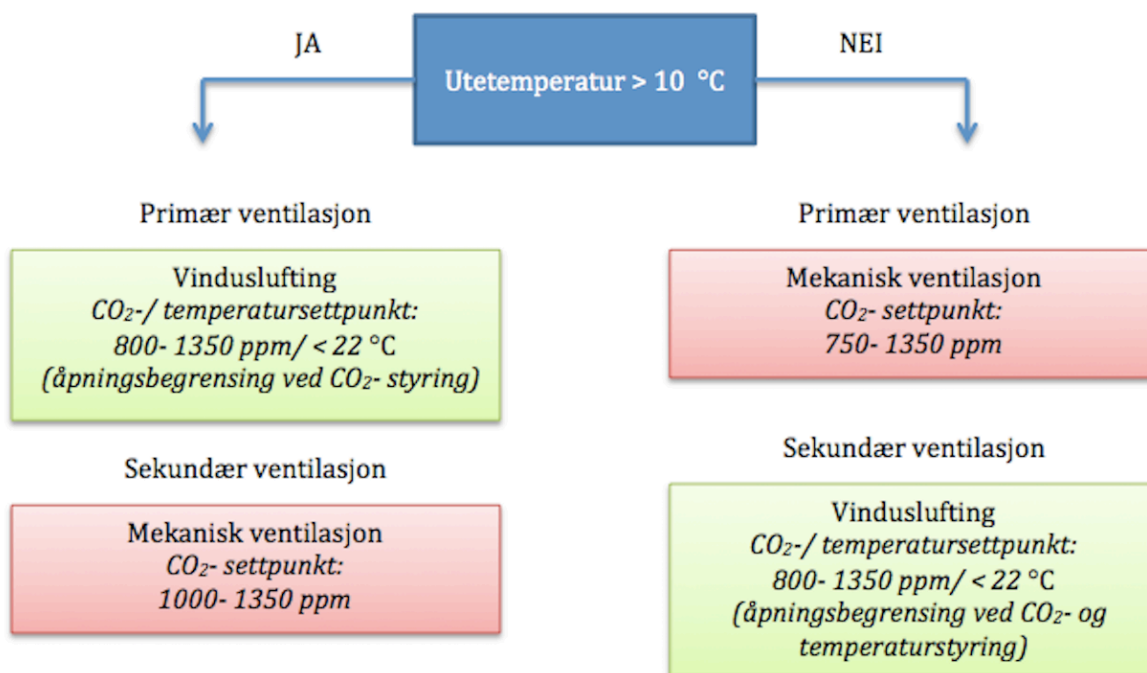
vindusluftingen primært skal stå for ventileringen ved utetemperaturer over 10 °C. Den mekaniske ventilasjonen vil kun assistere når CO<sub>2</sub>-nivået i rommet overstiger 1000 ppm.

Den nederste veien består av samme komponenter som den øverste. Proporsjonal regulator 2 har målt CO<sub>2</sub>-nivå i rommet som inngangssignal. CO<sub>2</sub>-settpunktet her er 750-1300 ppm. Altså et lavere settpunkt enn ved vindusluftingen. Signalet multipliseres med utgangssignal fra termostat 2 i multiplikator 2. Termostat 2 har utgangssignal 1 ved utetemperatur under 10 °C og 0 ved utetemperatur over 10 °C. Multiplikator 2 sitt utgangssignal vil altså være 0 ved utetemperatur over 10 °C og vil utelukkende være definert av proporsjonal regulator 2 ved utetemperatur under denne grensen.

Det er ønskelig at den mekaniske ventilasjonen primært skal stå for ventilasjonen ved utetemperaturer under 10 °C. CO<sub>2</sub>- settpunktet er derfor lavere enn i kontrollstrategien for vindusluftingen. Dette for å senke risiko for termisk ubehag for brukerne i sonen.

Maksimum signal kontrolleren velger så det største signalet av disse to. Utgangssignalet fra denne sendes inn på multiplikator 3. Her multipliseres det med driftstidsignal for ventilasjonsanlegget. Dette er som beskrevet 1 i tidsrommet når ventilasjonsanlegget er i full drift, 0,5 i perioden med halv drift og 0 utenfor driftstid. Multiplikator 3 sender så ut et ventilasjonssignal til det mekaniske anlegget. Dette bestemmer viftens relative pådrag, eller med andre ord relativt pådrag fra mekanisk ventilasjon i den respektive sonen.

Samspillet mellom kontrollstrategi for vinduslufting og mekanisk ventilasjon i ventilasjonsanleggets driftstid er illustrert i Figur 7.8. Med primær ventilasjon menes den ventilasjonstypen som hovedsakelig er i drift. Dette skyldes at det i større grad er avvik fra settpunkt enn ved den sekundære ventilasjonstypen.



Figur 7.8: Samspill mellom kontrollstrategi for vinduslufting og mekanisk ventilasjon

#### 7.4 Mixed-mode ventilasjonsscenario

Dette ventilasjonsscenarioet benyttes i modellen av hele skolen for energiberegninger i tillegg til i modellen av trinnrommet for inneklimasimuleringer. I modellen av hele skolen styres sonene med VAV- system og hybrid ventilasjon etter kontrollstrategiene presentert i Kapittel 7.3. Maksimalluftmengdene fra det mekaniske ventilasjonsanlegget er her satt på bakgrunn kriterier til person- og materialbelastning på henholdsvis 26 m<sup>3</sup> pr. time pr. person, samt 2,5 m<sup>3</sup> pr. time pr. m<sup>2</sup>. Soner uten hybrid ventilasjon er mekanisk ventilerte, disse styres likt som soner i mekanisk ventilasjons-scenario. Mer om kontrollstrategi for disse og beskrivelse av det mekaniske ventilasjonsanlegget i Kapittel 7.5. Oversikt over soner og hvilken ventilasjonsform de har kan sees av Vedlegg 2, mens oversikt over hvilke vinduer som er åpningsbare kan sees av Vedlegg 3. Med beskrevet kriterier for luftmengder er total dimensjonert luftmengde for skolen 49 125 m<sup>3</sup> pr time. Dette er litt over dimensjonert luftmengde til reelt anlegg på 44 000 m<sup>3</sup> pr time. I modellen av trinnrommet styres sonen som en VAV- sone med hybrid ventilasjon, slik som beskrevet ovenfor.

## 7.5 Mekanisk ventilasjonsscenario

I modellen av hele skolen settes det opp et ventilasjonsscenario med ren mekanisk ventilasjon. Dette for å sammenligne energiforbruket i forhold til mixed-mode ventilasjonsscenariet. Sonene som i det hybride ventilasjonsscenariet ble styrt etter kontrollstrategiene i Kapittel 7.3, er i dette ventilasjonsscenarioet satt til å ha VAV-ventilasjon med temperatur- og CO<sub>2</sub>- kontroll. Temperatur- og CO<sub>2</sub>- styringen opererer med settpunkt på respektivt 21- 25 °C og 800- 1350 ppm. Maksimalluftmengder er her større enn ved mixed-mode ventilasjonsscenario, da luften tilført fra mekanisk ventilasjonsanlegg skal fjerne overskuddsvarme fra sonene. Maksimalluftmengden er satt på bakgrunn av beregnet dimensjonerende luftmengde for skolen presentert i Kapittel 4.4.1. Denne var på 98 000 m<sup>3</sup> pr time, ut fra dette er maksimal luftmengden i VAV sonene antatt til 20 m<sup>3</sup> pr. time pr. m<sup>2</sup>. De fleste VAV sonene er soner med relativ høy brukerbelastning og har lik varmeavgivelse fra utstyr og belysning. Likevel er denne fordelingen noe forenklet da de ulike VAV sonene vil ha ulik varmebelastning blant annet grunnet ulik solinnstråling. Den spesifikke maksimal luftmengden tilsvarer en total dimensjonerende luftmengde for skolen på 99 000 m<sup>3</sup> pr time. CAV- sonene har tillufts- og avtrekksrate på bakgrunn av minimumsluftmengdene til frisklufttilførsel i TEK 10, ut fra kriteriet til person- og materialbelastning.

Det mekaniske anlegget har maksimal temperatur virkningsgrad 81,5 % og spesifikk vifteeffekt SFP er satt til 1,8 kW/m<sup>3</sup>/s, som presentert i Tabell 4.3 i Kapittel 4.4.1. Tilluftstemperaturen er satt til å være konstant 19 °C.

## 8 Resultat simuleringer

---

### 8.1 Energisimuleringer

Energisimuleringer ble utført over et normalår på modellen av hele skolen. Det ble utført energisimulering for scenarioet med mixed-mode ventilasjon samt for scenarioet med mekanisk balansert ventilasjon. Parametere brukt i modellene er beskrevet i Kapittel 7. Disse er som beskrevet satt på bakgrunn av informasjon fra Kapittel 4, samt fra resultat fra målingene. I Tabell 8.1 kan levert energi og effektbehov for mixed-mode ventilasjonsscenarioet sees. Vinduenes åpningsbegrensning er satt med hensyn på å få en fordeling mellom energi til romoppvarming og energi til vifter og pumper som er relativt lik det som er målt ved Mesterfjellet skole. I valideringen av simuleringmodellen i Kapittel 9.1 diskuteres dette nærmere.

Tabell 8.1: Levert energi og effektbehov ved årssimulering av mixed-mode ventilasjon

	Levert energi		Effekt
	<i>kWh</i>	<i>kWh/m<sup>2</sup></i>	<i>kW</i>
<b>Romoppvarming</b>	132 099	22,1	381,5
<b>Varmtvann oppvarming</b>	43 498	7,3	5,0
<b>Vifter og pumper</b>	26 619	4,5	18,3
<b>Belysning</b>	140 195	23,5	59,7
<b>Utstyr</b>	47 708	8,0	20,3
<b>Total</b>	<b>390 119</b>	<b>65,4</b>	

Det kan sees at effektbehovet til romoppvarming er relativt høyt. Dette skyldes at med kontrollstrategi for vindusåpning brukt i denne modellen, vil vinduene på bakgrunn av sonenes CO<sub>2</sub>-nivå åpnes til halv åpning selv på de kaldeste dagene. Det er installert ideelle varmeapparat som leverer nødvendig effekt for å opprettholde lufttemperatur i trinnrommet til settpunkt 21 °C. Dette medfører et stort effektbehov på de kaldeste dagene. Varmeapparatet må da levere nødvendig effekt for at temperaturen i sonen skal ligge over settpunkt, på grunn av kald tilluft fra vinduene.

Tabell 8.2: Levert energi og effektbehov ved årssimulering av mekanisk balansert ventilasjon

	Levert energi		Effekt
	<i>kWh</i>	<i>kWh/m<sup>2</sup></i>	<i>kW</i>
<b>Romoppvarming</b>	34 250	5,7	75,3
<b>Varmtvann oppvarming</b>	43 498	7,3	5,0
<b>Vifter og pumper</b>	125 543	21,0	99,1
<b>Belysning</b>	140 188	23,5	59,7
<b>Utstyr</b>	47 705	8,0	20,3
<b>Total</b>	<b>391 184</b>	<b>65,6</b>	

Tabell 8.2 viser levert energi og effektbehov for ventilasjonsscenariet med mekanisk balansert ventilasjon. Det kan sees at levert energi og effektbehov til vifter og pumper er betraktelig større enn for mixed-mode ventilasjonsscenariet. Dette er som forventet da fjerning av overskuddsvarme på sommerstid skjer med mekanisk ventilasjon.

Dimensjonerte luftmengder er derfor større enn ved mixed-mode ventilasjon, der overskuddsvarmen på sommeren i stor grad fjernes ved hjelp av vinduslufting. Fra Figur 8.1 kan det sees at levert energi i sommermånedene er høyere ved mekanisk- enn ved mixed-mode ventilasjonsscenariet. Levert energi og effektbehov til romoppvarming er imidlertid langt lavere enn ved mixed-mode ventilasjon. Dette skyldes at man i det mekaniske ventilasjonsscenariet i større grad får utnyttet varmegjenvinning fra roterende varmegjenvinner. Dette fører til at levert energi på vinterhalvåret er lavere ved mekanisk- enn ved mixed-mode ventilasjonsscenariet, se Figur 8.1. Totalt så kan en se at levert energi er 1065 kWh høyere ved mekanisk balansert ventilasjon enn ved mixed-mode ventilasjon.

1065 kWh i energisparing tilsvarer en energisparing på 0,27 %, hvilket er minimalt. Som beskrevet tidligere er anlegget på Mesterfjellet skole det første året i en prøvedriftsfase. Dette betyr at det gjøres stadige endringer i kontrollstrategi for å optimalisere balansegangen mellom et lavt energiforbruk og et godt inn klima. Det er derfor gjort simuleringer hvor det er latt parameterne som begrenser vindusåpningen i forhold til åpningsgrad og ut fra utetemperatur variere. Det har her vært ønskelig å se hvilken kontrollstrategi som virker fornuftig med hensyn til å både å gi et godt inn klima og det

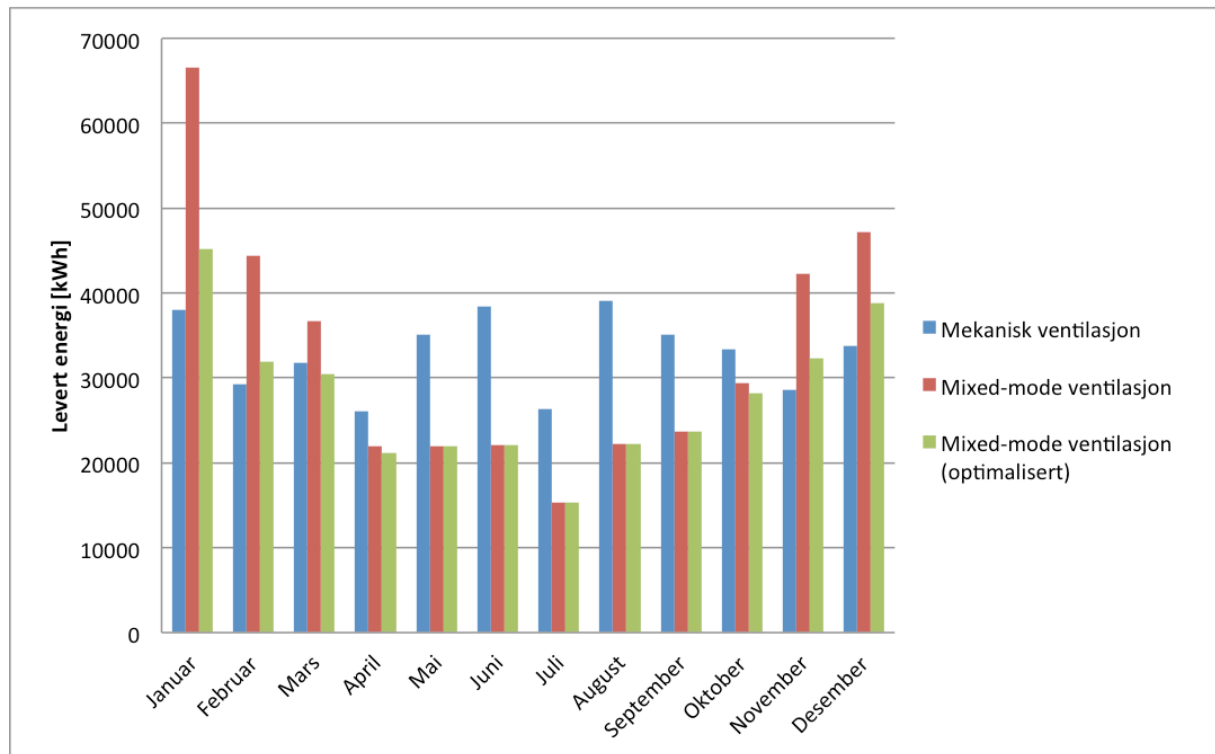
laveste energiforbruket. Det ble gjort en rekke simuleringer på modellen av trinnrommet, da simuleringstiden her er betraktelig lavere enn for modellen av hele skolen. Etter å ha funnet den kontrollstrategien, som gav lavest energiforbruk, ble denne implementert i modellen av hele skolen. Den optimaliserte kontrollstrategien har lik styring etter temperatur i sonen som den presentert i Kapittel 7.3. Styringen på CO<sub>2</sub>-nivå er imidlertid optimalisert. Settpunkt er det samme, 800-1350 ppm. Vinduenes maksimale utgangssignal er for utetemperatur over 10 °C satt til 1. For utetemperatur over 5 °C er dette signalet satt til 0,6, mens det for utetemperature over 0 °C er satt til 0,2. For utetemperatur under 0 °C vil ikke vinduene åpnes på bakgrunn av CO<sub>2</sub>-nivå i sonen. Levert energi og effektbehov for modellen av hele skolen med optimalisert kontrollstrategi kan sees av Tabell 8.3.

**Tabell 8.3: Levert energi og effektbehov ved årssimulering av mixed-mode ventilasjon optimalisert**

	Levert energi		Effekt
	<i>kWh</i>	<i>kWh/m<sup>2</sup></i>	<i>kW</i>
<b>Romoppvarming</b>	66 079	11,1	111,0
<b>Varmtvann oppvarming</b>	43 498	7,3	5,0
<b>Vifter og pumper</b>	32 435	5,4	29,9
<b>Belysning</b>	140 196	23,5	59,7
<b>Utstyr</b>	47 708	8,0	20,3
<b>Total</b>	<b>329 916</b>	<b>55,3</b>	

Det kan her sees at levert energi og effektbehov til vifter og pumper er noe høyere enn for opprinnelig mixed-mode modell. Dette skyldes naturlig nok at det er større begrensning for vinduenes åpningsgrad ut fra styring etter rommets CO<sub>2</sub>-nivå, ved lave utetemperature. Viftene i det mekaniske ventilasjonsanlegget må dermed ha større grad av drift for å holde CO<sub>2</sub>-nivået innenfor gitt settpunkt. Samtidig ser vi betydelig nedgang i levert energi og effektbehov til romoppvarming. En belager seg i langt større grad på ventilering fra det mekaniske anlegget ved lave utetemperature. Man får dermed i større grad utnyttet varmegjenvinning av ventilasjonsluften. Hvilket gjør at levert energi, samt nødvendig effekt for oppvarming av uteluft til tilfredsstillende innetemperatur blir langt lavere. Nedgangen i levert energi de kalde månedene kan også

sees av Figur 8.1. Totalt levert energi for året er ved denne kontrollstrategien 329 916 kWh. Dette er en besparelse på 61 268 kWh eller 15,7 % sammenlignet med ventilasjonsscenarioet med mekanisk balansert ventilasjon.



Figur 8.1: Simulert månedlig levert energi ved de ulike ventilasjonsscenarioene

## 8.2 Inneklimasimuleringer

Inneklimasimuleringene er utført på modellen av trinnrommet. Det har her vært ønskelig å se om mixed-mode anlegget på Mesterfjellet skole, leverer tilfredsstillende inneklima. Dette med hensyn på de parameterne beskrevet i Kapittel 3.1 og 3.2. Det har derfor blitt utført en sommer- og en vintersimulering på modellen av trinnrommet, med kontrollstrategi som beskrevet i Kapittel 7.3.

### 8.2.1 Sommersimulering

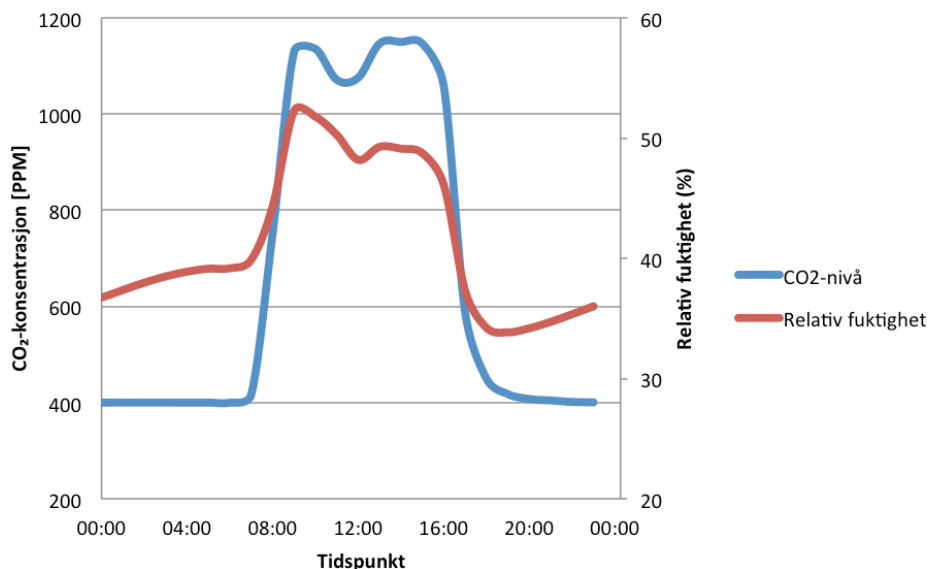
I sommersimuleringen er det i tillegg implementert nattkjøling i vinduenes kontrollstrategi. Dette innebærer at vinduene utenfor driftstiden styres etter temperatursettpunkt på 16 °C i sonen. Ved nattkjøling er vinduenes åpningsgrad begrenset til 0,5 som tilsvarer 50 % av maksimal åpningsgrad. Som tidligere beskrevet er det ikke mekanisk kjøling på Mesterfjellet skole. Det er derfor nødvendig med tiltak som reduserer kjølebehovet. I tillegg til nattkjøling er det utvendige persiener som går



i aktiv posisjon ved temperaturer over 24 °C i sonen. Som del av sommersimuleringen er det kjørt to simuleringer. Den ene med værdata som en syntetisk sommer designdag. Den syntetiske designdagen er basert på daglige ekstremverdier av våt- og tørrkuletemperatur, vindretning og vindhastighet, samt redusjonsfaktor for direkte og diffus solinnstråling (Kalamees, 2004). Den andre simuleringen kjøres over et normalår med Oslo klima. Dette for å få en indikasjon på hvor mange timer temperaturen er over anbefalte verdier.

### ***Simulering over syntetisk designdag***

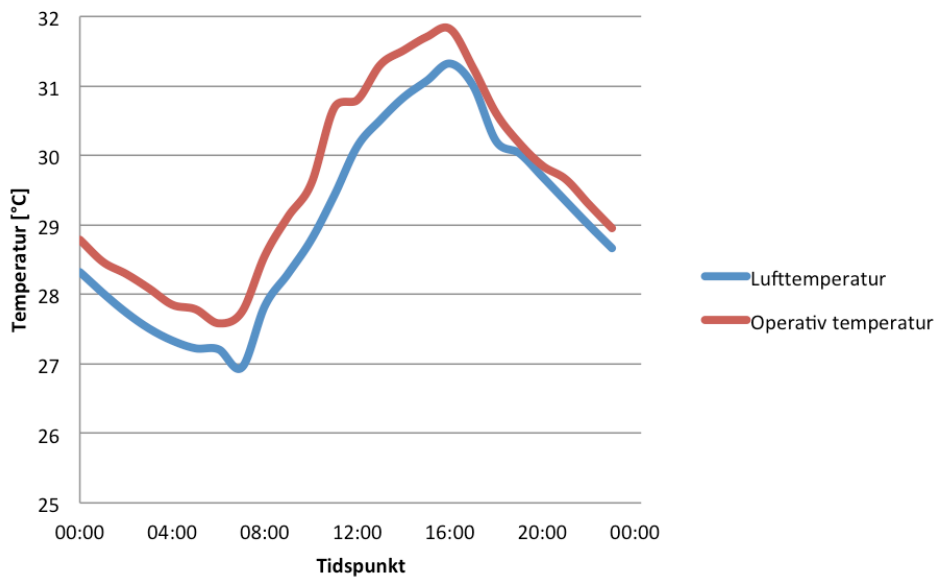
Resultat av simulering med over den syntetiske sommerdagen i form av CO<sub>2</sub>- og relativ fuktighetsnivå, temperaturutvikling i trinnrommet samt vindusåpningsgrad og pådrag på mekanisk ventilasjon, kan sees av Figur 8.2, Figur 8.3 og Figur 8.4.



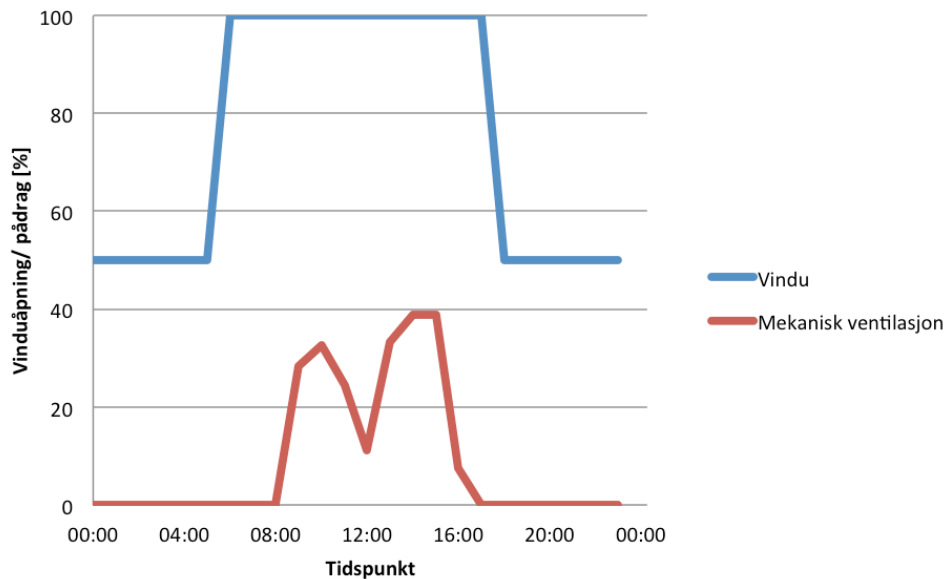
**Figur 8.2: CO<sub>2</sub>-nivå og relativ fuktighet i trinnrom ved simulering med syntetisk sommerklima**

Av Figur 8.2 kan det sees at CO<sub>2</sub>-nivået er over 1000 ppm hele driftstiden ved denne simuleringen. Vinduene skal i denne perioden stå for primær ventilasjonen, da utetemperaturen er over 10 °C. Da temperaturdifferansen mellom ute og inne er relativ liten, vil de naturlige drivkreftene som følge av termisk oppdriftstrykk være begrenset. Vindusluftingen klarer dermed ikke å generere stor nok luftutskiftning til å holde CO<sub>2</sub>-nivået under 1000 ppm. Det mekaniske ventilasjons anlegget vil styre etter CO<sub>2</sub>-settpunkt på 1000- 1350 ppm for å assistere vindusluftingen, se Kapittel 7.3.2. Luftens

relative fuktighet ligger under 60 %, som er anbefalt under sommerforhold for bygninger av kategori 1.



Figur 8.3: Temperatur i trinnrom ved simulering med syntetisk sommerklima



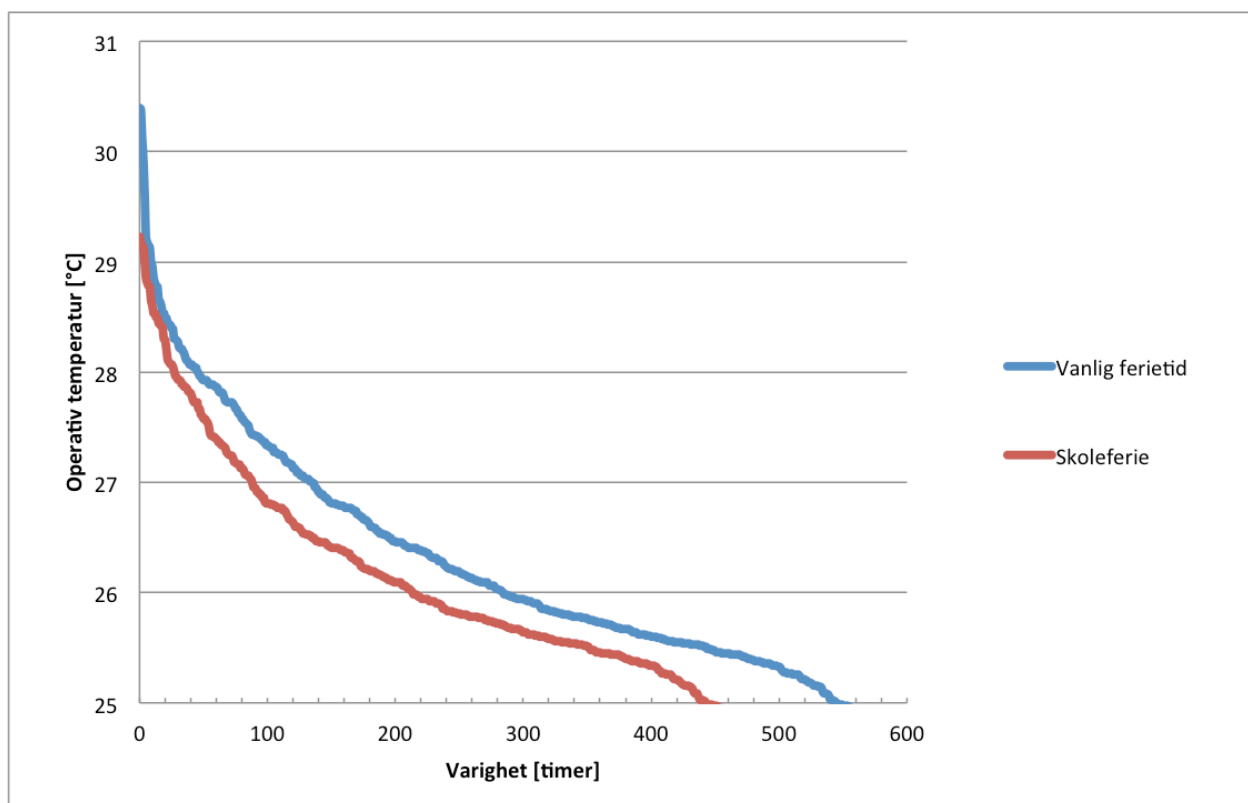
Figur 8.4: Relativ vindusåpning og relativ pådrag på mekanisk ventilasjon ved simulering med syntetisk sommerklima

Av Figur 8.4 kan det sees at vinduene er ved maksimal åpningsgrad i driftstiden og halv åpning utenfor driftstid for nattkjøling. Vinduene styres i denne simuleringen etter temperatur, da temperatur i sonen som vist i Figur 8.3 er over kjølesettpunkt. Det kan

sees at det mekaniske ventilasjonsanlegget i varierende grad vil bistå vindusluftingen i driftstiden. Dette fordi naturlig drivtrykk og dermed det naturlig luftutskifte er begrenset grunnet lav temperaturdifferanse mellom ute og inne. Kurven for mekanisk ventilasjonspådrag følger CO<sub>2</sub>-nivået i rommet, da dette anlegget styres etter CO<sub>2</sub>-settpunkt som beskrevet.

### ***Simulering over året***

Som en kan se av Figur 8.3 er det på varme sommerdager vanskelig å holde innnetemperaturen innenfor anbefalte verdier. Operativ innnetemperaturen kan derfor overskride disse i varme sommerperioder, der lufttemperaturen ute er over den som overskrides med 50 timer i et normalår. I praksis bruker en ofte i stedet anbefaling om at maksimal operativ temperatur ikke skal overstige anbefalt maksimalgrense presentert i Tabell 3.2, mer enn 50 timer (Mathisen, 2015). Det er nedenfor satt opp varighetskurver som beskriver hvor mange timer i skolens åpningstid temperaturen i trinnrommet i løp av året er over 25 °C. Den ene kurven har bruksmønsteret som følger vanlig norsk ferie, med 2 uker sommerstengt midt i juli. Det er også satt opp en kurve med skoleferie i hele juli. Maksimal anbefalt operativ temperatur for bygningskategori 1, 2 og 3, er henholdsvis 25 °C, 26 °C og 27 °C.



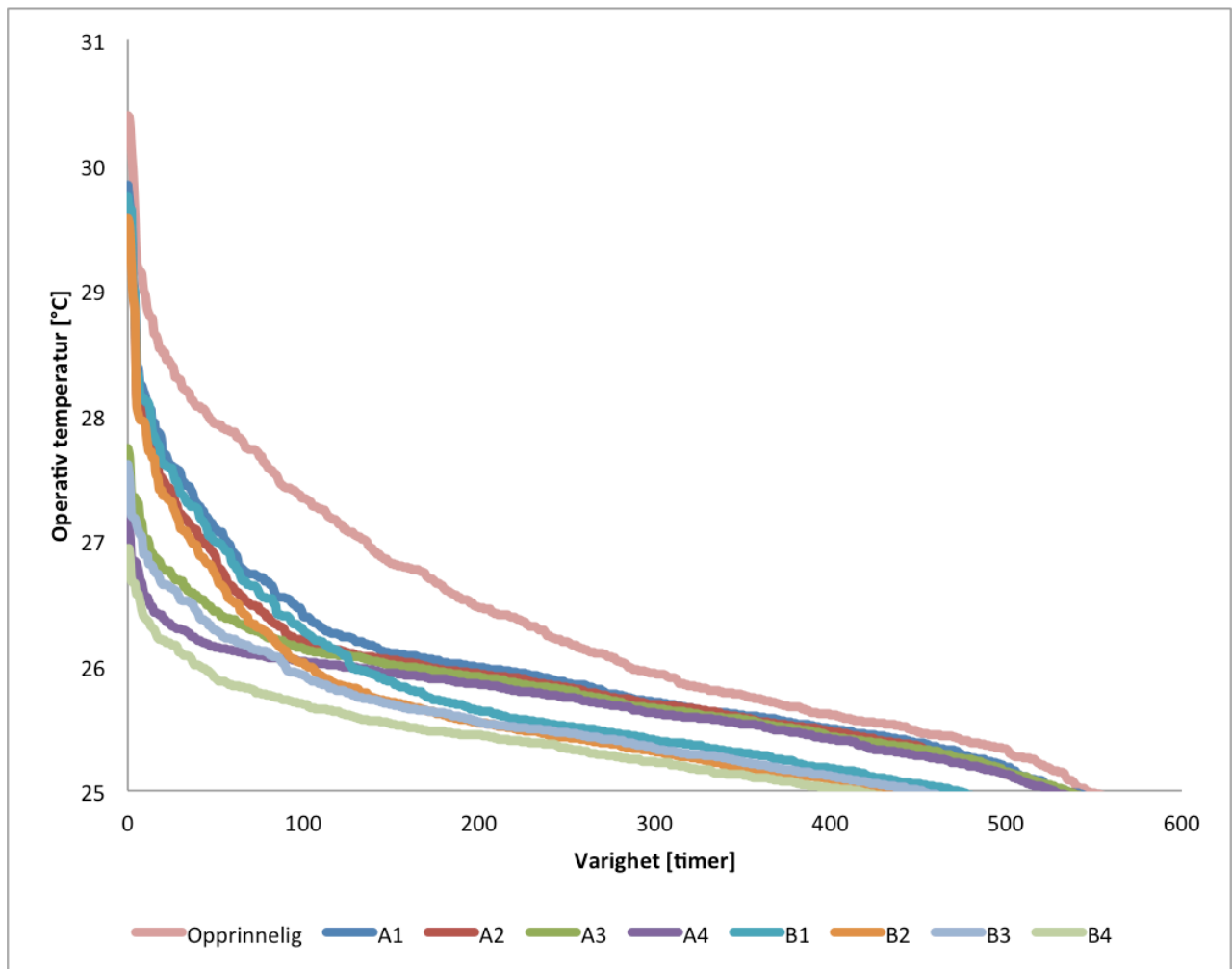
Figur 8.5: Varighetskurve for simulert operativ temperatur i trinnrom 24-A, med ulike sommerferie perioder

En kan se at operativ temperatur er høyere enn anbefalt grenseverdi for alle bygningskategoriene, mer enn 50 timer. Dette gjelder både med vanlig ferie midt i juli, samt med skoleferie hele juli. Selv om det ikke er elever på skolen i juli, bør skolen kunne brukes til andre formål som kursing og lignende. Kurven med "vanlig ferie" bør derfor være dimensjonerende.

Det er blitt gjort en rekke tiltak for å begrense varigheten av operativ temperatur over anbefalte grenser. Som tidligere beskrevet styres det mekaniske anlegget etter CO<sub>2</sub>-settpunkt. Fra Figur 8.4 kan en se at det mekaniske anlegget vil være relativt lite grad i bruk ved en syntetisk sommerdag. Det er derfor lagt inn temperaturkontroll i form av en PI-regulator med kjølesettpunkt på henholdsvis 24 °C og 25 °C i kontrollstrategien for mekanisk ventilasjon, beskrevet i Kapittel 7.3.2. Det er i tillegg gjort tiltak i form av å øke maksimal mekanisk luftmengde til 20 m<sup>3</sup> pr. time pr. m<sup>2</sup>. Denne luftmengden er basert på dimensjonerings for sommerkomfort som beskrevet i Kapittel 7.5. Det er også lagt inn mekanisk kjøling av tilluften, kjølemaskinen er ideell slik at den leverer nødvendig effekt for å kjøle ned den mekaniske tilluften til 19 °C. Kjølemaskinens effektfaktor (COP) er satt til standard IDA ICE verdi, som er 3. Beskrivelse av hvilke tiltak som er implementert i de ulike scenarioene, kan sees av Tabell 8.4. Det samme gjelder antall timer med operativ temperatur over respektive grenser. Varighetskurver for antall timer i skolens åpningstid over 25 °C ved de ulike scenarioene, kan sees av Figur 8.6. Alle scenarioene har "vanlig ferietid".

**Tabell 8.4: Beskrivelse av optimeringstiltak og timer i skolens åpningstid med operativ temperatur over anbefalte grenser**

Scenario	Tiltak på mekanisk ventilasjon			Timer med operativ temperatur over...		
	Temperatur- kontroll kjøle- settpunkt	Økte luft- mengder	Mekanisk kjøling, effektbehov/ levert energi	25 °C	26 °C	27 °C
<b>Opprinnelig</b>	NEI	NEI	NEI	544	284	135
<b>A1</b>	25 °C	NEI	NEI	532	195	55
<b>A2</b>	25 °C	JA	NEI	530	167	42
<b>A3</b>	25 °C	NEI	1,4 kW/ 1,1 kWh/m <sup>2</sup> år	532	151	11
<b>A4</b>	25 °C	JA	1,8 kW/ 1,3 kWh/m <sup>2</sup> år	526	120	2
<b>B1</b>	24 °C	NEI	NEI	470	126	48
<b>B2</b>	24 °C	JA	NEI	441	101	38
<b>B3</b>	24 °C	NEI	1,4 kW/ 1,3 kWh/m <sup>2</sup> år	450	89	11
<b>B4</b>	24 °C	JA	1,8 kW/ 1,6 kWh/m <sup>2</sup> år	411	40	0



Figur 8.6: Varighetskurve for simulert operativ temperatur i trinnrom 24-A, med ulike tiltak implementert

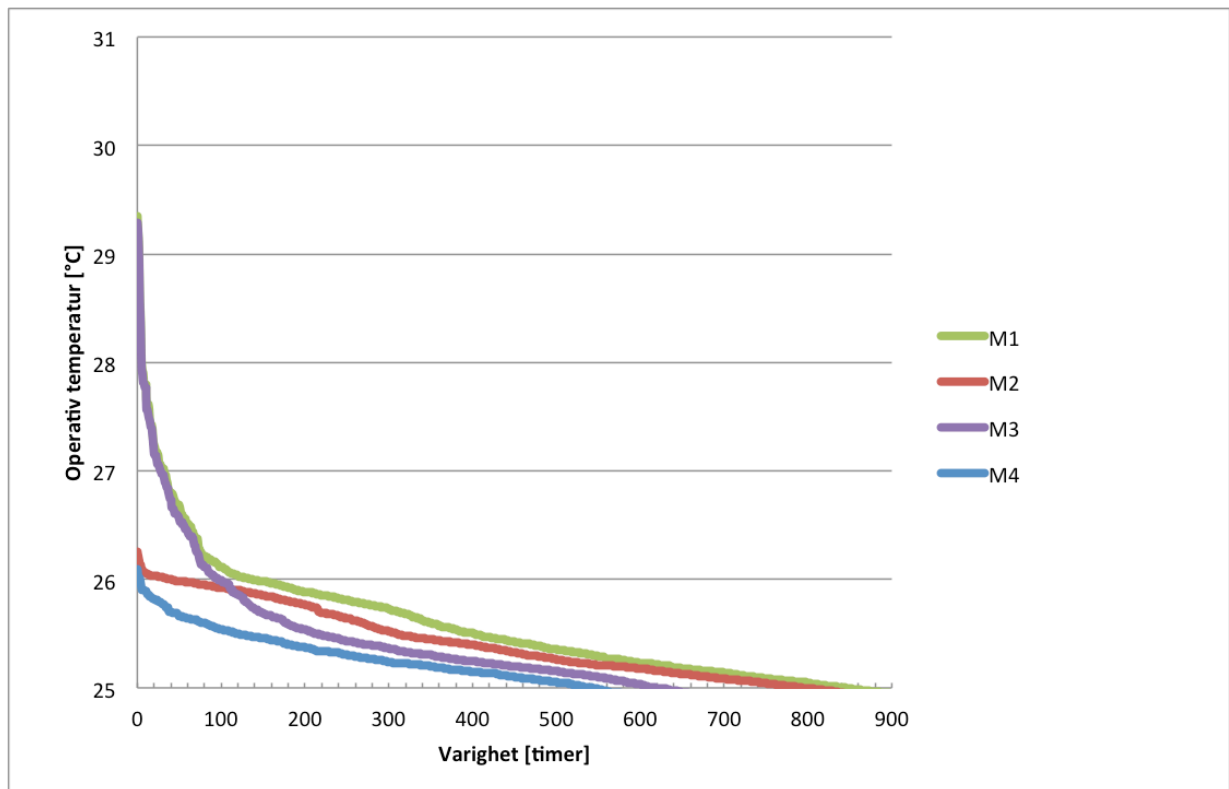
Fra Tabell 8.4 og Figur 8.6 kan det sees at styring etter temperatursettpunkt for det mekaniske anlegget vil være fordelaktig med hensyn på å begrense varigheten av høye temperaturer. Det kan også sees at det kan være nødvendig med høyere luftmengder og/eller mekanisk kjøling for å sikre tilfredsstillende termisk komfort på sommeren. Ventilasjonssystemet styrer etter lufttemperatur, på sommeren vil operativ temperatur være høyere enn denne. En oppnår derfor en relativ stor grad av operativ temperaturer over settpunkt på lufttemperatur på henholdsvis 24 °C og 25 °C.

Det er i tillegg utført simuleringer av fire mekanisk balansert ventilasjonsscenario. Her er luftmengder og styring med hensyn på CO<sub>2</sub>-nivå som beskrevet i Kapittel 7.5. Temperaturkontroll i form av kjølesettpunkt er satt til henholdsvis 24 °C og 25 °C. Det er i tillegg implementert mekanisk nattkjøling i scenarioene. Utenfor driftstid vil det mekaniske ventilasjonssystemet styre etter temperatursettpunkt på 16 °C i sonen.

Tilluftstemperaturen vil da senkes til 16 °C. I to av scenarioene er det implementert mekanisk ventilasjonskjøling, med ideell kjølemaskin som beskrevet tidligere. Beskrivelse av scenarioene samt antall timer i skolens brukstid med operativ temperatur over de gitte maksimalgrensene kan sees av Tabell 8.5. Mens varighetskurver kan sees av Figur 8.7. I disse scenarioene benyttes det også "vanlig ferietid".

**Tabell 8.5: Beskrivelse av mekanisk balansert ventilasjon scenario for sommerkomfort simuleringer og timer i skolens åpningstid med operativ temperatur over anbefalte grenser**

Scenario	Mekanisk ventilasjon		Timer med operativ temperatur over...		
	Temperatur-kontroll kjølesettpunkt	Mekanisk kjøling, effektbehov/ levert energi	25 °C	26 °C	27 °C
<b>M1</b>	25 °C	NEI	845	137	35
<b>M2</b>	25 °C	2 kW/ 6,4 kWh/m <sup>2</sup> år	792	41	0
<b>M3</b>	24 °C	NEI	623	96	29
<b>M4</b>	24 °C	2 kW/ 6,8 kWh/m <sup>2</sup> år	542	4	0



**Figur 8.7: Varighetskurve for simulert operativ temperatur i trinnrom 24-A, med ulike scenario med mekanisk balansert ventilasjon**

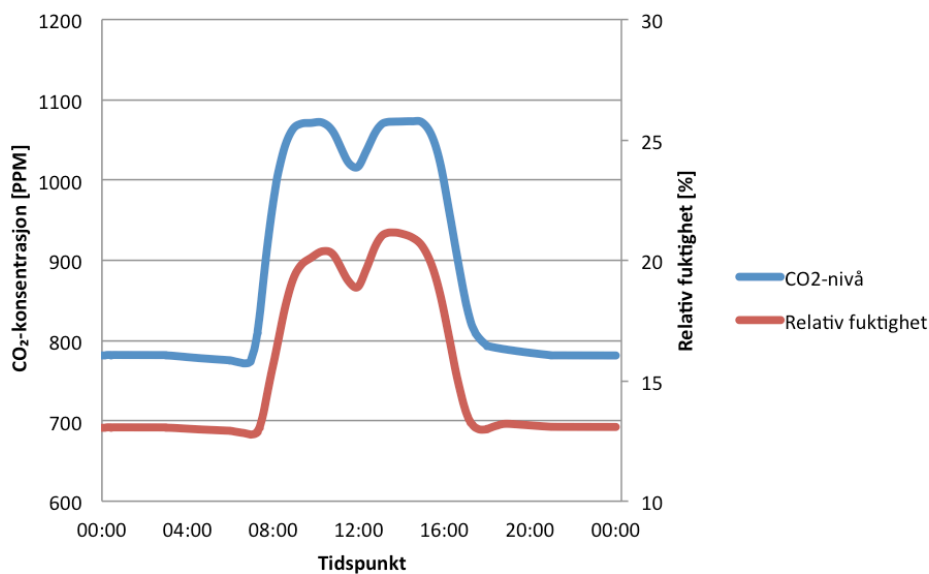
Det kan sees at det er færre antall timer i skolens åpningstid over 26 °C og 27 °C for mekanisk balanser ventilasjonsscenario, enn for lignende mixed-mode scenario. Dette skyldes at den mekanisk nattkjølingen er mer effektiv enn nattkjøling med vinduslufting. Samtidig kan det sees at det i disse scenarioene er flere timer med temperatur over 25 °C. I mixed-mode scenarioene vil vinduene styres etter kjølesettpunkt på 22 °C. Dette vil særlig være effektivt i mellomsesongen. Temperaturdifferansen mellom ute og inne er da stor nok til å generere tilfredsstillende luftmengder på grunn av termisk oppdriftstrykk. Samtidig er utetemperaturen høy nok til at vindusåpning ikke begrenses for å hindre avvik i termisk komfort. Ved implementering av mekanisk ventilasjonskjøling vil dessuten vinduslufting begrense nødvendig effekt- og energibehov til kjølemaskinen. Mekanisk nattkjøling vil medføre et høyere energiforbruk til vifter. Mekanisk nattkjølingsstrategi bør derfor optimaliseres med hensyn på å gi en fornuftig balanse mellom økt energibruk til vifter og forbedring av termisk komfort.



### 8.2.2 Vintersimulering

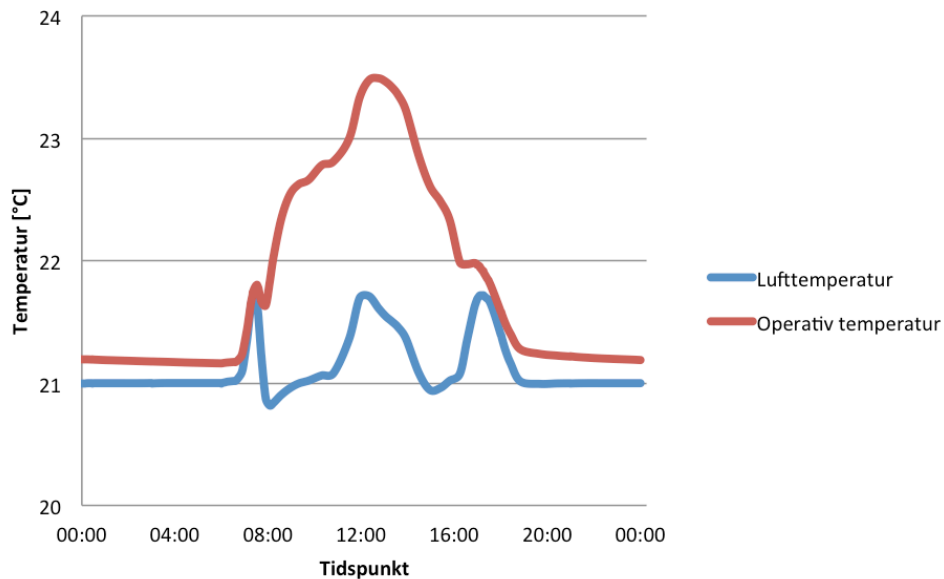
I vintersimuleringen brukes kontrollstrategien presentert i Kapittel 7.3, uten nattkjøling. Simuleringene kjøres over en syntetisk vinter designdag. Fra Figur 8.8, Figur 8.9 og Figur 8.10 kan resultat av vintersimuleringen i form av CO<sub>2</sub>- og relativ fuktighetsnivå, temperaturutvikling i trinnrommet samt vindusåpningsgrad og pådrag på mekanisk ventilasjon sees.

#### *Simulering over syntetisk designdag*



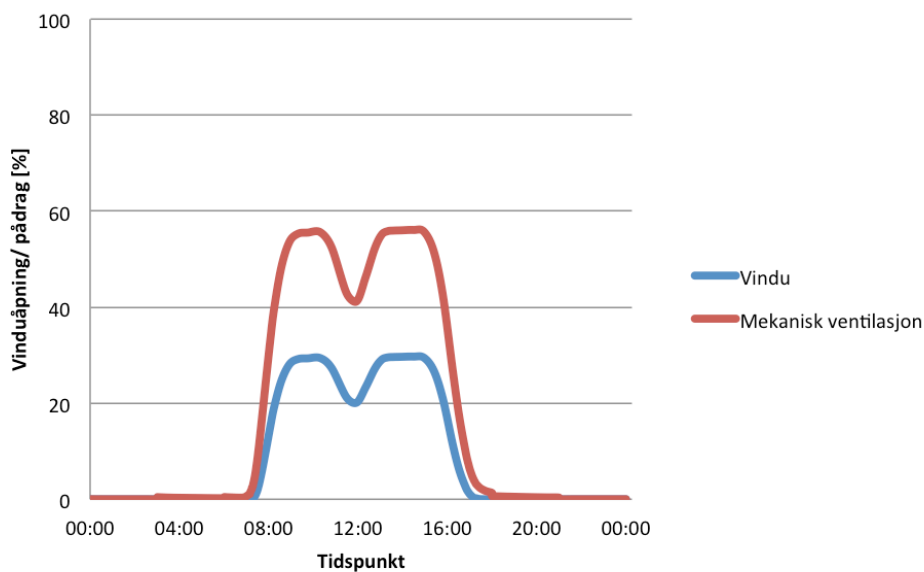
Figur 8.8: CO<sub>2</sub>-nivå og relativ fuktighet i trinnrom ved simulering med syntetisk vinterklima

Det kan sees at CO<sub>2</sub>-nivået ligger rett over anbefalt grense på 1000 ppm. Det mekaniske ventilasjonsanlegget styrer etter et CO<sub>2</sub>-settpunkt på 750- 1350 ppm da utetemperaturen er under 10 °C. Vinduene styrer etter CO<sub>2</sub>-settpunkt på 800- 1350 ppm, med maksimal åpningssignal 0,5, som presentert i Kapittel 7.3.1. Driften av det mekaniske ventilasjonsanlegget og vinduene denne dagen, kan sees av Figur 8.10. Luftens relative fuktighet ligger innenfor intervall som er anbefalt under vinterforhold, for bygninger i kategori 2 og 3. Som tidligere beskrevet er det anbefalt å ha luftfuktighet over 15 %. Det kan sees at % RF i perioden utenfor driftstid vil ligger under denne grensen. Relativ fuktighetsnivå stiger imidlertid i driftstiden, grunnet fuktavgivelse fra brukere. Relativ fuktighetsnivå ligger derfor i området rundt 20 % når det er tilstedeværelse i trinnrommet, hvilket er akseptabelt.



**Figur 8.9: Temperatur i trinnrom ved simulering med syntetisk vinterklima**

Operativ temperatur ligger i vintersimuleringen innenfor kravene til bygningskategori 2, på  $22,0 \pm 2,0$  °C. Som beskrevet så sørger ideelle varmeapparat for stor nok varmeeffekt for å opprettholde lufttemperatur i trinnrommet til settpunkt 21 °C. Vinduene vil etter kontrollstrategien satt her åpne selv på de kaldeste dagene, på bakgrunn av trinnrommets CO<sub>2</sub>-nivå. Dette kan sees av Figur 8.10. Som tidligere beskrevet vil dette kreve stor effekt fra varmeapparatet, da temperaturen i sonen må holdes over settpunkt på grunn av kald tilluft fra vinduene.



**Figur 8.10: Relativ vindusåpning og relativ pådrag på mekanisk ventilasjon ved simulering med syntetisk vinterklima**

Vinduernes åpningsgrad og pådraget på mekanisk ventilasjon følger kurven for CO<sub>2</sub>-nivå i trinnrommet, jamfør Figur 8.8. Dette er naturlig da kontrollstrategien til både vindu og mekanisk ventilasjon vil styre etter CO<sub>2</sub>-nivå i rommet, da det ikke er kjølebehov.

Figur 8.10 indikerer at vinduene store deler av dagen vil ha en åpningsgrad på rundt 30 % av maksimal åpning. I realiteten er nok dette lite sannsynlig. Dette fordi oppvarming av trinnrommet til temperatur settpunkt, med kald uteluft direkte tilført gjennom vinduene vil kreve svært stor varmeeffekt. Samtidig vil direkte tilførsel av kald uteluft medføre stor risiko for termisk ubehag. På kalde dager som denne vil antagelig vinduene største delen av dagen være stengt, med forhåndsdefinerte utluftninger typisk i friminutt.



## 9 Validering av simuleringsmodeller

Simuleringsresultat av energiforbruk er sammenlignet med målt energi over året på Mesterfjellet skole. Det er også gjort sammenligninger av simuleringsresultat med måledata fra den 10 april. Det er her utført simuleringer av denne dagen, der faktisk utetemperatur målt av værstasjonen på taket er lagt som input i IDA ICE.

Simuleringsmodellene som er brukt for sammenligning har kontrollstrategier beskrevet i Kapittel 7.3.

### 9.1 Validering mot energiforbruk

Tabell 9.1: Sammenligning av måling og simulering av levert energi ved Mesterfjellet skole

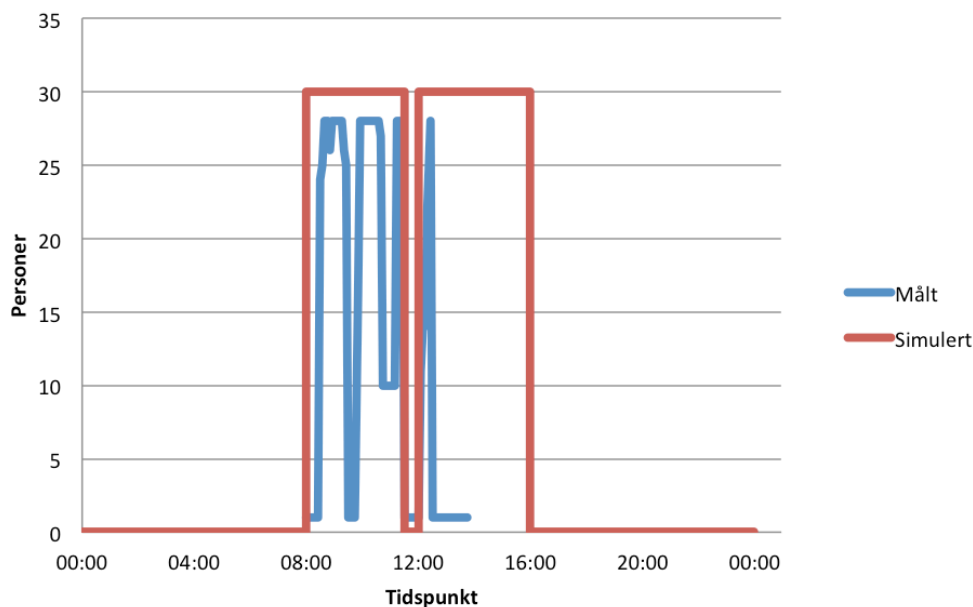
	Levert energi fra målinger	Levert energi fra simulering
	<i>kWh/år</i>	<i>kWh/år</i>
<b>Romoppvarming</b>	22,3	22,1
<b>+ Varmtvann oppvarming</b>	7,3	7,3
<b>= Fjernvarme/ nærvarme</b>	29,6	29,4
<b>+ Elektrisitet</b>	36,5	36,0
<b>= Totalt levert energi</b>	<b>66,1</b>	<b>65,4</b>

Levert energi fra snøsmeltings anlegget er her neglisjert. Vedlikeholdstekniker ved Mesterfjellet skole fortalte at dette anlegget hadde et langt større energiforbruk enn forventet og at det derfor ble skrudd av i løpet av vinteren. I simuleringene er det ikke tatt hensyn til et slikt anlegg. En kan se at spesifikk levert energi er relativt lik mellom simuleringsmodell og målinger fra skolen. Fordelingen mellom energi fra fjernvarme/ nærvarme anlegget og elektrisitet er også relativt lik. Dette kommer naturlig nok av at vinduenes åpningsbegrensning er satt med hensyn på å få en lik fordeling av energi til romoppvarming og energi til vifter og pumper. Levert energi til tappevannsoppvarming er i simuleringsmodellen satt med bakgrunn på målinger, derfor er disse like. Det var ikke mulig å hente ut spesifikke målinger av levert energi til belysning, utstyr samt vifter

og pumper, kun en samlet elektrisitets post. Simuleringsmodellens energiforbruk til belysning og utstyr er som tidligere beskrevet satt på bakgrunn av designkriterier brukt på Mesterfjellet skole. Disse energipostene skal derfor være relativt like. Det er ikke foretatt graddagskorrigering av energimålingene. Det er altså ikke foretatt korrigering av avvik i forhold til et normalår, for fyringssesongen mellom 16 mai 2014 og 15 mai 2015. Det foreligger ikke graddagstall for våren 2015, men graddagstallene for 2014 viser at dette i Larvik var 84 % av et normalår basert på målinger i perioden 1981-2010. Ved å bruke dette graddagstallet for perioden 16 mai 2014 til 15 mai 2015 blir spesifikk energibruk til romoppvarming 26,5 kWh/m<sup>2</sup>, mens totalt spesifikt energibruk blir 70,4 kWh/m<sup>2</sup>. Hvilket medfører at simulert energiforbruk til romoppvarming avviker noe fra målingene.

## 9.2 Validering mot dagsmålinger

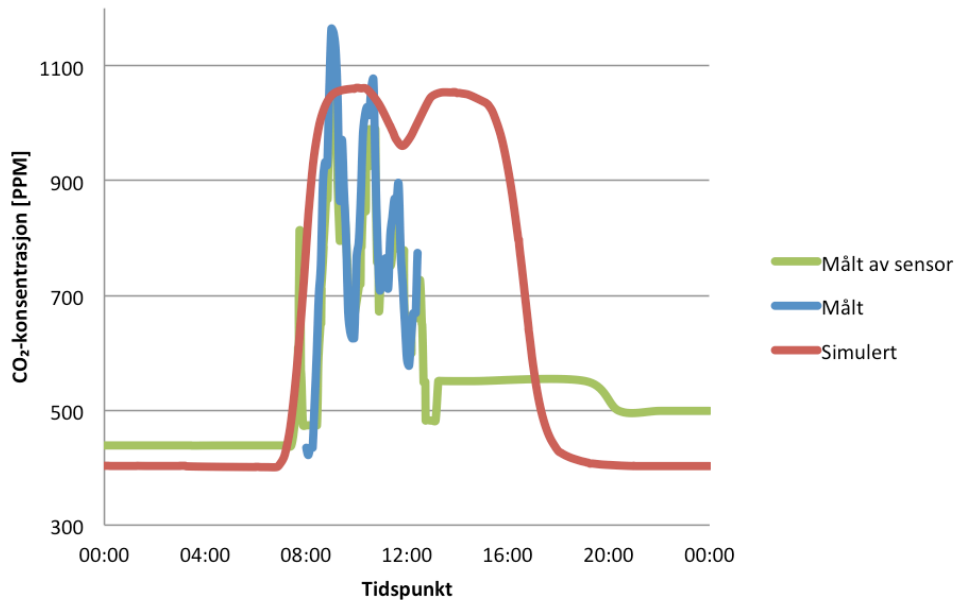
Dagssimuleringer fra modellen av trinnrommet ble sammenlignet med målingene. Simulert dag er den 10 april. Det var denne dagen tilgjengelig data fra målinger, samt måledata fra SD-anlegget for hele dagen.



**Figur 9.1: Tilstedeværelse, målt antall personer i trinnrom sammenlignet med simulert ut fra brukertetthet og driftstid for undervisningsrom**

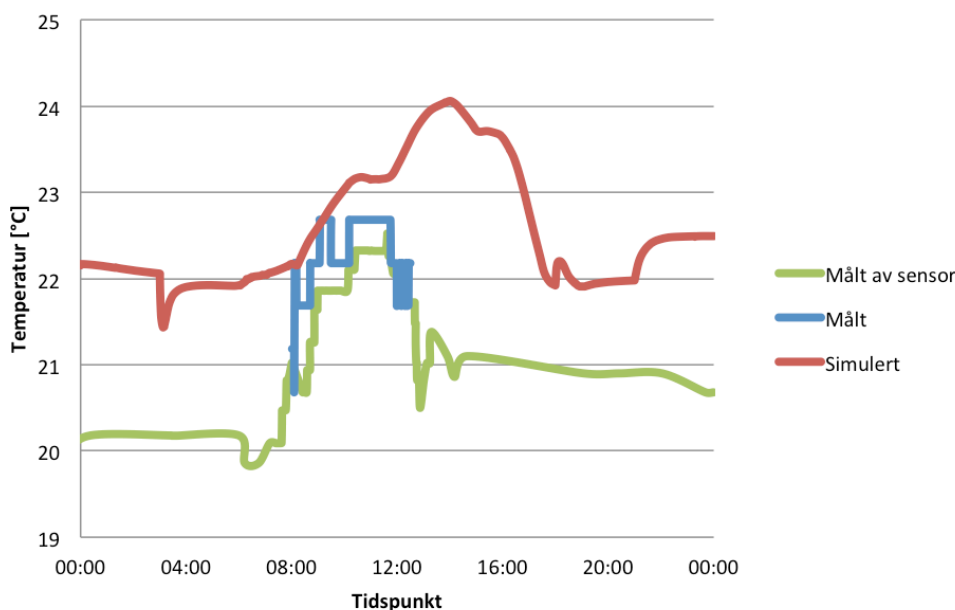
Det kan sees at målt antall tilstedeværende brukere er langt mer varierende enn det som ligger til grunn for simuleringene. Målingen varte denne dagen bare frem til 12:30, men

trinnrommet skulle ut fra klassens timeplan ikke brukes etter dette klokkeslett. Som tidligere beskrevet krever detaljerte tidsplaner lengre simuleringstid. Tidsplanen lagt inn i IDA ICE forutsetter derfor at alle 30 elever er inne i trinnrommet hele skoledagen, bortsett fra i langfriminuttet midt på dagen.



Figur 9.2: CO<sub>2</sub>-nivå i trinnrommet, målinger sammenlignet med simuleringer

En kan se at målt CO<sub>2</sub>-nivå har toppe høyere enn det som er simulert. Samtidig fører varierende tilstedeværelse i rommet med flere kortere pauser, til større variasjon i målt CO<sub>2</sub>-nivå. Simulert CO<sub>2</sub>-nivået i trinnrommet vil i langfriminuttet synke noe, men vil i løpet av dagen være langt mer stabilt enn målt nivå. Da rommet denne dagen ikke er i bruk etter 12:30 kan en se at målt CO<sub>2</sub>-nivå er relativt lavt siste del av dagen. Dette i motsetning til simuleringer, hvor det er full brukerbelastning frem til klokken 16:00.

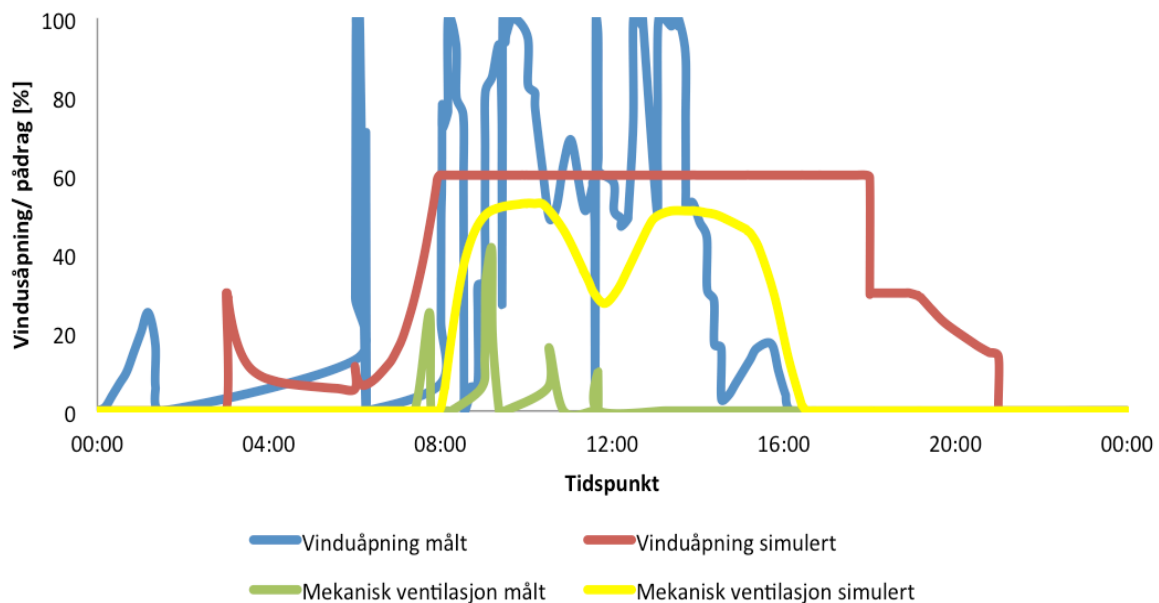


**Figur 9.3: Temperatur i trinnrommet, målinger sammenlignet med simuleringer**

Fra Figur 9.3 kan det sees at simulert temperaturutviklingen i trinnrommet er relativt ulik den som ble målt. Simuleringsmodellen har et kjølesettpunkt på 22 °C i driftstiden. Dette betyr at vinduene ved temperatur over dette settpunktet vil styres på bakgrunn av temperatur i sonen. I virkeligheten kan dette kjølesettpunktet variere. Ut fra grafen ser en at kjølesettpunkt for det reelle anlegget den 10 april er lavere enn i simuleringsmodellen. Oppvarmingsanlegget i rommet var hverken i simuleringsmodellen eller det reelle anlegget i drift denne dagen. Simuleringen oppnår også en del høyere temperatur enn det som er målt. Dette skyldes til dels at simuleringsmodellen har høyere og lengre brukerbelastning denne dagen, jamfør Figur 9.1. At temperaturen i trinnrommet før elevene kommer, i målingene er lavere enn i simuleringene, kan også gjøre at temperaturen gjennom dagen vil ligge på et lavere nivå. Fra kurven for simulert temperatur kan det sees at den får en liten oppsving etter klokken 21:00. Frem til dette vil vinduene være i drift og dermed styre etter temperatursettpunkt på 22 °C, se Figur 9.3. Klokken 21:00 vil vinduene lukke, trinnrommet vil da få en temperaturøkning grunnet varmeavgivelse fra termisk masse i bygningen. I simuleringsmodellen er det betonggulv med gulvbelegg samt eksponert betong i taket. Betong er godt egnet som termisk masse og en vil dermed få temperaturutjevning over døgnet. I virkeligheten har trinnrommet betonggulv med gulvbelegg som i simuleringsmodellen. Det er imidlertid nedsenket himling. Det er derfor grunn til å tro at eksponert termisk masse i simuleringsmodellen er noe for stor i



forhold til i virkeligheten. Dette i tillegg til mindre variabel brukerbelastning kan være grunnen til jevnere temperaturutvikling og mindre temperaturvariasjon over dagen.



Figur 9.4: Relativ vindusåpning og mekanisk ventilasjonspådrag, målinger sammenlignet med simuleringer

Figur 9.4 sammenligner målt og simulert vindusåpning. I tillegg sammenlignes målt og simulert mekanisk ventilasjonspådrag. Som beskrevet tidligere er trinnrommet ikke i bruk siste del av dagen. Det er derfor ikke behov for å ventilere bort CO<sub>2</sub> og overskuddsvarme, avgitt fra brukere i dette tidsrom. Ventilering gjennom vinduene er kun i liten grad i bruk etter 14:00. Grunnen til at vinduene har stor målt åpningsgrad i perioden fra 12:30 til 14:00, er at lufthastighetsmålinger med vindusåpning overstyrt til maksimal åpning ble utført i denne perioden. Vindusåpningsgraden er i simuleringene styrt etter temperatur med begrenset åpningsgrad til 60 %, grunnet utetemperatur under 10 °C. Det kan sees at vinduenes målte åpningsgrad varierer langt mer enn simulert åpningsgrad. Dette skyldes at NV Advanced™ bruker forhåndsdefinerte kalendermoduler til å styre vinduenes åpningsgrad. Vinduenes åpningsgrad begrenses også av værparameterne vindhastighet og vindretning, samt nedbør. Dette er ikke tatt hensyn til i simuleringsmodellen. Et annet usikkerhetsmoment med den simulerte vindusluftingen er maksimal åpningsgrad. I virkeligheten er vinduene bunnhengt og maksimal åpningsgrad er begrenset til en kjedelengde på 24,5 cm. I simuleringene er maksimalåpning begrenset til 50 % av vindushøyden. I IDA ICE er det ikke mulig til å begrense bunnhengte vindu med en gitt kjedelengde på vindusmotoren, slik som Figur

4.2 viser det er gjort på Mesterfjellet skole. Det er derfor et ekstra usikkermoment i forhold til maksimal ventilasjonsrate gjennom vinduene.

Det kan sees at den mekaniske ventilasjonen i større grad er i bruk i simuleringsmodellen enn det som er målt ved Mesterfjellet skole den aktuelle dagen. I Kapittel 7.3.2 ble den mekaniske ventilasjonen ut fra måledagene 13 mars og 10 april antatt til å starte opp ved 1000 ppm. Dette har lagt grunn for simuleringsmodellens styring etter CO<sub>2</sub>-settpunkt fra 1000- 1350 ppm ved utetemperatur over 10 °C. I simuleringsmodellen vil den mekaniske ventilasjonen derimot styres etter CO<sub>2</sub>-settpunkt på 750-1350 ppm, fordi utetemperaturen er under 10 °C. Dette er som tidligere beskrevet satt for at den mekaniske ventilasjonen skal stå for primær ventilasjon når utetemperaturen er under 10 °C. Dette for å minimere risiko for avvik i termisk komfort. Trinnrommet har denne dagen behov for kjøling, hvilket i virkeligheten kan tenkes å påvirke den mekaniske ventilasjonens CO<sub>2</sub>-settpunkt. Avvik mellom kontrollstrategien i simuleringsmodellen og virkeligheten kommer uansett frem denne dagen. Det hadde antagelig vært mer riktig å styre den mekaniske ventilasjonen etter CO<sub>2</sub>- settpunkt på 1000- 1350 ppm på dager som denne, med kjølebehov og utetemperatur etter Figur 6.1. I tillegg er målt CO<sub>2</sub>-nivået jevnt over dagen lavere enn simulert, hvilket vil gjøre at avviket mellom målt og simulert mekanisk ventilasjonspådrag vil bli enda større.

### 9.3 Diskusjon

Den største utfordringen med å konstruere en mest mulig valid simuleringsmodell har vært å definere kontrollstrategi for ventilasjon gjennom vindu og fra mekanisk anlegg. Det har vært noe mangelfullt med informasjon om hvordan de ulike styringsparameterne brukes ved de ulike driftsformene. Kontrollstrategiene lagt inn i simuleringen er forenklet. Det er ikke blitt tatt hensyn til forhåndsdefinerte kalendermoduler eller begrensninger ut fra målt værdata. I tillegg har det som beskrevet blitt gjort andre forenklinger. Blant annet med hensyn til tidsplaner for tilstedeværelse i de ulike rom, bygningsgeometri og maksimal vindusåpningsgrad. Reell utetemperatur er blitt lagt inn som input i IDA ICE ved simuleringer for validering. Værdata for relativ fuktighet, vindretning, vindhastighet og solinnstråling er imidlertid ikke lagt inn og baseres på ASHRAE IWEC klimafil for Oslo/ Fornebu. Dette medfører

unøyaktighet da skolen ligger i Larvik. I tillegg baseres disse på et normalår og ikke faktiske målinger ved skolen den aktuelle dagen. Vindprofilen som ligger til grunn for denne simuleringsdagen er for forsteder og baseres på Formel 7.1. Utrekning av vindhastighet ved de ulike vinduene på skolen vil antagelig avvike fra denne, grunnet variasjon i terrengkonstant fra vindu til vindu avhengig av bygningsgeometri og omkringliggende faktorer.

Sammenligninger mellom målinger og simuleringer av inneklima, samt av vindusåpningsgrad og mekanisk ventilasjonspådrag den 10 april, viser at det er avvik mellom simuleringsmodell og reelle målinger. Inneklimasimuleringene må derfor tillegges noe usikkerhet. Når det kommer til energisimuleringene så er simulert energi til romoppvarming noe mindre enn graddagskorrigererte målinger. Dette tyder på at det er enda større energisparingspotensial mellom første driftsåret og hva som er simulert for optimalisert kontrollstrategi. Det tyder også på at optimalisering er nødvendig for å oppnå energisparing i forhold til et mekanisk balansert ventilasjonsscenarioet.

Graddagskorrigeringer er basert på verdier for året 2014, ikke for perioden 16 mai 2014 til 15 mai 2015. Graddagskorrigeringen kan derfor avvike noe med hva som er reelt. For å undersøke hvor valid energiforbruket er i de ulike periodene av året er, skulle man hatt tilgjengelig målt energi de ulike månedene. Som tidligere beskrevet har Mesterfjellet skole et system der energiforbruk over ønsket periode kan hentes ut. Dette systemet virker per dags dato ikke. Det har derfor kun vært mulig å hente ut målt energi fra oppstart til dags dato.



## 10 Diskusjon

---

Her diskuteres målinger og simuleringer på Mesterfjellet skole, med tilhørende resultater. En del av dette er også diskutert i respektive kapitler. Denne diskusjonen vil oppsummere en del av dette, samt gi et mer helhetlig supplement. Ut fra denne diskusjon samt diskusjon i Kapittel 3.5 av inneklime i mixed-mode bygninger, vil mixed-mode som ventilasjonskonsept i moderne bygninger drøftes.

### 10.1 Målinger og resultat

Det er blitt utført målinger i trinnrom 24A på datoene 13 mars og 10 april. I tillegg til temperaturmålinger i tidsrommet mellom disse datoene. Som tidligere beskrevet var det lenge siden en del av måleutstyret var kalibrert, målingene må derfor tillegges relativt stor usikkerhet. Det er også hentet inn måledata fra bygningens SD-anlegg for å få et sammenligningsgrunnlag. Målingene fra Mesterfjellet skole brukes til evaluering av inneklime. Måleresultatene er også blitt brukt i tilnærmingen av en kontrollstrategi i simuleringsmodellen i IDA ICE, i tillegg til at modellen er validert mot disse.

Valideringen er allerede beskrevet og diskutert Kapittel 9. Måleresultatene som grunnlag for å evaluere inneklimateet i form av atmosfærisk- og termisk miljø vil bli drøftet her.

#### 10.1.1 Atmosfærisk miljø

Tilbakemeldinger fra andre studenter tilsa at det var lenge siden måleapparatene for CO<sub>2</sub>-målinger var kalibrert. Dette førte til at det ble utført prøvemålinger. Som Figur 5.1, Figur 5.2 og Figur 5.3 viser ble det her avdekket at apparatene måler ulikt, det må derfor tillegges disse målingene en relativ stor usikkerhet. Målinger fra CO<sub>2</sub>-sensor i rommet ble også innhentet for de to datoene for å få et sammenligningsgrunnlag. Denne har som beskrevet tidligere også en relativ stor usikkerhet. Selv om både målte verdier og sensorverdier har en relativ stor usikkerhet, kan det ut fra målingene konkluderes med at målingene i perioder er over anbefalt verdi på 1000 ppm. Dette gjelder særlig den 13 mars der brukerbelastningen jevnt over dagen var større, samtidig som graden av vinduslufting var mindre enn for den 10 april. I friminuttene synker CO<sub>2</sub>-nivået betraktelig. For å se negative effekter av CO<sub>2</sub> isolert sett må en, som tidligere beskrevet i

Kapittel 3.2.1, ha nivåer over 10 000 ppm. Anbefalt grense på 1000 ppm er satt ut fra komfortbaserte vurderinger. Det bør være et minstekrav at inneluftkvaliteten oppleves tilfredsstillende og en slik grense vil derfor være fornuftig i ikke industrielle bygninger. Man bør imidlertid kunne tillate at CO<sub>2</sub>-nivået overstiger 1000 ppm i kortere perioder. Målingene fra 13 mars tilsier imidlertid at nivået er over 1000 ppm store deler av skoledagen, hvilket må sies å være et avvik i anbefalt atmosfærisk miljø. Tilbakemeldinger fra elever og lærere tilsa også at luften i perioder opplevdes noe "tung".

### 10.1.2 Termisk miljø

Temperatur ble målt med loggere både i oppholdssone, over vindu og ved avtrekk. Målt temperatur i oppholdssone gav ikke indikasjon på avvik i termisk komfort. Heller ikke temperaturredifferanse mellom ankel- og hodenivå gav indikasjon på termisk ubehag, da den var innenfor anbefaling på 3 °C. Temperatur målt over vinduet varierte imidlertid mye og er i perioder noe lav. Denne luften skal i prinsippet blandes og varmes opp av romluften før den kommer i kontakt med brukerne. Elever som satt ved vindusrekken uttrykte imidlertid at det følte kaldt og ubehagelig. Det er ut fra dette grunn til å mistenke avvik i termisk komfort disse dagene.

Denne mistanken styrkes på bakgrunn av resultater fra lufthastighetsmålinger. Det tas her utgangspunkt i målingene fra 10 april. Dette skyldes at disse målingene ble utført med et nyere og mer nylig kalibrert apparat enn lufthastighetsmålingene 13 mars. Resultatene indikerer at målte verdier overskrider grensen for anbefalt maksimumshastighet i bygningskategori 1, 2 og 3, presentert i Tabell 3.3. Dette gjelder både i periode hvor vinduene er overstyrt til maksimal åpningsgrad og i periode hvor åpningsgraden er styrt etter WindowMaster sin kontrollstrategi. Turbulensintensiteten er også høyere enn normalt intervall for naturlig ventilerte rom og fortrenningsventilasjon. Kombinasjonen av kald tilluft med høy lufthastighet skaper termisk ubehag for brukerne og fører til en større prosentandel misfornøyde etter Formel 3.3. Dette ble det også gitt tilbakemeldinger på fra lærere og elever. Det må på bakgrunn av dette kunne sies at det er et avvik i forhold til anbefalinger for termisk miljø. Målinger av relativ luftfuktighet fra sensor i trinnrommet ble også hentet ut. Målingene fra denne de to måledagene var innenfor anbefalt område.

## 10.2 Simuleringer og resultat

Simuleringer med hensyn på energiforbruk og inneklime er blitt gjennomført.

Simuleringenes grad av validitet er drøftet opp mot målinger i Kapittel 9. Dette vil derfor i liten grad diskuteres her.

### 10.2.1 Energisimuleringer

Sammenligning av målt energi første driftsår ved Mesterfjellet skole og simulering av mekanisk ventilasjon scenario tyder på at ikke oppnås noen energibesparelsen ved å benytte mixed-mode ventilasjon. Et ventilasjonsscenario for mixed-mode ventilasjon ble konstruert på bakgrunn av informasjon fra Kapittel 4, samt ut fra måleresultat fra de to måledagene. I første omgang ble kontrollstrategien utformet for å gi en fordeling mellom energi til romoppvarming og energi til vifter og pumper mest mulig lik det som var målt ved skolen.

Kontrollstrategien ble så optimalisert med hensyn på å gi lavest mulig total energiforbruk, samtidig som den virker fornuftig med hensyn på å gi et godt inneklime. Sammenligning av simuleringsresultat mellom dette og mekanisk ventilasjonsscenario viser at mixed-mode ventilasjonen kan gi energibesparelse på 15,7 % eller 61 268 kWh. Mixed-mode scenarioet med optimalisert kontrollstrategi har da et spesifikt års energiforbruk på 55,3 kWh/m<sup>2</sup>. Alle energisimuleringer er foretatt uten snøsmeltings anlegg som er installert ved Mesterfjellet skole. Energiforbruket fra dette var uforholdsmessig høyt, det ble derfor avskrudd av driftspersonell ved skolen. Da målt energibruk ved Mesterfjellet skole det første året inkluderer en igangkjøringsperiode samtidig som det stadig gjøres optimaliseringer, er det grunn til å forvente lavere målt energiforbruk i årene som kommer. Simuleringene tyder på at det er nødvendig med en optimaliseringsperiode for å oppnå størst mulig potensiell energibesparelse sammenlignet med mekanisk ventilasjon. Et godt samspill mellom mekanisk anlegg og vinduslufting er av stor viktighet. Dette med hensyn på å optimalisere balansen mellom energiforbruk til oppvarming og vifteenergi. Ved høye utetemperaturer er det ønskelig å bruke vindusluftingen i så stor grad som mulig for å spare vifteenergi. Med lave utetemperaturer er det ønskelig å gjøre nytte av høyeffektiv varmegjenvinning og det mekaniske ventilasjonsanlegget bør derfor i stor grad benyttes. Et godt samspill mellom mekanisk ventilasjon og vinduslufting er dessuten viktig for å oppnå en god balansegang

mellom lavt energiforbruk og et godt inneklima. Tilrettelegging for optimalisering etter at bygningen er satt i drift virker fornuftig. Samspeilet bør dessuten tilpasses til de ulike rom sitt faktiske bruk og behov. Et godt SD-anlegg med god oversikt over energibruk og inneklima parametere på sone- og overordnet nivå er derfor særs viktig ved slike anlegg.

### 10.2.2 Inneklimasimuleringer

Det er utført sommer- og vintersimuleringer for å evaluere inneklima. I vintersimuleringen er kontrollstrategien presentert i Kapittel 7.3 benyttet, mens det i sommersimuleringen i tillegg benyttes nattkjøling. Simulering over en syntetisk sommerdag tyder på et noe høyt CO<sub>2</sub>-nivå. Da temperaturdifferansen mellom ute og inne er liten, vil ventilasjonen gjennom vinduene som følge av termisk oppdriftstrykk være begrenset. Siden utetemperaturen er over 10 °C, vil det mekaniske ventilasjonsanlegget styre etter CO<sub>2</sub>-settpunkt på 1000- 1350 ppm, hvilket medfører noe høye CO<sub>2</sub>-nivåer. Simuleringen over en syntetisk sommerdag viser dessuten til operativ temperatur opp mot 32 °C. Det er akseptabelt med operativ temperatur over anbefalt maksimalgrenser i en periode på 50 timer. Simuleringene over sommeren tyder imidlertid på at operativ temperatur overstiger anbefalte grense for alle bygningskategorier mer enn 50 timer. I simuleringen over sommeren vil vinduene stort sett være ved maksimal åpningsgrad i driftstid og ved halv åpning utenfor driftstid. Det vil i tillegg være solskjerming ved romtemperatur over 24 °C. At den operative temperaturen er over anbefalt grense utover perioden på 50 timer tyder derfor på at det er nødvendig med ytterlige tiltak. Det ble gjort tiltak i form av temperaturstyring på mekanisk ventilasjon, økte mekaniske luftmengder samt implementering av mekanisk ventilasjonskjøling. Simuleringene viser at styring av det mekaniske ventilasjonsanlegget etter temperatursettpunkt vil være hensiktsmessig for å begrense antall timer over maksimalgrenser. Simuleringen viser også at det kan være nødvendig med økte mekaniske luftmengder og/eller mekanisk kjøling for å sikre tilfredsstillende termisk komfort på sommeren. Ved implementering av mekanisk ventilasjonskjøling viser simuleringer at vinduslufting vil kunne begrense nødvendig effekt- og energibehov til kjølemaskinen. Vinduslufting vil dessuten begrense antall timer over 25 °C sammenlignet med ventilasjonsscenario av mekanisk balansert ventilasjonsscenario. Vinduslufting som tiltak for å skape økt termisk komfort er hensiktsmessig, spesielt i mellomsesongen hvor temperaturdifferansen er stor nok til å



generere et tilstrekkelig naturlig drivtrykk. Samtidig må ikke vinduenes åpningsgrad begrenses for å unngå trekk i oppholdssone.

Vintersimuleringene tyder på et CO<sub>2</sub>-nivå rett i overkant av 1000 ppm. Det mekaniske ventilasjonsanlegget vil stå for primær ventilasjonen med CO<sub>2</sub>-settpunkt 750- 1350 ppm. Det kan sees av Figur 8.10 at vindusluftingen også på de kaldeste dagene vil være aktiv, hvilket medfører et stort behov for effektbehov til romoppvarming. Dette fordi det er installert ideelle varmeapparat som leverer nok effekt til å opprettholde lufttemperatur i sonene til settpunkt 21 °C. I simuleringene av hele skolen ble effektbehovet for romoppvarming estimert til 381,5 kW for mixed-mode ventilasjonsscenarioet. Til sammenligning var simulert effektbehov ved mekanisk ventilasjon 75,3 kW. Det er derfor antatt at effektbehovet på 381,5 kW er urealistisk høyt. I kontrollstrategien optimalisert for en fornuftig balansegang mellom et godt innklima og lavt energiforbruk, ble effektbehovet simulert til 111 kW. Den optimaliserte kontrollstrategien virker mer fornuftig, da den gir lavere total energiforbruk grunnet lavere energiforbruk til romoppvarming. Samtidig senkes effektbehovet til romoppvarming drastisk. Ved denne kontrollstrategien økes energi- og effektbehov til vifter og pumper noe. Denne økningen er imidlertid langt mindre enn nedgangen i energi- og effektbehov til romoppvarming. Termisk komfort vil også ved en slik kontrollstrategi være bedre, da vinduene i langt mindre grad åpner ved lave utetemperaturer. Dette reduserer risikoen for trekk i oppholdssone betraktelig.

Det må som tidligere beskrevet tilskrives noe usikkerhet til resultatene fra simuleringene, da særlig innklimasimuleringene. Noe grunnet forenklinger blant annet i tidsplaner, bygningsgeometri og vindusåpningsgrad, men hovedsakelig grunnet usikkerhet rundt faktisk kontrollstrategi. Det er i denne kontrollstrategien ikke tatt hensyn til forhåndsdefinerte kalendermoduler eller begrensninger ut fra målt værdata. Det har også vært noe begrenset med informasjon om hvordan de ulike styringsparameterne brukes ved ulike driftsformer. Det er derfor tatt antagelser ut fra tilgjengelig informasjon samt målinger fra Mesterfjellet skole.

### 10.3 Mixed mode ventilasjon i moderne bygninger

I dette kapittelet vil mixed-mode ventilasjon i moderne bygninger drøftes. I tillegg til erfaringene fra Mesterfjellet skole diskutert tidligere i dette kapittelet, vil det bli tatt utgangspunkt i diskusjon 3.5.

Som tidligere beskrevet har mixed-mode bygninger potensial for høyere brukertilfredshet, gjennom tilrettelegging for en større grad av brukerkontroll. Samtidig har tidligere studier av mixed-mode bygninger i Larvik kommune vist at det er risiko for avvik med hensyn på både termisk komfort og atmosfæriskmiljø. Et tilfredsstillende inneklima er viktig, både med hensyn på å unngå negative helseeffekter samt i forhold til brukernes produktivitet. I kontorbygninger er den største utgiften lønnsutbetalinger til de ansatte, en nedgang i produktiviteten kan derfor få store økonomiske konsekvenser. Skolebygninger er en viktig læringsarena, her "produseres" kanskje vår viktigste eksportvare, kunnskap. Negative helseeffekter som følge av dårlig inneklima gir dessuten ikke bare ubehag for den det gjelder. Sykefravær og offentlige helseutgifter koster samfunnet store summer hvert år. Et dårlig inneklima har derfor potensialet til å få store negative samfunnsøkonomiske konsekvenser. Det er derfor viktig at mixed-mode løsningene kan argumentere med et tilfredsstillende inneklima, for å være konkurransedyktige med konvensjonelle løsninger med mekanisk balansert ventilasjon.

Målinger og simuleringer ved Mesterfjellet skole viser til avvik både i termisk komfort og akseptabelt atmosfærisk miljø. Temperatur- og lufthastighetsmålinger samt tilbakemeldinger fra brukere peker på at trekk er et problem. Kald tilluft med hastighet langt utover anbefalt verdi ble målt med drift styrt etter WindowMaster styringssystemet NV Advanced™. Dette er særlig problematisk ved arbeidsstasjoner nær vinduene. Brukerne har imidlertid mulighet til å overstyre vinduene. Systemet vil da skifte tilbake til automatisk drift etter en gitt periode. Tilbakemelding fra lærerne i klasse 6A tilsa at dette ofte ble gjort. Samtidig viser målinger og simuleringer at det i driftstid i lengre perioder er et CO<sub>2</sub>-nivå over anbefalt grenseverdi på 1000 ppm. Tilbakemeldinger fra elever med arbeidsstasjon lengst unna vinduet tilsa at det i perioder var tung luft. Dette tyder på at NV Advanced™ styrer vindusluften for lite restriktivt. Samtidig som CO<sub>2</sub>-settpunkt for det mekaniske ventilasjonsanlegget burde vært lavere. Vinduene skal i prinsippet styres etter vindtrykkoeffisienter satt på

bakgrunn av CFD- beregninger, vindretning og vindhastighet. Dette for å begrense vindusåpning hvis det regner eller blåser for mye. Ingen av dagene var særlig vindfulle, det var heller ikke nedbør. Lufthastigheten i rommet var allikevel høy. En kan stille spørsmål til om begrensning av vinduenes åpningsgrad grunnet vindforhold ute skulle vært mer restriktiv også ved lavere vindhastigheter. Dette for å minimere risiko for lufthastigheter i oppholdssone utover anbefalt verdi.

Som beskrevet er det mekaniske anlegget på Mesterfjellet skole neddimensjonert. Ventilasjonsanlegget er dimensjonert etter komfortkriterier på vinterstid og ikke for fjerning av overskuddsvarme på sommeren. Det er her tenkt at vindusluftingen skal sørge for å fjerne overskuddsvarmen på sommerstid. Lav temperaturdifferanse mellom ute og inne fører imidlertid til et begrenset termisk oppdriftstrykk. Fra sommersimuleringen kan en se at operativ temperatur i trinnrommet overstiger anbefalte verdier utover akseptabel periode på 50 timer. Ved å benytte seg mer av det mekaniske ventilasjonsanlegget på sommeren i form av temperatur styring vil øke termisk komfort. Simuleringer viser imidlertid at det kan være nødvendig med høyere dimensjonerte luftmengder fra det mekaniske ventilasjonsanlegget. Dette for å bistå vindusluftingen i fjerning av overskuddsvarme og dermed sikre et tilfredsstillende termisk miljø på sommerstid. Høyere luftmengder betyr imidlertid at argumentet om nedskalering av mekanisk ventilasjonsanlegg i mixed-mode systemet begrenses. Building System Integrator har anslått at investeringskostnaden mellom mixed-mode anlegg og mekanisk balansert anlegg er relativt like, nettopp på grunn av denne neddimensjoneringen. En lavere grad av neddimensjonering medfører at investeringskostnadene ved mixed-mode anlegg vil bli høyere enn ved et mekanisk balansert anlegg. Mekanisk kjøling vil også kunne være nødvendig for å sikre akseptabel termisk komfort på sommeren, vindusluftingen vil da bidra til å begrense dette kjølebehovet.

Problemstillingen rundt hvordan utendørs forurensning kan skape avvik i akseptabelt atmosfærisk- og akustisk miljø er ikke undersøkt ved Mesterfjellet skole. Lokale vurderinger av uteforholdene bør gjennomføres, når mixed-mode ventilasjon vurderes brukt. I bygninger som i store deler av pollensesongen baserer seg på ventilasjon gjennom vinduer, bør problemstillingen vedrørende avvik i atmosfæriskmiljø for pollenallergikere også overvåkes nøye. Det bør være plan for å avdekke om brukere med

pollenallergi opplever ubehag. I tillegg bør det være planer for å sikre denne gruppen et akseptabelt inn klima dersom det oppleves ubehag. Som tidligere nevnt har forskning vist at gradvis eksponering for allergener kan indusere toleranse hos allergikere. Dette blir brukt for å argumentere for at mennesker og da særlig barn, i større grad bør oppholde og utfolde seg i frisk og mangfoldig natur. Dette har også blitt brukt som argument for naturlig ventilasjon. Skoler skal fremme høy prestasjonskultur. I miljø der læring skal stå i sentrum, bør et godt inn klima også for allergikere være høyeste prioritet. I pollensesongen kan det ikke komme utenom at dette oppnås best med mekanisk ventilasjon med filtrering for minimal polleneksponering. På en annen side krever mekaniske anlegg mer vedlikehold og må holdes tørre med tilstrekkelig hyppig filterskifte, for å ikke selv bli en forurensningskilde. Da mixed-mode anlegg har to ventilasjonssystemer er disse mindre sårbare ved sviktende vedlikehold enn mekaniske ventilasjonsanlegg. Dette bør imidlertid hovedsakelig brukes som et argument for tilstrekkelig vedlikehold.

Når man skal vurdere om mixed-mode ventilasjon er et egnet ventilasjonskonsept i moderne bygninger, må fordelene og ulempene veies mot hverandre. I Tabell 10.1 er det satt opp et sammendrag av fordeler og ulemper ved mixed-mode ventilasjon som har blitt drøftet her.

**Tabell 10.1: Sammendrag av fordeler og ulemper ved mixed-mode ventilasjon**

<b>Fordeler</b>	<b>Ulemper</b>
Mulighet for neddimensjonering av mekanisk anlegg	Risiko for termisk ubehag i form av lav temperatur på tilluft og høy lufthastighet, opplevelse av trekk
Potensiell besparelse i total levert energi	Risiko for operative temperaturer utover anbefalte verdier på sommeren
Redusert behov for mekanisk kjøling	Avvik i anbefalinger til CO <sub>2</sub> -nivå
Mulighet for økt termisk komfort i mellomsesongen, i forhold til mekanisk balansert ventilasjonsscenario	Stor usikkerhet vedrørende pollenproblematikk og annen utendørs forurensning
Lavere effektbehov for vifter	Høyere effektbehov for romoppvarming
Mindre sårbart for manglende vedlikehold	Høyere grad av kompleksitet, nødvendig med godt SD-anlegg for optimaliseringer

## 11 Konklusjon

---

For å evaluere bruken av hybride mixed-mode ventilasjonsløsninger vil det tas utgangspunkt i tre ulike perspektiv. Mixed-mode løsninger vil evalueres fra et brukerperspektiv, et bygningseierperspektiv samt en kommunes perspektiv.

Målinger, simuleringer og brukertilbakemeldinger ved Mesterfjellet skole peker alle på at det vil være avvik i termisk komfort og akseptabelt atmosfærisk miljø. Dette er også blitt indikert av andre studier av mixed-mode bygninger i Larvik. Brukerne har mulighet til å overstyre vinduene, noe som ofte ble gjort. Vinduslufting har potensialet til å gi økt brukerkomfort gjennom større grad av brukerkontroll på dager der uteforholdene ligger til rette for dette. Det menes allikevel at dette vil oppnås best med vinduer som åpnes og lukkes på bakgrunn av brukernes preferanser, ikke med et system som brukerne må overstyre grunnet termisk ubehag. En slik løsning menes det ikke vil gi brukerne følelse av større kontroll over eget miljø, heller tvert i mot. I tillegg er det en risiko for at utendørs forurensning kan skape avvik i akseptabelt atmosfærisk og akustisk miljø. Direkte tilførsel av ufiltrert luft gjennom vinduer kan i pollensesongen skape ubehag for pollenallergikere.

Ved Mesterfjellet skole er Larvik kommune både bygningseier og arbeidsgiver. Fra en isolert rolle som bygningseier kan en mixed-mode løsning være fordelaktig. Fra simuleringene viser en sammenligning av mixed-mode ventilasjon og mekanisk balansert ventilasjon en potensiell energibesparelse på 15,7 %. Simuleringen viser imidlertid viktigheten av et godt SD-anlegg for å få til en best mulig optimalisering. Det er i tillegg mulighet for neddimensjonering av det mekaniske anlegget. Simulering av Mesterfjellet skole indikerer at det mekaniske anlegget i stor grad bør utnyttes på sommeren. Dette i form av styring etter temperatursettpunkt for å øke termisk komfort. Simuleringene viser dessuten at større mekaniske luftmengder kan være nødvendig og at det mekaniske anlegget dermed i for stor grad er neddimensjonert, med hensyn på å sikre tilfredsstillende termisk komfort på sommeren. Det kan i tillegg være behov for mekanisk kjøling. Dette behovet vil være mindre ved mulighet for ventileringsløsninger gjennom

vinduer. Nedskalering av mekanisk anlegg er mulig, men det er vanskelig, ut fra undersøkelsene gjort her, å si hvor stort dette potensialet er i henhold til å gi et godt termisk inneklima på sommeren.

Det tas igjen utgangspunkt i Larvik kommune. Kommunen har et arbeidsgiveransvar ovenfor skolens ansatte. I tillegg har kommunen i følge Opplæringsloven (1998) et ansvar for å tilby elever i grunnskole og videregående skole et godt fysisk miljø som fremmer helse, trivsel og læring. Kommunen har også klima- og energimål der satsingen på hybrid ventilasjon har inngått. Som kommentert viser simuleringene potensial for energibesparelse. I tillegg til å gi en potensiell økonomisk gevinst, har dette potensial til å gi en miljømessig gevinst, hvilket er positivt med hensyn på Larvik kommunes klima- og energimål. Norges kanskje viktigste eksportvare er kunnskap. Hovedfokus i skolebygninger bør derfor være et godt inneklima som fremmer helse, trivsel og læring. Energibesparende tiltak burde ved slike bygg komme i andre rekke og tiltak bør kun implementeres dersom det ikke går på bekostning av et godt inneklima. Ved Mesterfjellet skole viser målinger, simuleringer og brukertilbakemeldinger at det er stor risiko for avvik i termisk komfort og akseptabelt atmosfærisk miljø. Konklusjonen er derfor at en løsning som den ved Mesterfjellet skole ikke er bærekraftig i moderne bygninger.

På et generelt grunnlag konkluderes det med at potensielle gevinster for mixed-mode ventilasjonsanlegg med automatisk styrt vinduslufting ikke veier opp for potensielle ulemper. Vinduslufting som et tiltak for å forbedre termisk komfort er positivt, men dette bør kontrolleres direkte av brukerne. I skoler og kontorbygninger kan avvik i akseptabelt inneklima i tillegg til å få store helsemessige konsekvenser, få store økonomiske konsekvenser i form av nedsatt produktivitet. Sykefravær og offentlige helseutgifter samt dårligere læring medfører dessuten negative samfunnsøkonomiske konsekvenser. Det menes at økt risiko for avvik i akseptabelt inneklima ved mixed-mode ventilasjonsløsninger, ikke veier opp for potensiell energi- og effektbesparelse. Hvis man skal benytte mixed-mode ventilasjonsanlegg med automatisk vinduslufting, må det undersøkes og komme frem til designstandarder på hvordan man kan unngå trekk, samt hvordan redusere eksponering av pollen og andre luftforurensninger. Optimal plassering av vinduer for å unngå utendørs støy er også en forutsetning.

### 11.1 Forslag til videre arbeid

- Livssyklusanalyser med hensyn på kostnad og CO<sub>2</sub>-utslipp, av mixed-mode ventilasjonsanlegg sammenlignet med konvensjonelle anlegg med mekanisk balansert ventilasjon. Dette for å vurdere om mixed-mode ventilasjon i et livssyklusperspektiv er lønnsomt sammenlignet med mekanisk balansert ventilasjon. For å gi et riktig bilde av sammenlignet investeringskostnad, bør også graden av hva som er fornuftig neddimensjonering av mekanisk anlegg i mixed-mode bygninger vurderes. Dette for å gi et akseptabelt inneklima på sommeren.
- For å supplere vurderingsgrunnlag av inneklima på sommer- og vinterstid, kan det gjøres målinger av termisk komfort og CO<sub>2</sub>-nivå på sommer- og vinterdager. Gjerne også over lengre perioder på sommer og vinter.
- Ventilasjonen på Mesterfjellet skole baserer seg i perioder av pollensesongen på automatisk vinduslufting. Det er lite erfaringer hvordan pollenallergikere i bygninger med denne typen ventilasjon opplever ubehag. Undersøkelser med hensyn til dette i bygninger med mixed-mode ventilasjon bør derfor gjennomføres.
- Automatisk vinduslufting har økt risiko for å skape avvik i akustisk inneklima. Vurderinger med hensyn til dette bør gjennomføres i mixed-mode bygninger.
- I bygninger med ventilasjon drevet av vind og/ eller oppdrift kan det være økt risiko for røykspredning. Evalueringer av hvordan mixed-mode ventilasjonsanlegg påvirker brann sikkerheten bør derfor utføres. Undersøkelser og vurdering av hvordan vinduene styrer under brann og mulige tiltak for optimaliseringer, kan her gjennomføres.
- Det kan også være av interesse å gjøre CFD- simuleringer. Dette for å vurdere hvordan luftstrømninger fra mekanisk anlegg og vinduslufting utarter seg og interagerer i rom med mixed-mode ventilasjon.
- Luften tilført fra vinduene skal etter strategien klebes til taket ved hjelp av coandaeffekten, før den faller ned i oppholdssonen. Dette skal etter planen skje med en temperatur og hastighet som ikke skaper avvik i termisk komfort. Målingene tilsier at dette ikke fungerer. Det kan derfor være av interesse å gjøre undersøkelser av hvordan strømmingen gjennom vinduene og inn i oppholdssonen utarter seg. Her kan det blant annet være interessant å se på optimale avstander fra vindu til tak for å utnytte coandaeffekten.

- Undersøkelser om hvordan åpningsgraden til de bunnhengte vinduene påvirker tilført luftmengde, samt resulterende luftbevegelser i sonen, kan også være nyttig.



## 12 Kildeliste

---

- ALGRØY, M. 2014. *Energibruk og inn klima i skoler og barnehager med "mixed-mode" ventilasjon*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
- ASHRAE, A. S. O. H. R. A. A.-C. E. 2001. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality ASHRAE 62-2001. Atlanta.
- BAKKE, J. V. 2014. Kols-epidemien utfordringer og muligheter.
- BRAGER, G. & BAKER, L. 2009. Occupant satisfaction in mixed-mode buildings. *Building Research & Information*, 37, 369-380.
- BRAGER, G., BORGESON, S. & LEE, Y. 2007. Summary report: control strategies for mixed-mode buildings.
- BRAGER, G. S., RING, E. & POWELL, K. 2000. Mixed-mode ventilation: HVAC meets Mother Nature. *Center for Environmental Design Research*.
- BYGGFORSKSERIEN 1999. 421.501 Temperaturforhold og lufthastighet. Betingelser for termisk komfort. SINTEF Byggforsk.
- BYGGFORSKSERIEN 2000. 421.505 Krav til innemiljøet i yrkes- og servicebygninger. SINTEF Byggforsk.
- CACIOLO, M., STABAT, P. & MARCHIO, D. 2011. Full scale experimental study of single-sided ventilation: Analysis of stack and wind effects. *Energy and Buildings*, 43, 1765-1773.
- CBE, C. F. T. B. E. 2013. *About mixed mode* [Internett]. Center for the Built Environment, University of California, Berkeley. Tilgjengelig: <http://www.cbe.berkeley.edu/mixedmode/index.html> [Tilgang til 22.01 2015].
- COVENT 2013. Teknisk underlag ventilasjonsaggregat.
- DASCALAKI, E., SANTAMOURIS, M., ARGIRIOU, A., HELMIS, C., ASIMAKOPOULOS, D., PAPAPOPOULOS, K. & SOILEMES, A. 1996. On the combination of air velocity and flow measurements in single sided natural ventilation configurations. *Energy and Buildings*, 24, 155-165.
- DE GIDS, W. & PHAFF, H. 1982. Ventilation rates and energy consumption due to open windows: A brief overview of research in the Netherlands. *Air Infiltration review*, 4-5.
- EMMERICH, S. J., DOLS, W. S. & AXLEY, J. W. 2001. *Natural ventilation review and plan for design and analysis tools*, US Department of Commerce, Technology Administration, National Institute of Standards and Technology.
- ENOVA. 2011. *Energieffektiv ventilasjon, hvilke oppgaver har et godt ventilasjonsanlegg?* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.enova.no/radgivning/privat/rad-om-produkter-og-losninger/styring-og-effektivisering/ventilasjon/energieffektiv-ventilasjon/108/131/> [Tilgang til 13.11 2014].
- FANGER, P. O., MELIKOV, A. K., HANZAWA, H. & RING, J. 1988. Air turbulence and sensation of draught. *Energy and Buildings*, 12, 21-39.
- FISK, W. J. 2002. How IEQ affects health, productivity. *ASHRAE journal*, 44, 56-56.
- FISK, W. J., MIRER, A. G. & MENDELL, M. J. 2009. Quantitative relationship of sick building syndrome symptoms with ventilation rates. *Indoor air*, 19, 159-165.
- FOLKEHELSEINSTITUTTET 2015. Anbefalt faglige normer for inn klima, Revisjon av kunnskapsgrunnlag og normer.

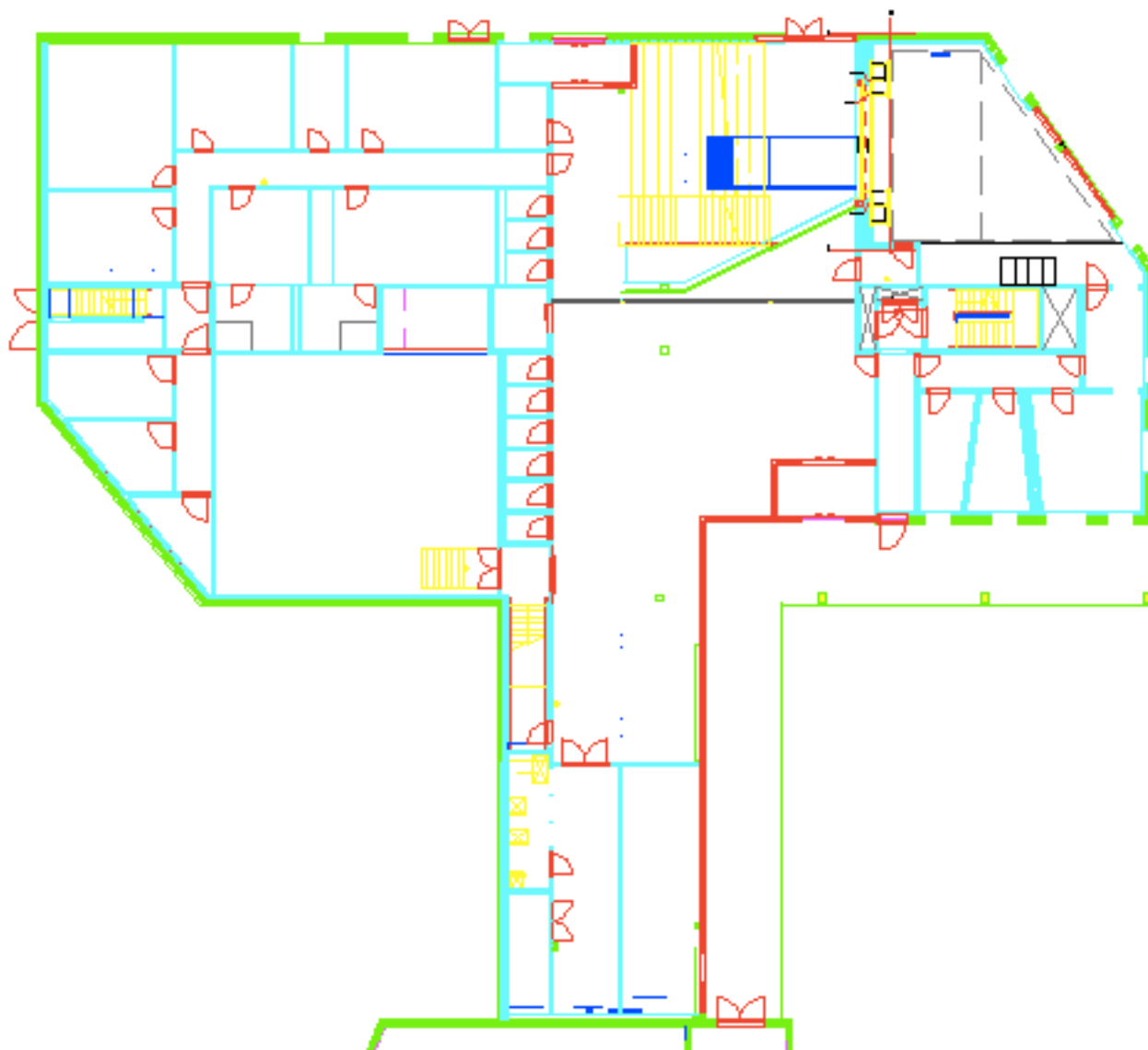
- FRONTCZAK, M. & WARGOCKI, P. 2011. Literature survey on how different factors influence human comfort in indoor environments. *Building and Environment*, 46, 922-937.
- HALVARSSON, J. & HANSEN, S. O. 2014. Atmospheric indoor environment *Forelesning i TEP14 Indoor environment and climatization of buildings*. NTNU.
- HANSEN, V. H. 2015a. *E-mail utveksling*.
- HANSEN, V. H. 10.03 2015b. *Møte med BSI*.
- HEISELBERG, P., SVIDT, K. & NIELSEN, P. V. 2001. Characteristics of airflow from open windows. *Building and Environment*, 36, 859-869.
- JOELSON, T. 2014. *Mesterfjellet skole* [Internett]. Byggeindustrien. Tilgjengelig: <http://www.bygg.no/article/1198211> [Tilgang til 19.05 2015].
- JOKISALO, J., KALAMEES, T., KURNITSKI, J., ESKOLA, L., JOKIRANTA, K. & VINHA, J. 2008. A comparison of measured and simulated air pressure conditions of a detached house in a cold climate. *Journal of Building Physics*, 32, 67-89.
- KALAMEES, T. IDA ICE: the simulation tool for making the whole building energy and HAM analysis. IEA Annex 41 1st working meeting, Zurich, Switzerland, May, 2004. 12-14.
- KNX, A. 2014. *What is KNX?* [Internett]. Tilgjengelig: <http://knx.org/knx-en/knx/association/what-is-knx/index.php> [Tilgang til 18.3 2015].
- KUNNSKAPSDEPARTEMENTET 1998. Opplæringsloven.
- LARSEN, T. S. & HEISELBERG, P. 2008. Single-sided natural ventilation driven by wind pressure and temperature difference. *Energy and Buildings*, 40, 1031-1040.
- MATHISEN, H. M. 05.05.2015 2015. *Veiledningsmøte*.
- MEESE, G., KOK, R., LEWIS, M. & WYON, D. 1984. A laboratory study of the effects of moderate thermal stress on the performance of factory workers\*. *Ergonomics*, 27, 19-43.
- NILSON, P. E. 2003. *Achieving the desired indoor climate*, Denmark.
- NOVAKOVIC, V., HANSEN, S. O., THUE, J. V., WANGENSTEEN, I. & GJERSTAD, F. O. 2007. *ENØK i bygninger, effektiv energibruk*.
- NS3701 2012. NS 3701; Kriterier for passivhus og lavenergibygninger, Yrkesbygninger. Standard Norge.
- NS-EN-ISO-7730 2005. NS-EN ISO 7730: Ergonomi i termisk miljø Analytisk bestemmelse og tolkning av termisk velbefinnende ved kalkulering av PMV- og PPD-indeks og lokal termisk komfort. *NS-EN ISO 7730*. Standard Norge.
- NAAF, N. A.-O. A. Pollennett.
- NAAF, N. A.-O. A. 2014. *Statistikk - pollenregistreringer* [Internett]. Tilgjengelig: [http://www.naaf.no/Documents/1.Pollen/Pollen-Oppsummering 2014.pdf](http://www.naaf.no/Documents/1.Pollen/Pollen-Oppsummering%202014.pdf) [Tilgang til 23.03 2015].
- NAAF, N. A.-O. A. 2015a. *10 gode råd til deg med pollenallergi* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.naaf.no/no/allergi/Pollenallergi/Gode-rad-ved-pollenallergi/> [Tilgang til 23.03 2015].
- NAAF, N. A.-O. A. 2015b. *Fakta om pollenallergi* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.naaf.no/no/allergi/Pollenallergi/Pollenallergifakta/> [Tilgang til 10.02 2015].
- NAAF, N. A.-O. A. 2015c. *Undersøkelse og behandling* [Internett]. Tilgjengelig: <http://www.naaf.no/no/allergi/Pollenallergi/Undersokelse-og-behandling/> [Tilgang til 23.03 2015].
- OGÅRD, Y. G. 2014. *Ventilative cooling for schools and kindergartens*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.

- RAMBØLL 2013. Mesterfjellet skole bygningsfysisk prosjektering.
- RAMBØLL 2014. Energiattest Mestefjellet skole.
- RICHTER, W., SEIFERT, R. & RÖSLER, M. 2003. Bestimmung des realen Luftwechsels bei Fensterlüftung aus energetischer und bauphysikalischer Sicht.
- ROETZEL, A., TSANGRASSOULIS, A., DIETRICH, U. & BUSCHING, S. 2010. A review of occupant control on natural ventilation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14, 1001-1013.
- SANTAMOURIS, M. & WOUTERS, P. 2006. *Building ventilation: the state of the art*, London, Earthscan.
- SCHILD, P., MYSEN, M. & TJELFLAAT, P. 2003. Bygningsintegreert ventilasjon-en veileder. *Rapport Økobygg*.
- SEPPANEN, O., FISK, W. J. & FAULKNER, D. 2004. Control of temperature for health and productivity in offices. *Lawrence Berkeley National Laboratory*.
- SIMONI, M., ANNESI-MAESANO, I., SIGSGAARD, T., NORBACK, D., WIESLANDER, G., NYSTAD, W., CANCIANI, M., SESTINI, P. & VIEGI, G. 2010. School air quality related to dry cough, rhinitis and nasal patency in children. *European Respiratory Journal*, 35, 742-749.
- STENSAAS, L. I. & HOVLAND, E. 2001. *Ventilasjonsteknikk*, Oslo, Gyldendal yrkesopplæring.
- SUNDELL, J. 2004. On the history of indoor air quality and health. *Indoor air*, 14, 51-58.
- SAARINEN, K., JANTUNEN, J. & HAAHTELA, T. 2011. Birch pollen honey for birch pollen allergy-a randomized controlled pilot study. *International archives of allergy and immunology*, 155, 160.
- TEK10 2011. Veiledning om tekniske krav til byggverk. *Miljø og helse*. Direktoratet for byggkvalitet.
- TERPAGER ANDERSEN, K., HEISELBERG, P. & AGGERHOLM, S. 2002. *Naturlig ventilasjon i erhvervsbygninger: beregning og dimensionering*, Hørsholm, Institutet.
- THEBEN AMUN 716 KNX room air sensor manual.
- TJELFLAAT, P. O. 2014. Active displacement- fom the ceiling with low speed and under-temperature. Exhaust at ceiling. *TEP 17, Ventilasjon for industri og brannsikkerhet*. Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet NTNU.
- TWARDELLA, D., MATZEN, W., LAHRZ, T., BURGHARDT, R., SPEGEL, H., HENDROWARSITO, L., FRENZEL, A. & FROMME, H. 2012. Effect of classroom air quality on students' concentration: results of a cluster - randomized cross - over experimental study. *Indoor Air*, 22, 378-387.
- WARGOCKI, P. & WYON, D. P. 2013. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*, 59, 581-589.
- WARGOCKI, P., WYON, D. P., BAIK, Y. K., CLAUSEN, G. & FANGER, P. O. 1999. Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor air*, 9, 165-179.
- WARREN, P. Ventilation through openings on one wall only. Heat Transfer in Buildings, Proceedings of ICHMT seminar. Hemisphere. New York, EE. UU, 1977.
- WHO, W. H. O. 2014. Indoor air quality guidelines: household fuel combustion. In: ORGANIZATION, W. H. (ed.).
- WINDOWMASTER & BSI, B. S. I. Systembeskrivelse Hybrid ventilasjon.

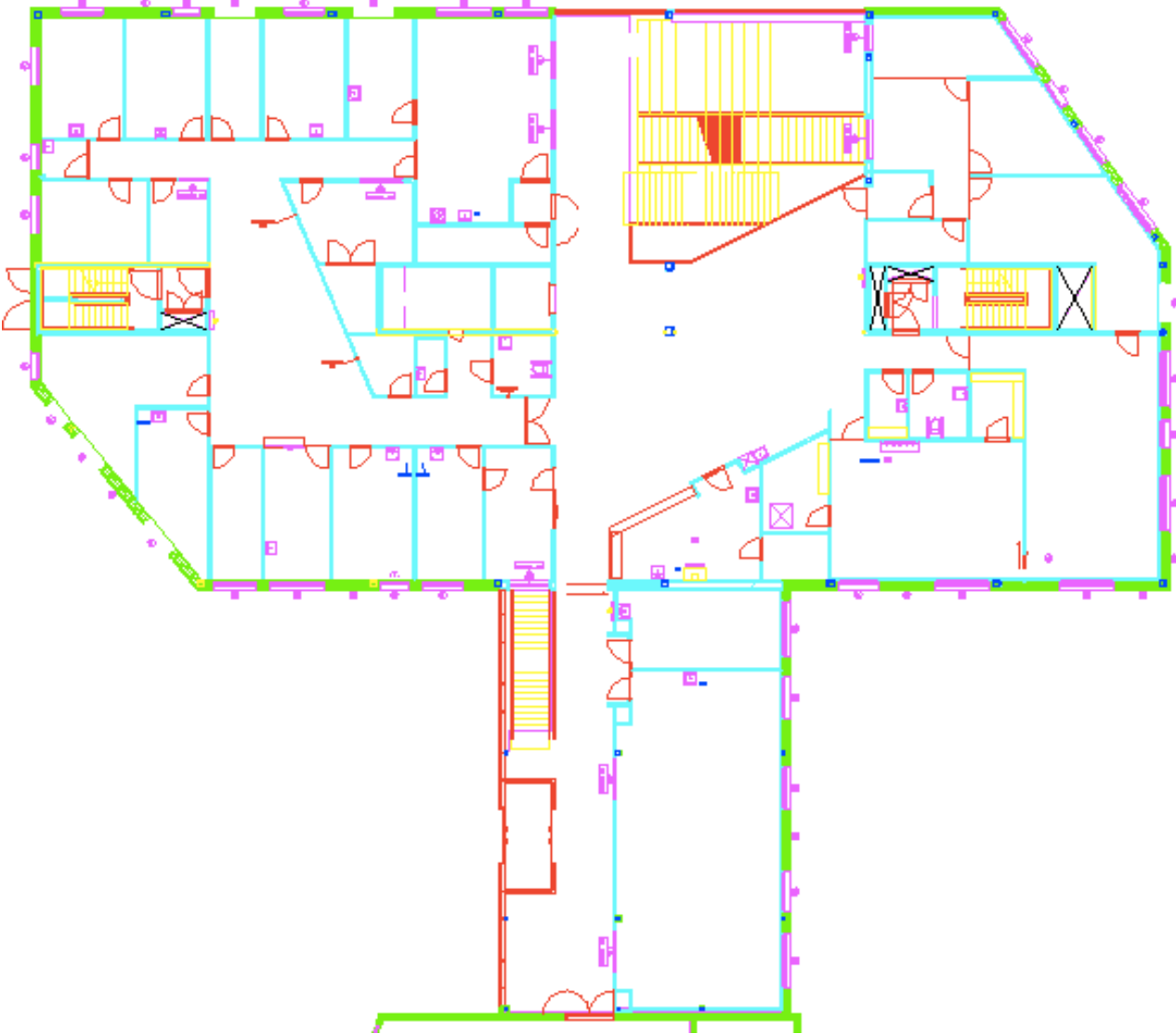


## Vedlegg 1: Plantegning Mesterfjellet skole

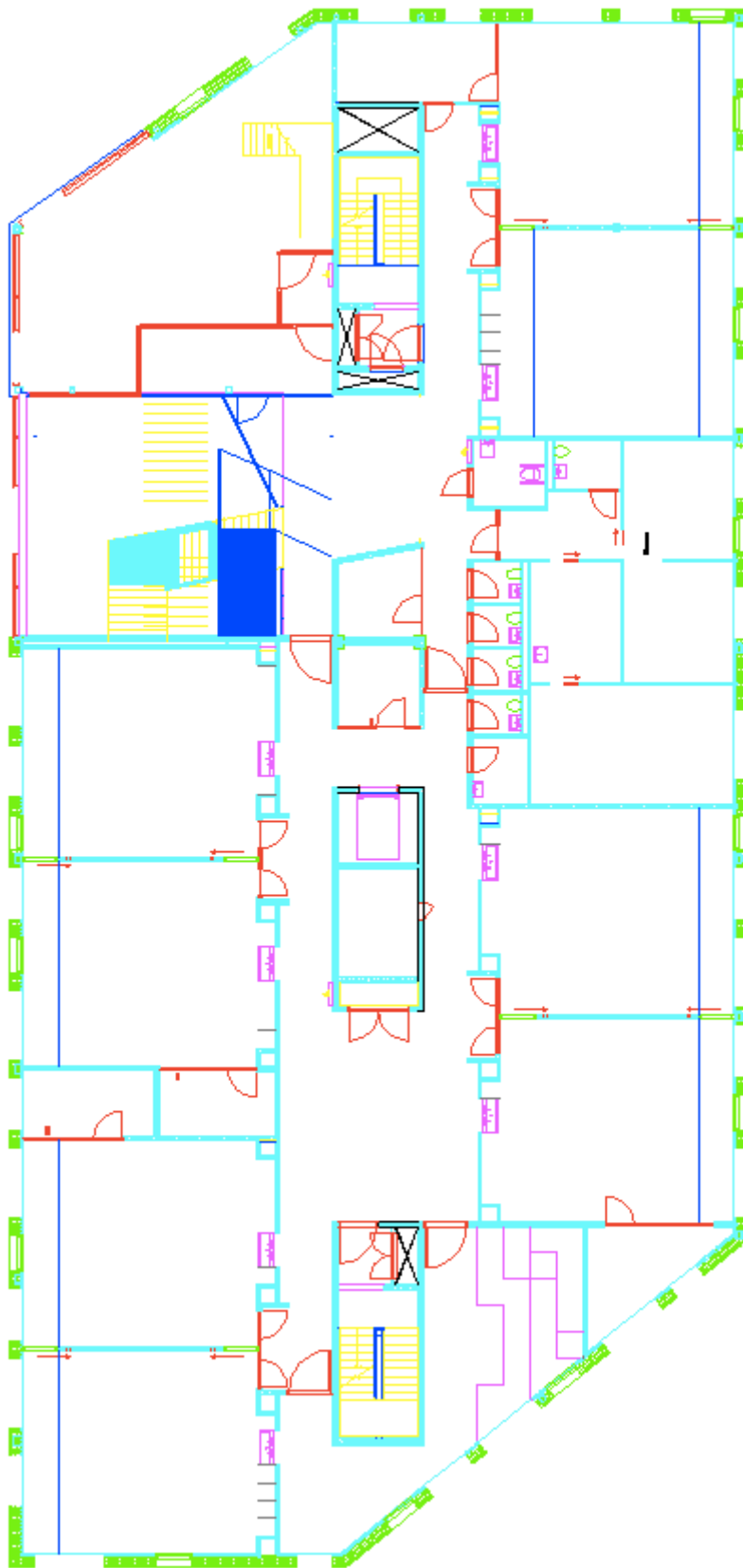
1 etasje:



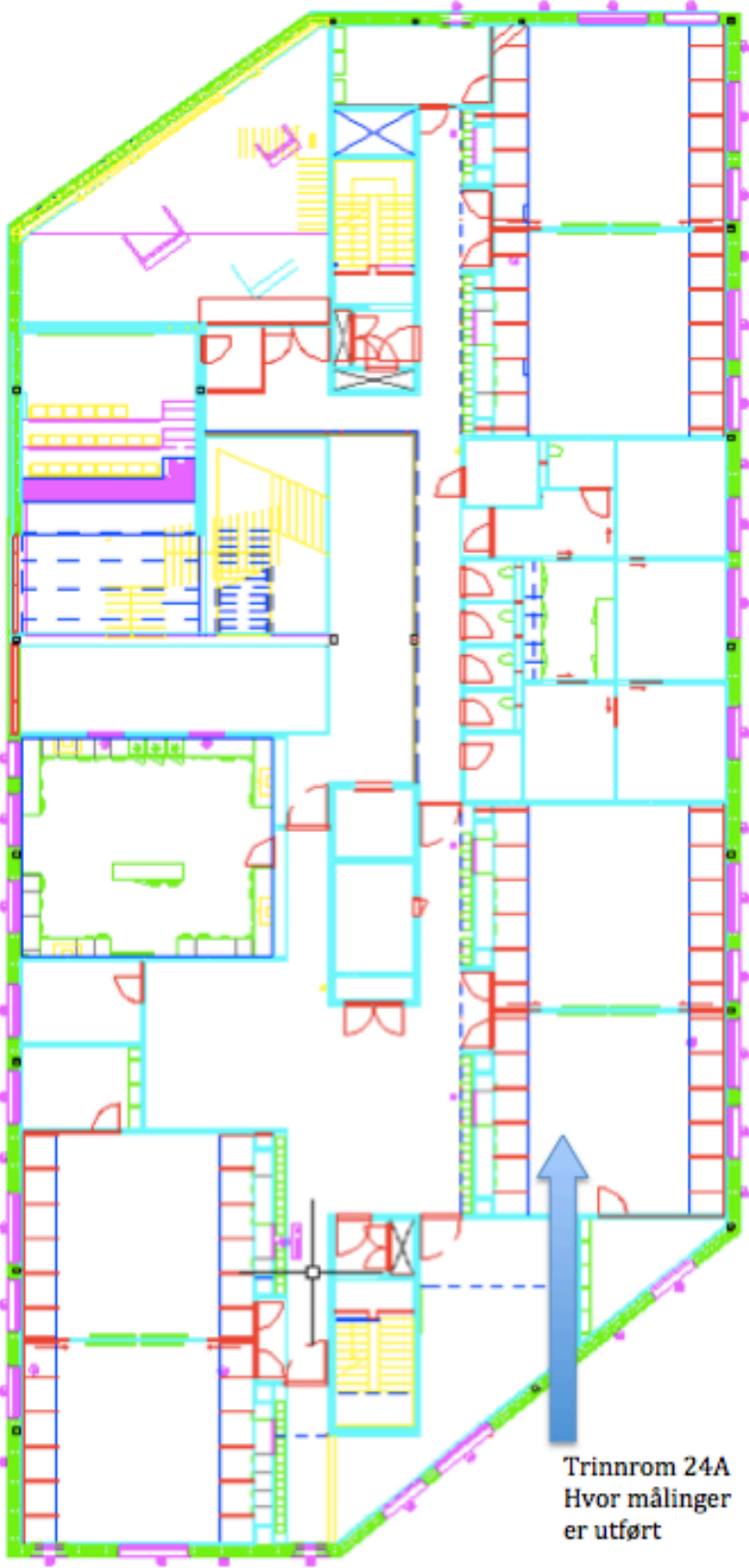
2 etasje:



3 etasje:

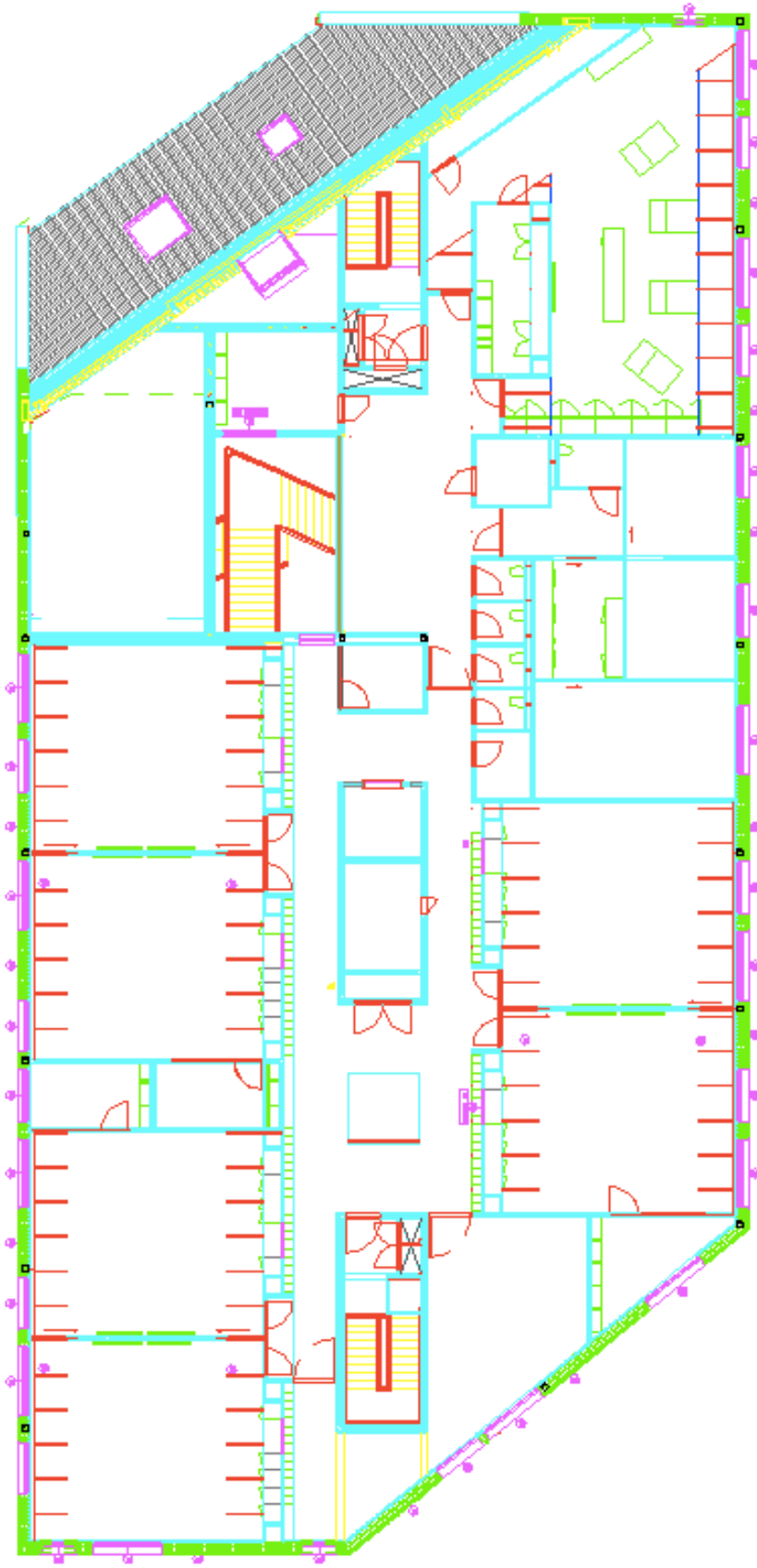


4 etasje:

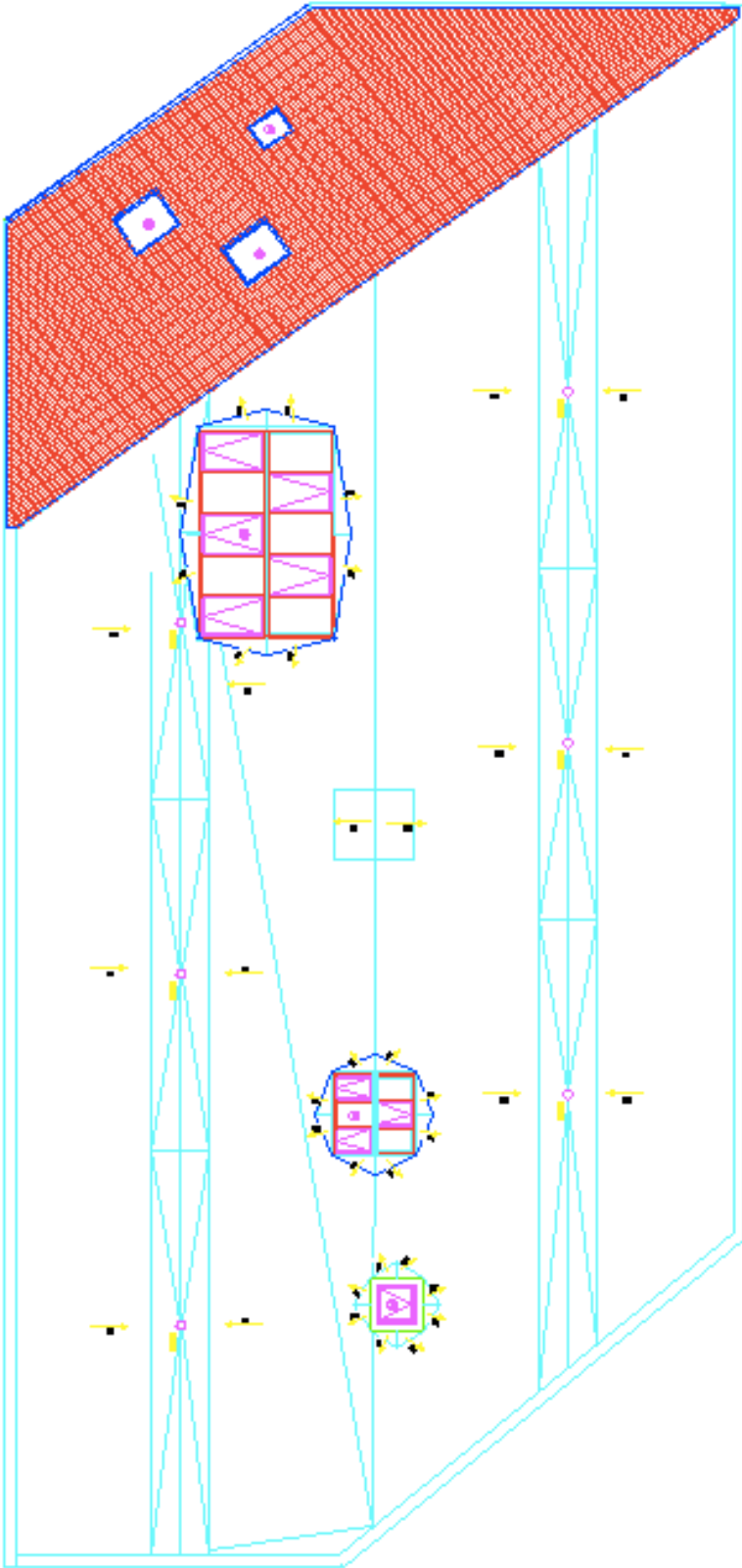




5 etasje:



Takplan:



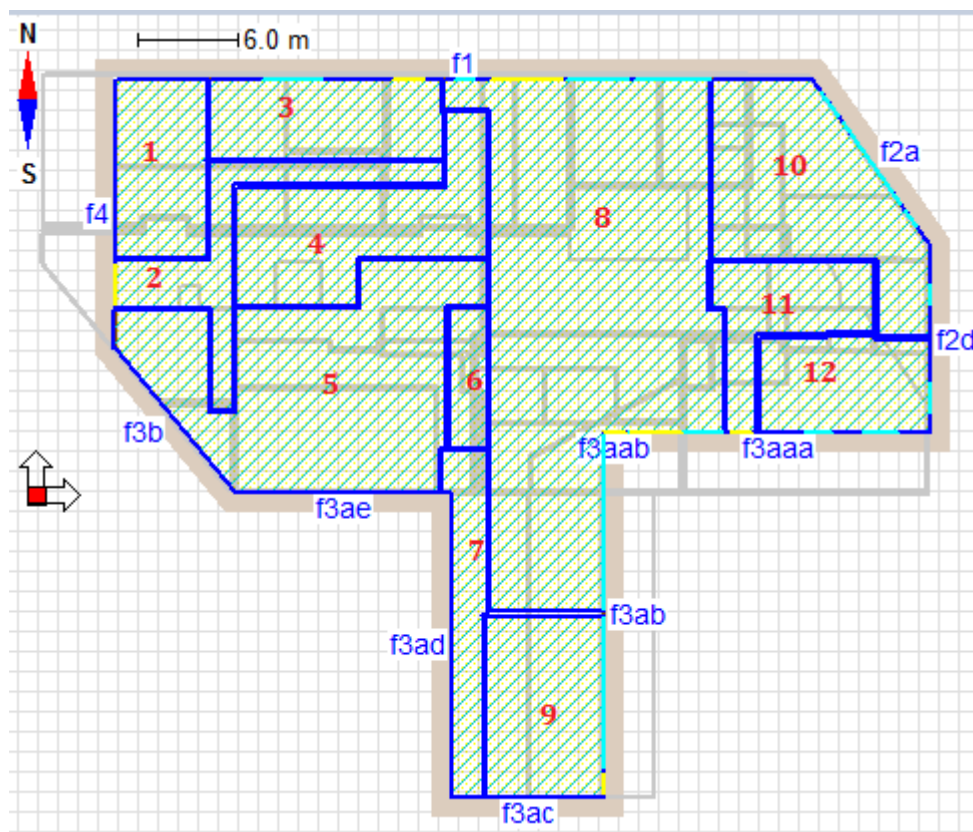
## Vedlegg 2: Soneoversikt

Oversikt over soner som lagt inn i IDA ICE. Ventilasjonstype og ventilasjonsform er gjeldende for det hybride ventilasjonsscenarioet. Det er her gjort noen antagelser rundt valg av ventilasjonsform da det har vært litt motstridende informasjon rundt dette.

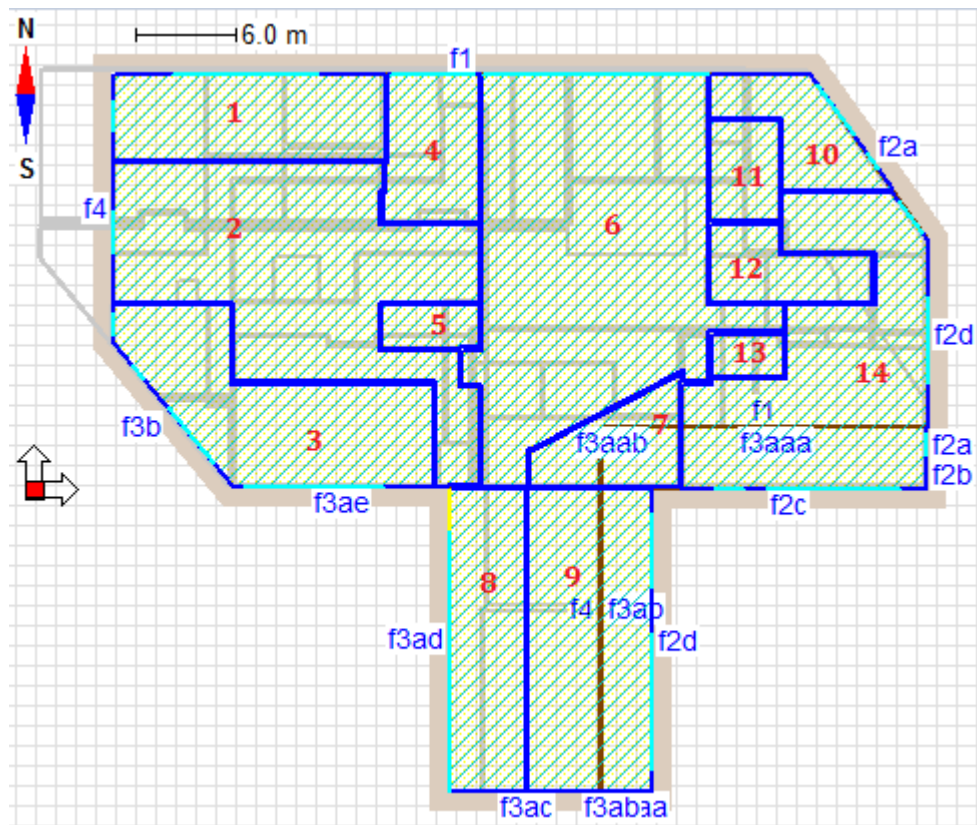
Sone	Vent.- type	Vent.- form	Sone	Vent.- type	Vent.- form
1.1 Lager	Mekanisk	CAV	1.2 Gang	Mekanisk	CAV
1.3 Verksted	Mekanisk	CAV	1.4 WC/ garderobe	Mekanisk	CAV
1.5 Teknisk	Mekanisk	CAV	1.6 WC	Mekanisk	CAV
1.7 Gang	Mekanisk	CAV	1.8 Gang/ atrium	Hybrid	VAV
1.9 Sløyd	Hybrid	VAV	1.10 Musikkrom	Mekanisk	VAV
1.11 Gang	Mekanisk	CAV	1.12 Øvingsrom	Hybrid	VAV
2.1 Fysio m.m	Hybrid	VAV	2.2 Gang m.m	Mekanisk	CAV
2.3 Helse og miljø	Hybrid	VAV	2.4 SFO	Hybrid	VAV
2.5 WC	Mekanisk	CAV	2.6 Gang/ atrium	Hybrid	VAV
2.7 Kjøkken	Mekanisk	CAV	2.8 Gang	Mekanisk	CAV
2.9 Sosialrom	Hybrid	VAV	2.10 Møterom	Hybrid	VAV
2.11 Resepsjon	Mekanisk	CAV	2.12 Sjakt	Ingen	-
2.13 WC	Mekanisk	CAV	2.14 Aktiviteter	Hybrid	VAV
3.1 Trinnrom	Hybrid	VAV	3.2 Gang/ atrium	Hybrid	VAV
3.3 Grupperom	Hybrid	VAV	3.4 Trinnrom	Hybrid	VAV
3.5 WC	Mekanisk	CAV	3.6 Pedagog	Hybrid	VAV
3.7 Bibliotek	Hybrid	VAV	3.8 Grupperom	Hybrid	VAV
3.9 Trinnrom	Hybrid	VAV	4.1 Trinnrom	Hybrid	VAV
4.2 Gang/ atrium	Hybrid	VAV	4.3 Grupperom	Hybrid	VAV
4.4 Grupperom	Hybrid	VAV	4.5 Skolekjøkken	Hybrid	VAV
4.6 Trinnrom	Hybrid	VAV	4.7 WC	Mekanisk	CAV
4.8 Pedagog	Hybrid	VAV	4.9 Auditoriet	Mekanisk	VAV

4.10 Bibliotek	Hybrid	VAV	4.11 Grupperom	Mekanisk	CAV
4.12 Trinnrom	Hybrid	VAV	5.1 Trinnrom	Hybrid	VAV
5.2 Gang/ atrium	Hybrid	VAV	5.3 Grupperom	Hybrid	VAV
5.4 Trinnrom	Hybrid	VAV	5.5 Auditoriet	Mekanisk	VAV
5.6 WC	Mekanisk	CAV	5.7 Pedagog	Hybrid	VAV
5.8 Naturfag	Hybrid	VAV			

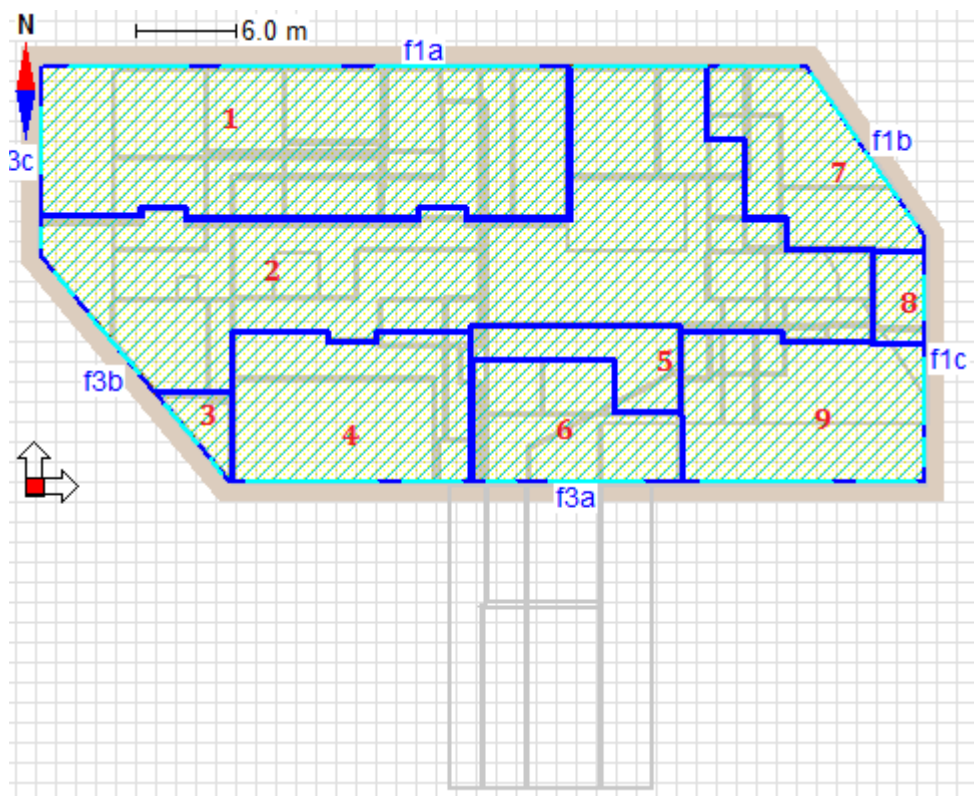
1 etasje:



2 etasje:

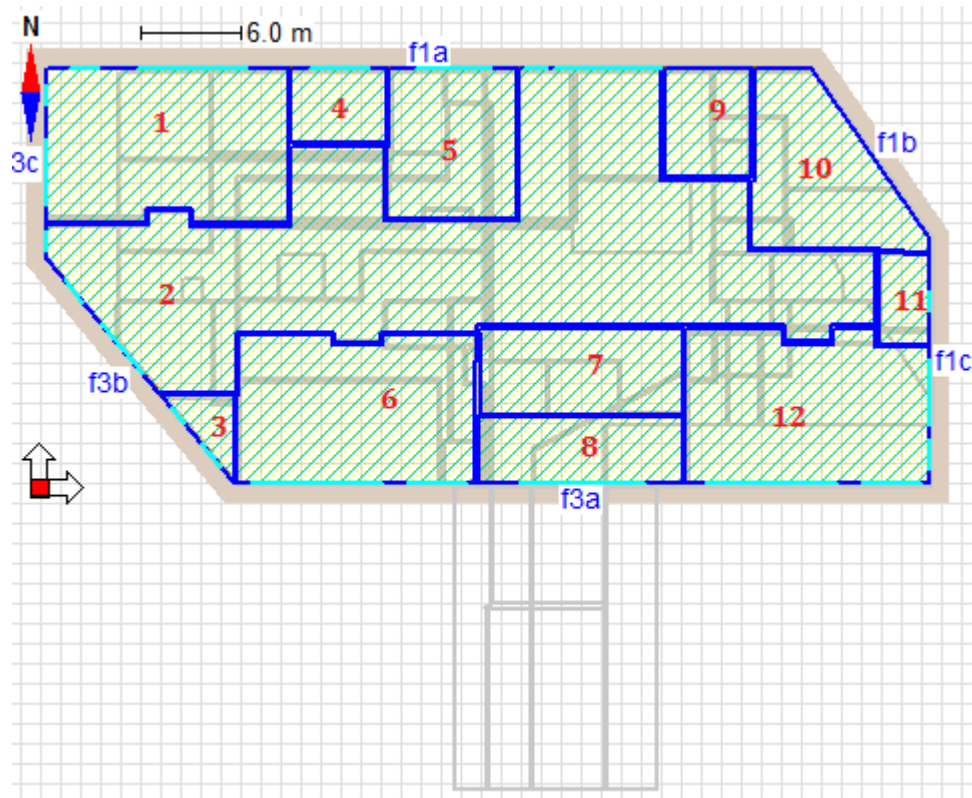


3 etasje:

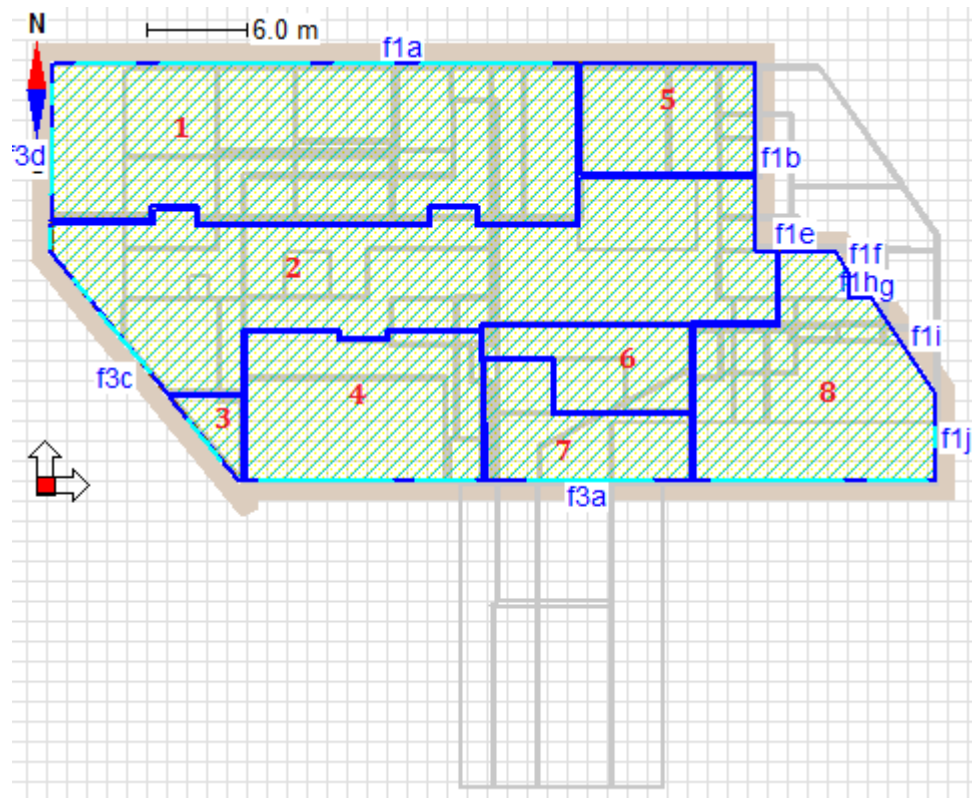




4 etasje:



5 etasje:



## Vedlegg 3: Vindusskjema

Oversikt over vinduer og sammenslåinger av vinduer i IDA ICE modell.

Plan 0						
	Type	Beskrivelse	Areal [m <sup>2</sup> ]	Opplukkelig	Slått sammen til IDA ID	Sone
1	V-1	W 2.1	1,44	Ja	V.1-Å	Øvingsrom 1.12
	V-1	W 2.17	1,44	Ja		Øvingsrom 1.12
2	V-3	W 2.27	3,24	Nei	V.2-F	Øvingsrom 1.12
	V-2	W 2.8	1,44	Nei		Øvingsrom 1.12
3	V-3	W 2.27	3,24	Nei	V.3-F	Øvingsrom 1.12
4	V-1	W 2.16	1,44	Ja	V.4-Å	Musikkrom 1.10
5	V-1	W 2.19	1,44	Ja	V.5-Å	Musikkrom 1.10
1	Vindusfasade	CW 2.139	18,00	Nei	VF-1	Musikkrom 1.10
6	V-3	W 2.10	3,24	Nei	V.6-Å	Musikkrom 1.10
2	Vindusfasade	CW 2.132	15,00	Nei	VF-2(h)	Gang 1.8
7	V-21	W 2.20	0,90	Ja	V.7-Å	Gang 1.8
	V-21	W 2.15	1,50	Ja		Gang 1.8
1	Dør	D 2.31	3,24		D.1	Gang 1.8
	Dør	D 2.53	5,88			Gang 1.8
8	V-2	W 2.25	1,44	Nei	V.8-F	Gang 1.8
2	Dør	D 2.11	3,75		D.2	Verksted 1.3
	V-1	W 2.12	1,44	Ja		Verksted 1.3
9	V-1	W 2.11	1,44	Ja	V.9-F	Verksted 1.3
	V-1	W 2.24	1,44	Ja		Verksted 1.3
3	Dør	D 2.16	2,28		D.3	Gang 1.2
	Dør	D 2.3	2,66			Gang 1.2
3	Vindusfasade	CW 2.10	19,00	Nei	VF-3	Sløyd 1.9
4	Vindusfasade	CW 2.10 og 2.11	24,40	Nei	VF-4	Gang 1.8
4	Dør	D 2.18	2,34		D.4	Sløyd 1.9
	V-21	W 2.23	1,16	Ja		Sløyd 1.9
10	V-21	W 2.22	1,16	Ja	V.10-Å	Sløyd 1.9
	V-21	W 2.9	0,76	Ja		Sløyd 1.9
11	V-21	W 2.26	1,49	Ja	V.11-Å	Gang 1.8
	V-21	W 2.21	1,16	Ja		Gang 1.8
5	Vindusfasade	CW 2.2	15,00	Nei	VF-5	Gang 1.8
12	V-21	W 2.14	1,16	Ja	V.12-Å	Gang 1.8
5	Dør	D 2.32	4,29		D.5	Gang 1.8
6	Dør	D 2.32	1,58		D.6	Gang 1.8
7	Dør	D 2.54	2,66		D.7	Gang 1.11
Plan 1						
	Type	Beskrivelse	Areal [m <sup>2</sup> ]	Opplukkelig	Slått sammen til IDA ID	Sone
13	V-3	W 3.43	3,24	Nei	V.13-F	Aktiviteter 2.14
	V-1	W 3.48	1,44	Ja		Aktiviteter 2.14
14	V-5	W 3.47	5,76	Ja	V.14-Å	Aktiviteter 2.14
	V-5	W 3.41	5,76	Ja		Aktiviteter 2.14
15	V-1	W 3.42	1,44	Ja	V.15-F	Aktiviteter 2.14
	V-2	W 3.29	1,44	Nei		Aktiviteter 2.14
16	V-1	W 3.4	1,44	Ja	V.16-Å	Aktiviteter 2.14
	V-5	W 3.5	1,97	Ja		Aktiviteter 2.14
17	V-5	W 3.31	5,76	Ja	V.17-Å	Aktiviteter 2.14
	V-4	W 3.35	3,24	Ja		Aktiviteter 2.14
18	V-5	W 3.28	5,76	Ja	V.18-F	Møterom 2.10
19	V-2	W 3.39	1,44	Nei	V.19-Å	Møterom 2.10
19	V-4	W 3.40	3,24	Ja	V.19-Å	Møterom 2.10
	V-5	W 3.27	5,76	Ja		Møterom 2.10

6	Vindusfasade	CW 2.132	28,00	Nei		Gang 2.6
	Vindusfasade	CW 3.191	14,42	Nei	VF-6	Gang 2.6
20	V-21	W 3.33	1,05	Ja		Gang 2.6
	V-21	W 3.15	1,10	Ja	V.20-Å	Gang 2.6
21	V-4	W 3.38	3,24	Ja		SFO 2.4
	V-5	W 3.37	5,76	Ja	V.21-Å	SFO 2.4
	V-4	W 3.3	3,24	Ja		Fysio m.m 2.1
	V-4	W 3.58	3,24	Ja		Fysio m.m 2.1
22	V-4	W 3.51	3,24	Ja		Fysio m.m 2.1
	V-1	W 3.10	1,44	Ja		Fysio m.m 2.1
	V-1	W 3.52	1,44	Ja		Fysio m.m 2.1
	V-4	W 3.50	3,24	Ja	V.22-Å	Fysio m.m 2.1
23	V-3	W 3.11	3,24	Nei	V.23-F	Fysio m.m 2.1
24	V-1	W 3.13	1,44	Ja		Gang m.m 2.2
	V-4	W 3.14	3,24	Ja	V.24-Å	Gang m.m 2.2
25	V-1	W 3.12	1,44	Ja	V.25-Å	Helse 2.3
26	V-2	W 3.8	1,44	Nei	V.26-F	Helse 2.3
	V-4	W 3.2	3,24	Ja		Helse 2.3
	V-1	W 3.34	1,44	Ja		Helse 2.3
27	V-4	W 3.9	3,24	Ja	V.27-Å	Helse 2.3
	V-4	W 3.59	3,24	Ja		Helse 2.3
	V-5	W 3.44	5,76	Ja		Helse 2.3
	V-1	W 3.1	1,44	Ja		Helse 2.3
	V-1	W 3.45	1,44	Ja		Helse 2.3
28	V-4	W 3.46	3,24	Ja	V.28-Å	Helse 2.3
7	Vindusfasade	CW 3.24	40,96	Nei	VF-7	Gang 2.8
8	Dør	D 3.27	6,25		D.8	Gang 2.8
	V-5	W 3.23	5,76	Ja		Sosialrom 2.9
29	V-4	W 3.24	3,24	Ja	V.29-Å	Sosialrom 2.9
	V-5	W 3.25	5,76	Ja		Sosialrom 2.9
	V-3	W 3.22	3,24	Nei		Sosialrom 2.9
30	V-2	W 3.20	1,44	Nei	V.30-F	Sosialrom 2.9
	V-3	W 3.21	3,24	Nei		Sosialrom 2.9

## Plan 2

	Type	Beskrivelse	Areal [m <sup>2</sup> ]	Opplukkelig	Slått sammen til IDA ID	Sone
	V-5	W 4.17	5,76	Ja		Klasserom 3.4
31	V-1	W 4.13	1,44	Ja	V.31-Å	Klasserom 3.4
	V-5	W 4.25	5,76	Ja		Klasserom 3.4
	V-1	W 4.14	1,44	Ja		Klasserom 3.4
32	V-3	W 4.11	3,24	Ja	V.32-F	Klasserom 3.4
	V-3	W 4.12	3,24	Nei		Klasserom 3.4
	V-5	W 4.26	5,76	Ja		Pedagog 3.6
33	V-4	W 4.1	3,24	Ja	V.33-Å	Pedagog 3.6
	V-1	W 4.19	1,44	Ja		Pedagog 3.6
34	V-3	W 4.18	3,24	Nei	V.34-F	Pedagog 3.6
	V-5	W 4.15	5,76	Ja		Klasserom 3.9
35	V-1	W 4.28	1,44	Ja	V.35-Å	Klasserom 3.9
	V-5	W 4.27	5,76	Ja		Klasserom 3.9
	V-1	W 4.3	1,44	Ja		Klasserom 3.9
36	V-3	W 4.16	3,24	Nei	V.36-F	Klasserom 3.9
	V-3	W 4.29	3,24	Nei		Klasserom 3.9
37	V-1	W 4.22	1,44	Ja	V.37-Å	Klasserom 3.9



37	V-5	W 4.6	5,76 Ja	V.37-F	Klasserom 3.9
38	V-3	W 4.23	3,24 Nei	V.38-F	Klasserom 3.9
39	V-1	W 4.38	1,44 Ja	V.39-Å	Grupperom 3.8
	V-4	W 4.24	3,24 Ja		Grupperom 3.8
40	V-4	W 4.62	3,24 Ja	V.40-Å	Bibliotek 3.7
	V-21	W 4.39	1,16 Ja		Bibliotek 3.7
	V-21	W 4.7	1,16 Ja		Bibliotek 3.7
41	V-2	W 4.63	1,44 Nei	V.41-F	Bibliotek 3.7
8	Vindusfasade	CW 4.159	14,92 Nei	VF-8	Bibliotek 3.7
9	Vindusfasade	CW 4.158	14,40 Nei	VF-9	Gang 3.2
42	V-5	W 4.56	5,76 Ja	V.42-Å	Klasserom 3.1
	V-1	W 4.55	1,44 Ja		Klasserom 3.1
	V-1	W 4.57	1,44 Ja		Klasserom 3.1
	V-5	W 4.58	5,76 Ja		Klasserom 3.1
	V-4	W 4.10	3,24 Ja		Klasserom 3.1
	V-3	W 4.54	3,24 Nei		Klasserom 3.1
43	V-3	W 4.53	3,24 Nei	V.43-F	Klasserom 3.1
	V-3	W 4.44	3,24 Nei		Klasserom 3.1
	V-3	W 4.61	3,24 Nei		Klasserom 3.1
	V-5	W 4.59	5,76 Ja		Klasserom 3.1
44	V-1	W 4.9	1,44 Ja	V.44-Å	Klasserom 3.1
	V-5	W 4.60	5,76 Ja		Klasserom 3.1
	V-5	W 4.8	5,76 Ja		Klasserom 3.1
45	V-1	W 4.20	1,44 Ja	V.45-Å	Klasserom 3.1
	V-2	W 4.21	1,44 Nei		V.46-F
46	V-1	W 4.41	1,44 Ja	V.47-Å	Gang 3.2
	V-5	W 4.43	5,76 Ja		Gang 3.2
47	V-1	W 4.4	1,44 Ja	V.48-F	Gang 3.2
	V-3	W 4.42	3,24 Nei		Gang 3.2
	V-5	W 4.30	5,76 Ja		V.49-Å
50	V-2	W 4.5	1,44 Nei	V.50-F	Grupperom 3.3

### Plan 3

Type	Beskrivelse	Areal [m <sup>2</sup> ]	Opplukkelig	Slått sammen til IDA ID	Sone
51	V-5	W 5.4	5,76 Ja	V.51-Å	Klasserom 4.6
	V-1	W 5.55	1,44 Ja		Klasserom 4.6
	V-5	W 5.26	5,76 Ja		Klasserom 4.6
	V-1	W 5.52	1,44 Ja		Klasserom 4.6
52	V-3	W 5.53	3,24 Nei	V.52-F	Klasserom 4.6
	V-3	W 5.51	3,24 Nei		Klasserom 4.6
	V-4	W 5.33	3,24 Ja		Pedagog 4.8
53	V-5	W 5.21	5,76 Ja	V.53-Å	Pedagog 4.8
	V-4	W 5.1	3,24 Ja		Pedagog 4.8
	V-1	W 5.49	1,44 Ja		Pedagog 4.8
	V-5	W 5.3	5,76 Ja		Klasserom 4.12
54	V-1	W 5.56	1,44 Ja	V.54-Å	Klasserom 4.12
	V-5	W 5.10	5,76 Ja		Klasserom 4.12
	V-1	W 5.48	1,44 Ja		Klasserom 4.12
	V-3	W 5.50	3,24 Nei		Klasserom 4.12
55	V-3	W 5.47	3,24 Nei	V.55-F	Klasserom 4.12
	V-3	W 5.20	3,24 Nei		V.56-F
56	V-5	W 5.22	5,76 Ja	V.57-Å	Klasserom 4.12
	V-1	W 5.11	1,44 Ja		Klasserom 4.12

58	V-1	W 5.23	1,44 Ja	V.58-Å	Grupperom 4.11
	V-overlys	W 5.14	3,24 Nei		Bibliotek 4.10
59	V-overlys	W 6.60	3,24 Nei	V.59-F	Bibliotek 4.10
	V-overlys	W 5.12	3,24 Nei		Bibliotek 4.10
10	Vindusfasade	CW 2.8	13,50 Nei	VF-10	Gang 4.2
	Vindusfasade	CW 5.175	8,06 Nei		Gang 4.2
60	V-21	W 4.2	1,36 Ja	V.60-Å	Gang 4.2
	V-21	W 5.35	1,24 Ja		Gang 4.2
	V-1	W 5.29	1,44 Ja		Skolekjøkken 4.5
61	V-4	W 5.46	3,24 Ja	V.61-Å	Skolekjøkken 4.5
	V-4	W 5.31	3,24 Ja		Skolekjøkken 4.5
62	V-4	W 5.44	3,24 Ja	V.62-Å	Grupperom 4.4
	V-4	W 5.13	3,24 Ja		Grupperom 4.4
	V-1	W 5.28	1,44 Ja		Klasserom 4.1
63	V-5	W 5.2	5,76 Ja	V.63-Å	Klasserom 4.1
	V-4	W 5.45	3,24 Ja		Klasserom 4.1
	V-1	W 5.30	1,44 Ja		Klasserom 4.1
64	V-3	W 5.27	3,24 Nei	V.64-F	Klasserom 4.1
65	V-2	W 5.17	1,44 Nei	V.65-F	Klasserom 4.1
66	V-5	W 5.37	5,76 Ja	V.66-Å	Klasserom 4.1
	V-1	W 5.34	1,44 Ja		Klasserom 4.1
67	V-2	W 5.18	1,44 Nei	V.67-F	Gang 4.2
68	V-3	W 5.54	3,24 Nei	V.68-F	Gang 4.2
69	V-5	W 5.16	5,76 Ja	V.69-Å	Gang 4.2
	V-1	W 5.19	1,44 Ja		Gang 4.2
70	V-1	W 5.24	1,44 Ja	V.70-Å	Grupperom 4.3
71	V-3	W 5.15	3,24 Nei	V.71-F	Grupperom 4.3

Plan 4						
	Type	Beskrivelse	Areal [m <sup>2</sup> ]	Opplukkelig	Slått sammen til IDA ID	Sone
	V-5	W 6.6	5,76 Ja			Klasserom 5.4
72	V-1	W 6.2	1,44 Ja		V.72-Å	Klasserom 5.4
	V-5	W 6.1	5,76 Ja			Klasserom 5.4
	V-1	W 6.7	1,44 Ja			Klasserom 5.4
	V-3	W 6.4	3,24 Nei		V.73-F	Klasserom 5.4
73	V-3	W 6.5	3,24 Nei			Klasserom 5.4
	V-5	W 6.53	5,76 Ja			Pedagog 5.7
74	V-4	W 6.3	3,24 Ja		V.74-Å	Pedagog 5.7
	V-1	W 6.9	1,44 Ja			Pedagog 5.7
	V-4	W 6.8	3,24 Ja			Pedagog 5.7
	V-1	W 6.15	1,44 Ja			Naturfag 5.8
75	V-5	W 6.14	5,76 Ja		V.75-Å	Naturfag 5.8
	V-1	W 6.11	1,44 Ja			Naturfag 5.8
	V-5	W 6.12	5,76 Ja			Naturfag 5.8
76	V-3	W 6.16	3,24 Nei		V.76-F	Naturfag 5.8
	V-3	W 6.10	3,24 Nei			Naturfag 5.8
77	V-2	W 6.18	1,44 Nei		V.77-F	Naturfag 5.8
	V-5	W 6.35	5,76 Ja			Klasserom 5.1
78	V-1	W 6.36	1,44 Ja		V.78-Å	Klasserom 5.1
	V-5	W 6.41	5,76 Ja			Klasserom 5.1
	V-1	W 6.42	1,44 Ja			Klasserom 5.1
79	V-3	W 6.38	3,24 Nei		V.79-F	Klasserom 5.1
	V-3	W 6.39	3,24 Nei			Klasserom 5.1

	V-4	W 6.40	3,24 Ja		Klasserom 5.1
80	V-5	W 6.37	5,76 Ja	V.80-Å	Klasserom 5.1
	V-1	W 6.43	1,44 Ja		Klasserom 5.1
	V-5	W 6.44	5,76 Ja		Klasserom 5.1
81	V-3	W 6.45	3,24 Nei	V.81-F	Klasserom 5.1
	V-3	W 6.22	3,24 Nei		Klasserom 5.1
82	V-2	W 6.51	1,44 Nei	V.82-F	Klasserom 5.1
	V-5	W 6.50	5,76 Ja		Klasserom 5.1
83	V-1	W 6.52	1,44 Ja	V.83-Å	Klasserom 5.1
84	V-2	W 6.19	1,44 Nei	V.84-F	Gang 5.2
85	V-3	W 6.47	3,24 Nei	V.85-F	Gang 5.2
	V-1	W 6.46	1,44 Ja		Gang 5.2
86	V-5	W 6.49	5,76 Ja	V.86-Å	Gang 5.2
	V-1	W 6.48	1,44 Ja		Gang 5.2
87	V-5	W 6.21	5,76 Ja	V.87-Å	Grupperom 5.3
	Tak vindu	W 8.7	2,52 Ja		Gang 5.2
	Tak vindu	W 8.2	2,52 Ja		Gang 5.2
88	Tak vindu	W 8.1	2,52 Ja	V.88-Å	Gang 5.2
	Tak vindu	W 8.4	2,52 Ja		Gang 5.2
	Tak vindu	W 8.8	2,52 Ja		Gang 5.2
	Tak vindu	W 8.3	0,9 Ja		Gang 5.2
89	Tak vindu	W 8.5	0,9 Ja	V.89-Å	Gang 5.2
	Tak vindu	W 8.6	0,9 Ja		Gang 5.2
90	Tak vindu	W 7.1	1,44 Ja	V.90-Å	Gang 5.2

## Vedlegg 4: Teknisk underlag mekanisk ventilasjonsanlegg

### Teknisk underlag



### TEKNISK SPESIFIKASJON

OrdreNr: 201.6696.01

Dato: 05.03.2013

Prosjekt: Mesterfjellet skole

Merket:

### ENSTRØMS AGGREGAT INNENDØRSUTFØRELSE MED ROTERENDE VARMEGJENVINNER

#### Generell beskrivelse

Ventilasjonsaggregatet er bygget opp av rammeverk i stålprofiler, materialtykkelse 1,5 mm. Luker og dører er laget av paneler med spor for pakning. Utvendig kledningsplate er i 0,9 mm galvanisert plate, og innvendig kledningsplate i 0,9 mm galvanisert plate. Veggene er isolert med 50 mm mineralull, 65kg/m<sup>3</sup>. Innvendig skillegulv er isolert med 20 mm isolasjon. Aggregatet leveres med påskrudde 3 mm galvaniserte bunnrammer, høyde 120 mm på seksjonene nedre luftretning og påskrudde heisefester i øvre luftretning. Inspeksjonsvindu i dør inn til roterende varmeveksler og vifter.

Tegningsnr.: 201.6696.01

CEAA470 - Enstrøms aggregat innendørsutførelse med roterende varmegjenvinner

Inspeksjonsside:	Høyre	
Tilluft:	Nede	
Luftmengde tilluft: 1,2 kg/m <sup>3</sup>	44000	m <sup>3</sup> /h
Luftmengde avtrekk: 1,2 kg/m <sup>3</sup>	44000	m <sup>3</sup> /h
Eksternt trykkfall tilluft:	240	Pa
Eksternt trykkfall avtrekk:	240	Pa
Dim. utetemperatur:	-20	°C
Avtrekkestemperatur:	22	°C
Avtrekksluftfuktighet:	30	%
Spennning:	3x400/50	V
SFP v/rene filter og tørre batteri:	1,8	kW/m <sup>3</sup> /s

#### Lydeffektnivå, korrigert for funksjonsutstyr

	63	125	250	500	1k	2k	4k	8k	db(A)
Tilluftskanal	78	87	78	85	85	79	77	68	88,2
Avtrekkskanal	72	84	73	76	66	57	48	40	75,3
Luftinntak	73	84	73	77	67	58	48	41	76
Avkastkanal	77	87	78	84	86	80	79	69	88,9
Til Omgivelsene	76,5	79	62	60,5	62,5	57,5	54	40,5	67,5

## Teknisk underlag

**OrdreNr: 201.6696.01**  
**Prosjekt: Mesterfjellet skole**  
**Merket:**

### TILLUFT

**1 stk Stengespjeld på inntak, montert inni aggregat**  
Trykkfall 10 Pa  
Dimensjon 2000x1600 mm

**1 stk Finfilter EU7, på luftinntak.**  
Filterareal 83,7 m<sup>2</sup>  
Trykkfall rent filter 85,19 Pa  
592x592 12 stk.  
287x592 3 stk.  
Dim trykkfall 142,59 pa  
Slutt trykkfall 200 Pa

**1 stk Roterende varmeveksler 525 vanlig rotor med motor.**  
Temp.virkn.grad vinter 81,5 %  
Spenning 3x230/400 V  
Strøm 2,08/1,2 A  
Trykkfall tiluft 140 Pa  
Trykkfall avtrekk 140 Pa  
Temp. ø/varmegjenvinner avtrekk -12,2 °C  
Temp. ø/varmegjenvinner tiluft 14,2 °C  
Overført Effekt 504,11 kW

**2 stk Tilluftsvifte kammervifte BPFM 800-250**  
Turtall 1046 o/min  
Virkningsgrad 81,72 %  
Netto effektbehov, tørr tilstand. 5,15 kW  
Totaltrykk 701 Pa  
Total lydnivå viftestuss 83,5 dbA  
Viftetype BPFM 800-250  
Tilgjengelig Statisk Trykk 240 Pa  
K-faktor S&P  $Q_v=1/k \times \sqrt{\Delta p_m}$  ( m<sup>3</sup>/s) 5,29  
Lufthastighet 2 m/s  
Totalt statisk trykkfall 632 Pa

**2 stk Motor 7,5 kW, 6p, 1 hastighet. IE2, høyeffektiv. Byggestørrelse 160M.**  
Turtall 975 o/min  
Effekt 7,5 kW  
Merkestrøm 3x400/50 14,3 A  
Beregnet driftsfrekvens 57,1 Hz  
Maksimal tillatt driftsfrekvens 77,9 Hz  
Tilført effekt(Motor) 6,089 kW

**1 stk Varmtvannsbatteri kobber/aluminium 2 rørdyp - Cu-Al-FeZn P3012AC 2R-59T-2485A-3,0pa 29C 1 1/4**



Batterieffekt	108,13 kW
Lufttemp. inn	13,7 °C
Lufttemp. ut	21 °C
Lufthastighet	2,72 m/s
Trykkfall luft	30,32 Pa
Antall rørdyp	2 stk.
Vanntemp. inn	55 °C
Vanntemp. ut	35 °C
Vannmengde	1,306 l/s
Trykkfall vann	9,98 kPa
Finneavstand	3 m.m.
Ant. Kretser	29
Innvendig volum	38,9 dm <sup>3</sup>
Glykol prosent	0 %

### AVTREKK

**1 stk Stengespjeld på avtrekk, montert inni aggregat.**  
Trykkfall 10 Pa  
Dimensjon 2000x1600 mm

**1 stk Finfilter EU7, for avtrekksluft.**  
Filterareal 83,7 m<sup>2</sup>  
Trykkfall rent filter 85,19 Pa  
592x592 12 stk.  
287x592 3 stk.  
Dim trykkfall 142,59 pa  
Slutt trykkfall 200 Pa

**2 stk Avtrekksvifte kammervifte BPFM 800-250**  
Turtall 1032 o/min  
Virkningsgrad 81,9 %  
Netto effektbehov, tørr tilstand. 4,93 kW  
Totaltrykk 671 Pa  
Total lydnivå viftestuss 83,33 dbA  
Viftetype BPFM 800-250  
Tilgjengelig Statisk Trykk 240 Pa  
K-faktor S&P  $Q_v=1/k \times \sqrt{\Delta p_m}$  ( m<sup>3</sup>/s) 5,29  
Lufthastighet 2 m/s  
Totalt statisk trykkfall 602 Pa

**2 stk Motor 7,5 kW, 6p, 1 hastighet. IE2, høyeffektiv. Byggestørrelse 160M.**  
Turtall 975 o/min  
Effekt 7,5 kW  
Merkestrøm 3x400/50 14,3 A  
Beregnet driftsfrekvens 56,4 Hz  
Maksimal tillatt driftsfrekvens 77,9 Hz  
Tilført effekt(Motor) 5,840 kW

(Aggregat: 201.6696.01)

## Vedlegg 5: Datablad for sensor

Datablad for sensor benyttet i trinnrom.

<b>Data sheet</b> <b>AMUN 716 KNX</b> <small>Article number: 7169200</small>	Home and Building control <b>KNX</b>
--	---

AMUN 716 KNX

Article number: 7169200

### Description

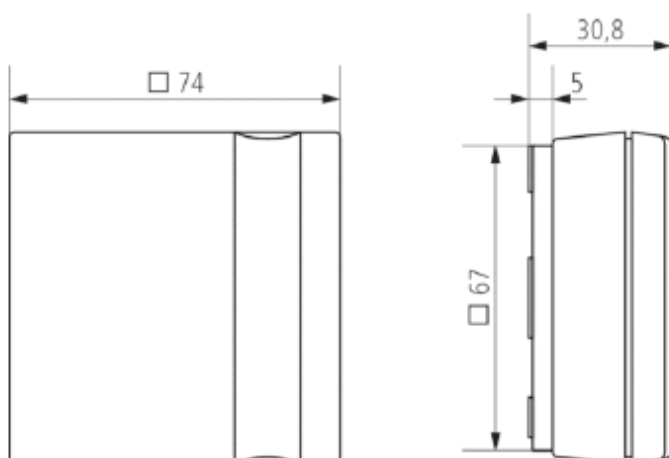


- CO<sub>2</sub> airquality sensor
- Measures CO<sub>2</sub> level, relative humidity and temperature
- Three independent, configurable thresholds for the CO<sub>2</sub> level and relative humidity
- A threshold for the temperature
- Actions can be carried out if thresholds are exceeded or not reached (send, priority, switching, value)
- Display of achieved threshold of CO<sub>2</sub> level and relative humidity through multi-coloured LEDs
- CO<sub>2</sub> setting range of 500-2250 ppm (thresholds)
- Relative humidity of 1 % to 100 %
- "Physical value" object of 0-9999 ppm
- Power supply via KNX bus voltage, 230 V mains supply not required

### Technical data

Operating voltage KNX	Bus voltage, ≤10 mA
Measuring range CO <sub>2</sub>	300 – 9999 ppm
Measuring range temperature	+0 °C ... +40 °C
Measuring range humidity	20 – 80 % rF linear
Ambient temperature	-5 °C ... +45 °C
Installation type	Wall installation
Type of protection	IP 20
Protection class	III according to EN 60 730-1

### Scale drawings





## Vedlegg 6: Risikovurdering av feltmålinger

Som del av masteroppgaven skal det utføres målinger på Mesterfjellet skole i Larvik. Hensikten med disse er å undersøke inn klimaet, samt at de skal brukes som valideringsgrunnlag for IDA ICE simuleringer. Målingene blir gjennomført to datoer med ca. 1 måneds mellomrom. Målinger av CO<sub>2</sub>-nivå, temperatur og lufthastighet vil bli utført, samt manuell logging av tilstedeværelse i rom. Alle målingene er utført i trinnrom 24A.

Håndholdte CO<sub>2</sub>-målere plasseres på utvalgte steder i trinnrommet, samt ved avtrekk og sensor. For målinger av lufthastighet måles dette med et håndholdt apparat på utvalgte punkt i trinnrommet. Temperatur måles ved hjelp av loggere, disse plasseres på utvalgte steder i trinnrommet. Noen av disse skal være i trinnrommet mellom de to måledagene. Disse er plassert på utvalgte steder i trinnrommet, med hensikt at elevene ikke skal oppdage dem. Arbeidsoppgaver der det er risiko for skade på mennesker, materiell/ utstyr eller ytre miljø:

- Utstyr kan falle ned ved montering  
Sannsynlighet: Svært liten  
Konsekvenser: Kan treffe person, kan ødelegge utstyr  
Tiltak for å minimere risiko: Feste måleutstyr på forsvarlig måte, planlegge målinger og plassering på forhånd
- Fallskader ved montering av utstyr  
Sannsynlighet: Svært liten  
Konsekvenser: Personskader, ødeleggelse av utstyr  
Tiltak for å minimere risiko: Planlegge montering av utstyr. Vise forsiktighet når utstyr skal plasseres høyt i rommet.
- Utstyr kan falle ned under måling  
Sannsynlighet: Svært liten

Konsekvenser: Kan treffe person, kan ødelegge utstyr

Tiltak for å minimere risiko: Feste måleutstyr på forsvarlig måte, planlegge målinger og plassering på forhånd, opplyse elevene om å vise forsiktighet

- Elever kan ødelegge utstyr

Sannsynlighet: Svært liten

Konsekvenser: Ødelagt utstyr

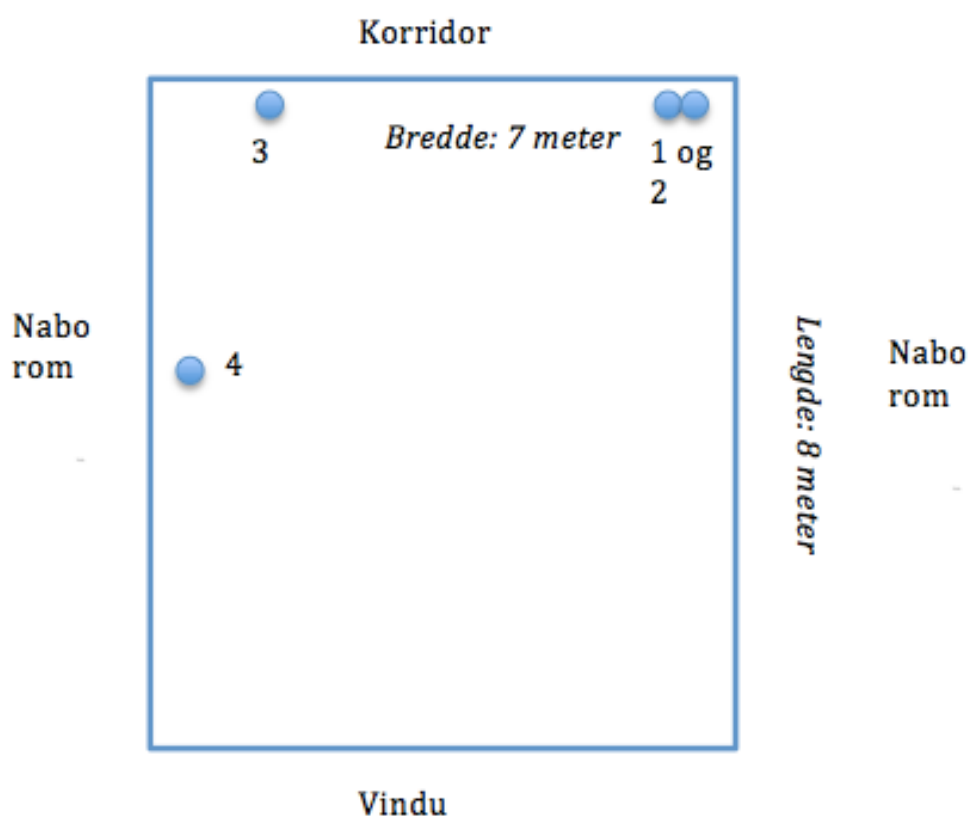
Tiltak for å minimere risiko: Opplyse elevene om å vise respekt og forsiktighet.

Sitte i trinnrommet under målingene å passe på utstyr.



## Vedlegg 7: CO<sub>2</sub>-måleres plassering

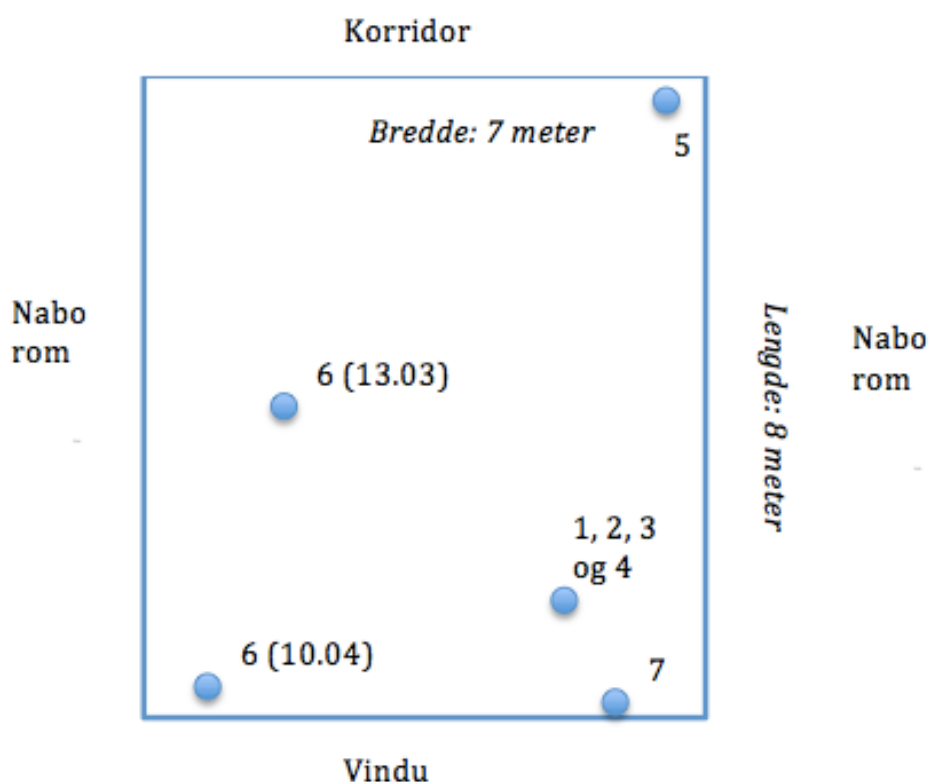
Beskrivelse og skisse av plassering av CO<sub>2</sub>-måler, for målinger 13.03 og 10.04.



Måler	Beskrivelse	Høyde
1	KIMO 1330	2,6 meter
2	KIMO 1118	1,6 meter
3	Vaisala 0010	1,1 meter
4	Vaisala 0011	1,7 meter

## Vedlegg 8: Temperaturloggere dagsmåling plassering

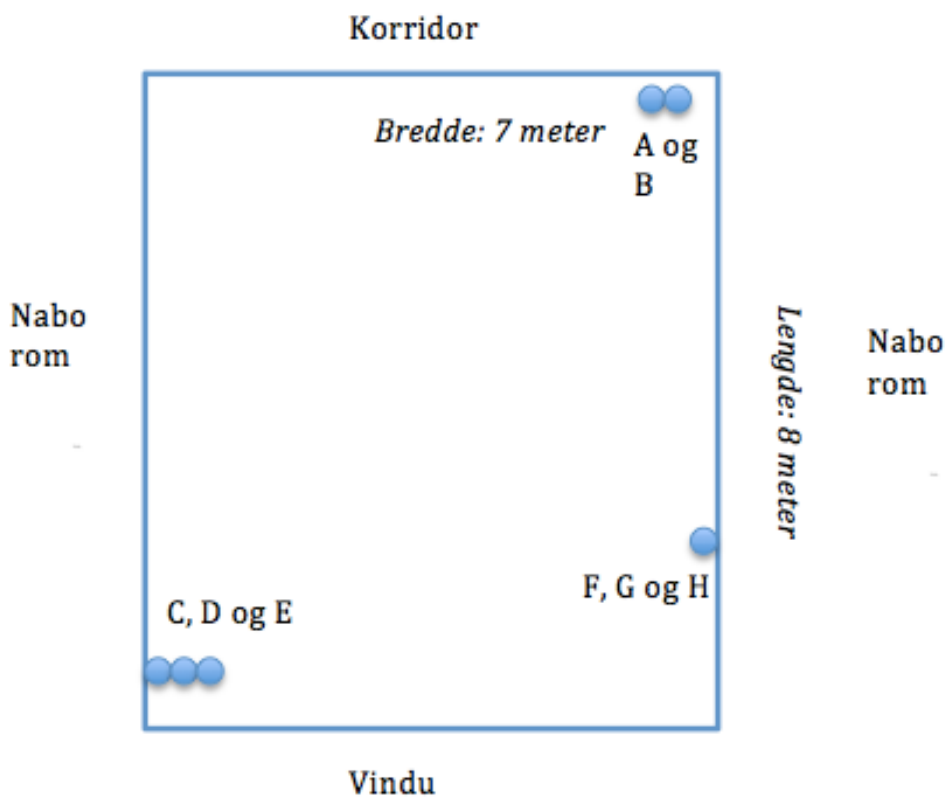
Beskrivelse og skisse av plassering av temperaturloggere for målinger 13.03 og 10.04. Logger nummer 6 sin plassering ble flyttet mellom de to dagene.



Måler	Plassering	Høyde
1	Hengt i tråd	1,6 meter
2	Hengt i tråd	1,1 meter
3	Hengt i tråd	0,6 meter
4	Hengt i tråd	0,1 meter
5	Ved avtrekk	2,6 meter
6 (13.03)	Under pult midt i trinnrom	0,7 meter
6 (10.04)	På pult ved vindu	0,75 meter
7	Over vindu	3 meter

## Vedlegg 9: Temperaturloggere periodemålinger plassering

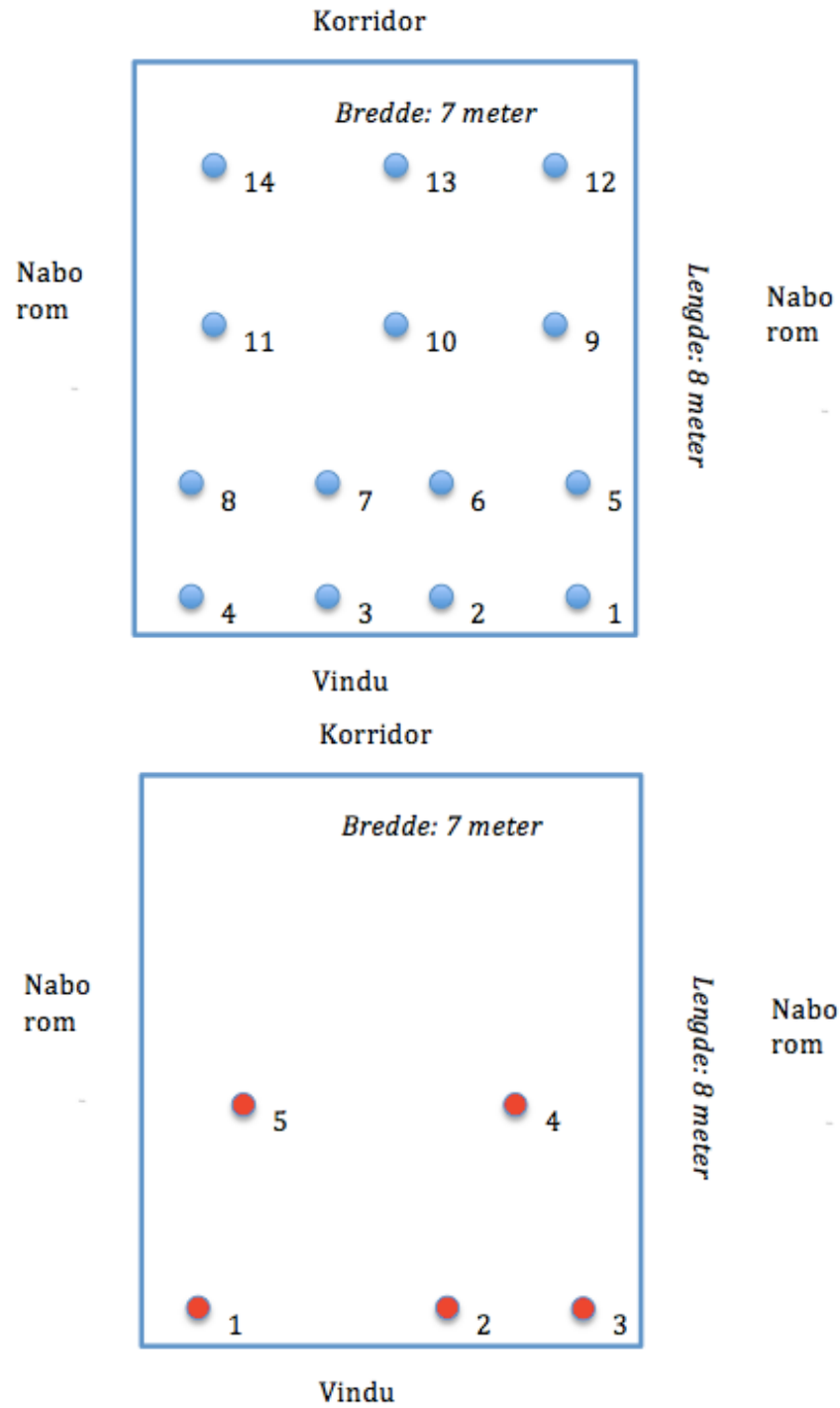
Beskrivelse og skisse av plassering av temperaturloggere som var tilstede i klasserommet i perioden 13.03 til 10.04.



Måler	Plassering	Høyde
A	Ved sensor	1,6 meter
B	Ved avtrekk	2,6 meter
C	Under arbeidsstasjon ved vindu	0,6 meter
D	Under hylle ved vindu	0,1 meter
E	Bak hylle ved vindu	1,1 meter
F	Ved lærers arbeidsstasjon	0,1 meter
G	Ved lærers arbeidsstasjon	0,6 meter
H	Ved lærers arbeidsstasjon	1,1 meter

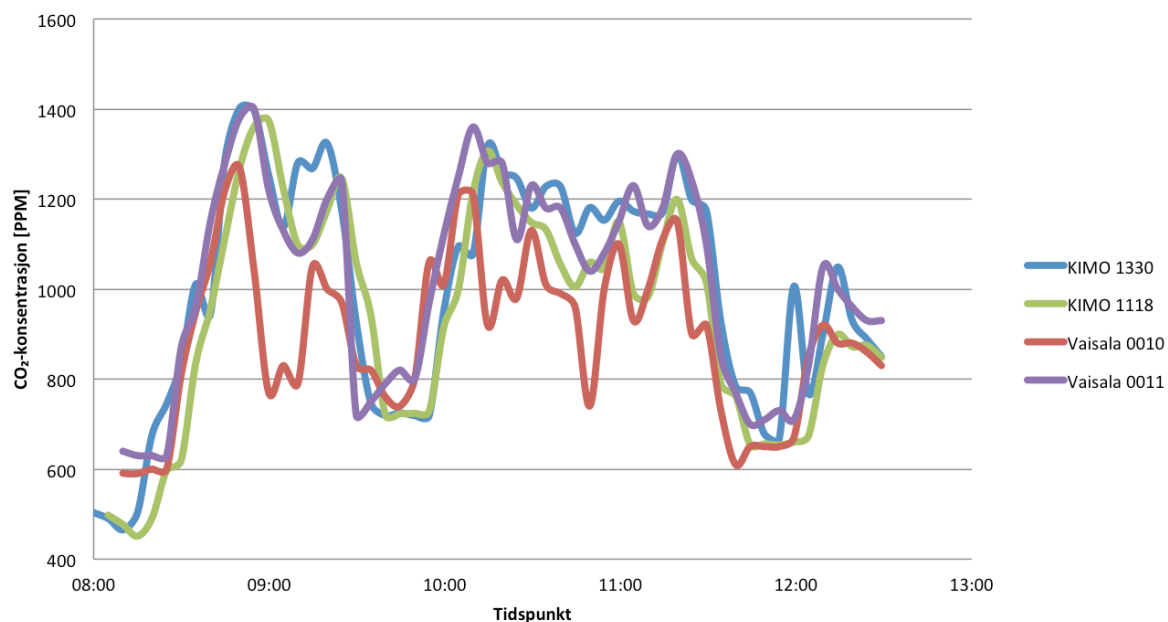
## Vedlegg 10: Målepunkt lufthastighet

Skisse av målepunkt for lufthastighet. Den første figuren med blå punkter er for målingene den 13.03, mens den andre figuren med røde punkter er for målinger den 10.04. Ved hvert punkt ble det foretatt målinger i 0,1 og 1,1 meters høyde.

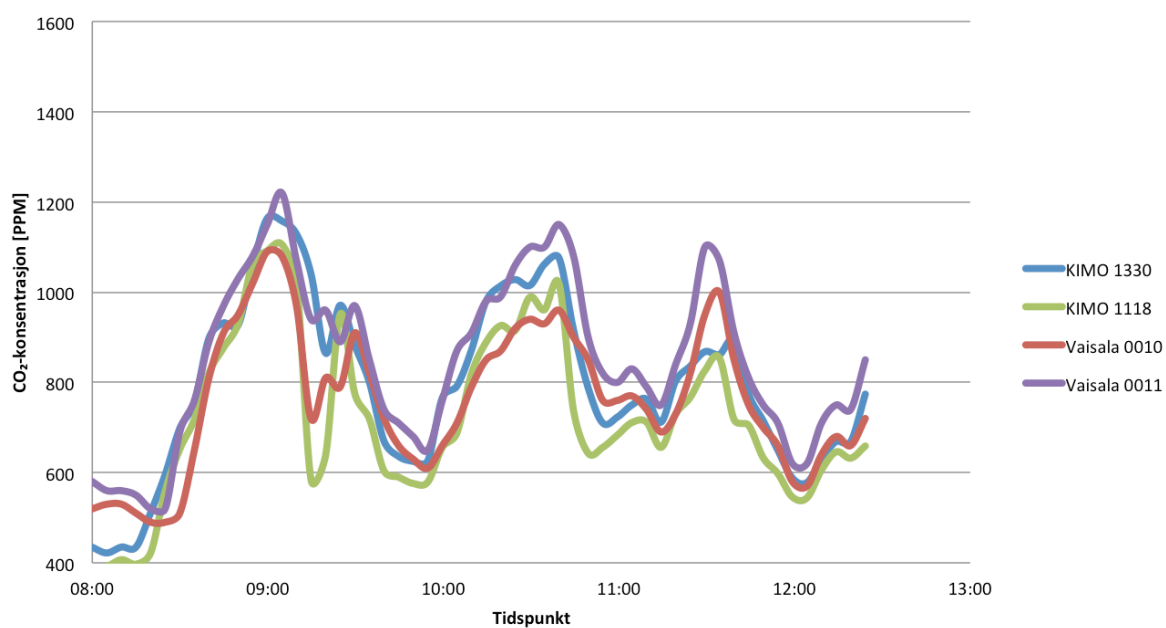


## Vedlegg 11: CO<sub>2</sub>-målinger

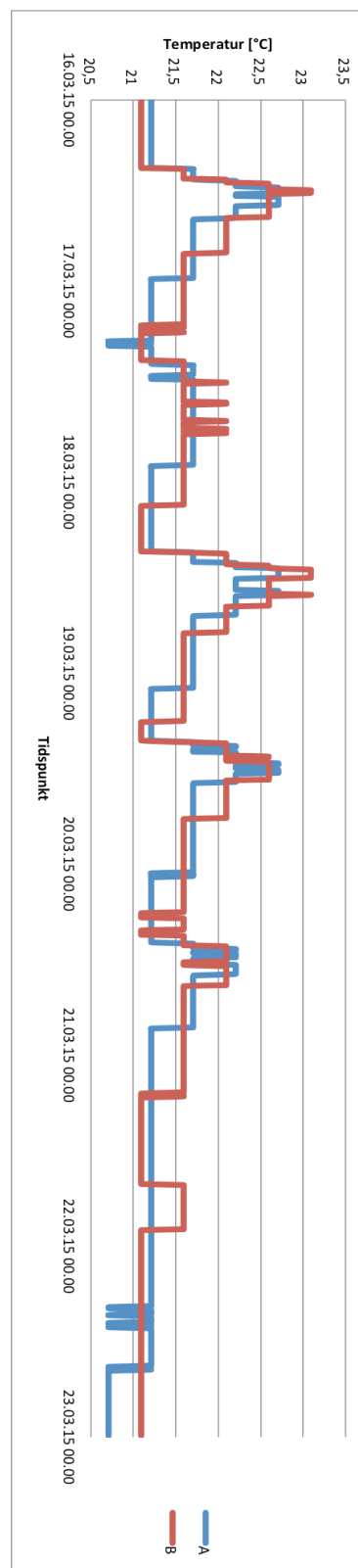
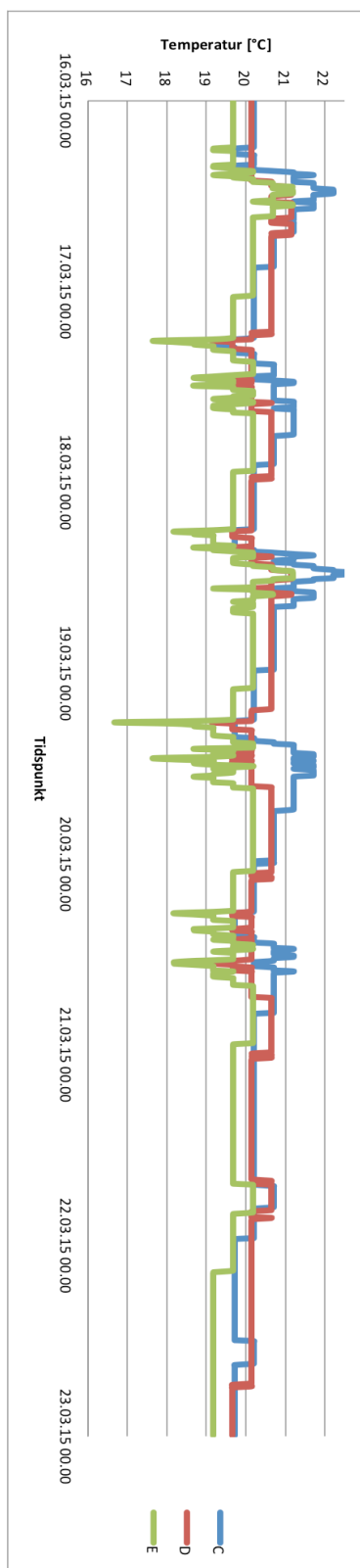
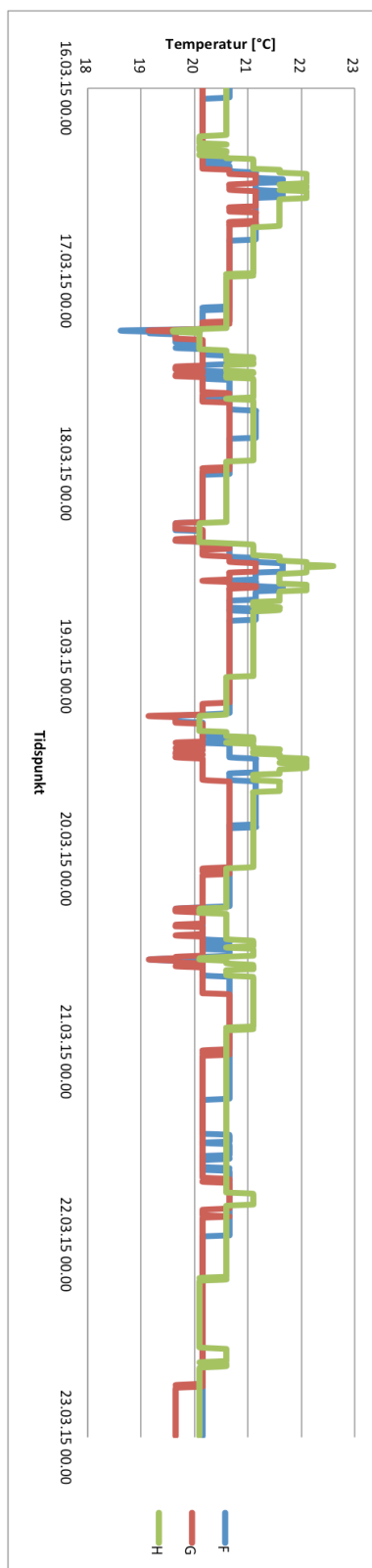
CO<sub>2</sub>-målinger alle målere fra 13 mars



CO<sub>2</sub>-målinger alle målere fra 10 april



## Vedlegg 12: Temperatur periodemålinger



Temperaturmålinger fra uken fra mandag 16.03 til søndag 22.03. Plassering beskrevet i Vedlegg 9.

## Vedlegg 13: Lufthastighetsmålinger

Lufthastighetsmålinger den 13.03, med tilstedeværelse av elever

Punkt	1,1 meter høyde over gulv		0,1 meter høyde over gulv	
	Minimal	Maksimal	Minimal	Maksimal
	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]
<b>1</b>	0	0,09	0	0,03
<b>2</b>	0	0,08	0	0,01
<b>3</b>	0	0,2	0	0
<b>4</b>	0	0,15	0	0,12
<b>5</b>	0	0,01	0	0,08
<b>6</b>	0	0,02	0	0,03
<b>7</b>	0	0,06	0	0,03
<b>8</b>	0	0,07	0	0,09
<b>9</b>	0	0,01	0	0,09
<b>10</b>	0	0,01	0	0
<b>11</b>	0	0,01	0	0,03
<b>12</b>	0	0,03	0	0
<b>13</b>	0	0	0	0
<b>14</b>	0	0	0	0

Lufthastighetsmålinger den 13.03, uten tilstedeværelse av elever og ved maksimal vindusåpningsgrad

Punkt	1,1 meter høyde over gulv		0,1 meter høyde over gulv	
	Minimal	Maksimal	Minimal	Maksimal
	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]	lufthastighet [m/s]
<b>1</b>	0	0,15	0	0,09
<b>2</b>	0	0,09	0	0,11
<b>3</b>	0	0,12	0	0,1

4	0	0,09	0	0,13
5	0	0,04	0	0,15
6	0	0,07	0	0,05
7	0	0,02	0	0,01
8	0	0,02	0	0,04
9	0	0,08	0	0,16
10	0	0,05	0	0,05
11	0	0,04	0	0,1
12	0	0,12	0	0,14
13	0	0,01	0	0,04
14	0	0,03	0	0,09

Lufthastighetsmålinger den 10.04, uten tilstedeværelse av elever og ved maksimal vindusåpningsgrad.

Målepunkt	Høyde [meter]	Minimal lufthastighet [m/s]	Maksimal lufthastighet [m/s]	Gjennomsnitts lufthastighet [m/s]	Turbulens intensitet [%]
1	0,1	0	0,42	0,08	117
1	1,1	0,01	0,26	0,11	54
2	0,1	0	0,31	0,13	57
2	1,1	0	0,19	0,06	102
3	0,1	0	0,13	0,04	100
3	1,1	0	0,17	0,03	119
4	0,1	0	0,40	0,19	57
4	1,1	0	0,41	0,16	57
5	0,1	0	0,32	0,13	56
5	1,1	0	0,17	0,04	99



