

## Mæla ungdomsskole - Romklimatiske vurderinger

Bjørn J. Wachenfeldt

**SINTEF** *Teknologi og samfunn*  
Arkitektur og byggteknikk

Oktober 2004

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)



**SINTEF Teknologi og samfunn**  
Arkitektur og byggteknikk

Postadresse: 7465 Trondheim  
Besøksadresse: Alfred Getz vei 3  
Telefon: 73 59 26 20  
Telefaks: 73 59 82 85

Foretaksregisteret: NO 948 007 029 MVA

# SINTEF RAPPORT

TITTEL

**Mæla ungdomsskole - Romklimatiske vurderinger**

FORFATTER(E)

Bjørn J. Wachenfeldt

OPPDRAGSGIVER(E)

Interconsult ASA

RAPPORTNR. STF22 A04515	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Oskar Folden	
GRADER. DENNE SIDE	ISBN 82-14-03419-1	PROSJEKTNR. 22416800	ANTALL SIDER OG BILAG 24
ELEKTRONISK ARKIVKODE MælaRapport2-SINTEF-pdfVersjon.doc	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Bjørn J. Wachenfeldt,		VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Hans Martin Mathisen,
ARKIVKODE	DATO 2004-10-07	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Siri H. Blakstad, Forskningsjef,	

## SAMMENDRAG

Det er gjort grove overslagsberegninger for å vurdere nødvendige dimensjoner av tilluftsløsningen i andre etasje av undervisningsfløyene i Mæla ungdomsskole. Dette for at prosjekteringsgruppen skal få et anslag over hvilke arealmessige hensyn som må tas for å unngå trekkproblemer ved bruk av fortregningsventilasjon.

Vurderingene er gjort med utgangspunkt i luftmengder dimensjonert med hensyn til luftkvalitet. På varme dager ønsker en likevel å øke luftmengdene ytterligere for å bli kvitt overskuddsvarme og skape behagelig luftbevegelse i lokalene. Imidlertid er det problematisk å benytte fortregningsventilasjon til dette formål pga. trekkproblematikken. Dynamiske simuleringer indikerer at det i alle tilfelle vil bli ubehagelig varmt i lokalene på varme dager dersom en kun benytter mekanisk ventilasjon uten kjøling.

En beregning gjort tidligere [1] viste dersom at vinduer i nord- og sørfasaden åpnes samtidig for å oppnå gjennomtrekk når det er varmt inne kunne være et godt tiltak for å sikre termisk komfort på varme dager, f.eks. gjennom automatisk styring av høyt plasserte dagslysvinduer. Dette er nå vurdert nærmere, og det er gjort simuleringer på de varmeste dagene for å utrede hvor stor vindusåpning (lysåpning) som er nødvendig for å skape akseptable termiske forhold.

Resultatene indikerer at 1,5 m<sup>2</sup> lysåpning i nord og sørfasaden, samt 0,5 m<sup>2</sup> i øst og vestfasaden vil gi tilstrekkelig lufting til å holde den operative romtemperaturen under 26 °C bortsett fra noen timer på de aller varmeste dagene.

## STIKKORD

EGENVALGTE	Naturlig ventilasjon	Komfort
	Fortregningsventilasjon	Inneklima

**INNHold**

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Mål</b> .....	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Konklusjoner</b> .....	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>Dimensjonering av fortregningsventiler</b> .....	<b>6</b>
	Luftmengder .....	6
	Temperaturdifferanse .....	7
	Fortregningsventilenes egenskaper .....	8
	Dimensjonering .....	9
<b>5</b>	<b>Simuleringer under dimensjonerende sommerforhold</b> .....	<b>12</b>
	5.1 Betingelser for energisimuleringene .....	12
	5.2 Simuleringer for dimensjonerende sommerforhold .....	16
<b>6</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>24</b>

## 1. Bakgrunn

Interconsult ASA arbeider med prosjekteringen av varme og ventilasjonssystemet for Mæla ungdomskole i Skien kommune.

På oppdrag fra Pir II arkitektkontor, har SINTEF tidligere utredet alternative ventilasjonsløsninger for plan 2 av undervisningsfløyene. Utredningene er presentert i SINTEF rapport STF22 A04512 [1]. I rapporten ble det av flere grunner anbefalt at en sikrer luftkvaliteten ved hjelp av mekanisk drevet fortregningsventilasjon med høyeffektiv varmegjenvinning. På grunn av høyere ventilasjonseffektivitet, vil en da kunne redusere luftmengdene betydelig sammenlignet med en konvensjonell løsning med omrøringsventilasjon. For å unngå utstrakt bruk av horisontale ventilasjonskanaler ble det anbefalt at en enten benytter lokale aggregater i etasjen eller sentrale aggregater med hovedtilførsel til etasjen via vertikale sjakter i tilknytning til toalett/våtrom.

Dynamiske simuleringer viste likevel at de lave luftmengdene vil kunne medføre ukomfortabelt høy temperatur innendørs, og da spesielt på varme solrike dager. Det ble derfor gjort simuleringer for å undersøke muligheten for å unngå disse problemene ved hjelp av vinduslufting. En beregning der en antok at vinduer i nord og sørfasaden åpnes samtidig for å oppnå gjennomtrekk når det er varmt inne tydet på at dette kan være en aktuell løsning, f.eks. gjennom automatisk styring av høyt plasserte ”dagslysvinduer”. Imidlertid ble det poengtert at styringsstrategien bør vurderes videre i forhold til bedre utnyttelse av frikjølingspotensialet samt faren for trekk, regninntregning og økt energibruk.

Interconsult har i samarbeid med Pir II jobbet videre med en løsning der en kombinerer styrt vinduslufting med mekanisk fortregningsventilasjon for plan 2 i undervisningsfløyene. SINTEF har påtatt seg å bistå med romklimatiske vurderinger mot krav til romtemperatur og komfort.

## 2. Mål

Målet er å komme fram til en enkel, robust og energieffektiv varme og ventilasjonsløsning som ivaretar både det indre og det ytre miljø på en best mulig måte med hensyn til:

- Innendørs luftkvalitet og termisk komfort.
- Investerings og driftskostnader, inkludert behov for utskiftning og vedlikehold.
- Energiforbruk.
- Indre og ytre estetiske hensyn.
- Flexibilitet i forhold til fremtidige endringer i bruken av lokalene.
- Indre og ytre støy.
- Robusthet og oversiktighet.

### 3. Konklusjoner

Det er gjort grove overslagsberegninger for å vurdere nødvendige dimensjoner av tilluftsløsningen i andre etasje av undervisningsfløyene i Mæla ungdomsskole. Dette for at prosjekteringsgruppen skal få et anslag over hvilke arealmessige hensyn som må tas for å unngå trekkproblemer ved bruk av fortregningsventilasjon. Det er tatt utgangspunkt i luftmengder dimensjonert av både SINTEF og Interconsult med hensyn til luftkvalitet.

Med dimensjonerende luftmengder basert på SINTEFs vurderinger (1200 m<sup>3</sup>/h per aggregat), bør den disponible veggbredden være ca. 13,5 meter dersom en ikke benytter radielle tilluftsdon på veggens ender, se Figur 5. Dersom en benytter radielle tilluftsdon ved endene kan det være tilstrekkelig med en veggbredde på ca 3 meter eller mindre, avhengig av de radielle tilluftsdonenes egenskaper og kravene til nærsone rundt disse.

Med dimensjonerende luftmengder basert på Interconsults vurderinger (2160 m<sup>3</sup>/h per aggregat), bør den disponible veggbredden være ca. 24 meter dersom en ikke benytter radielle tilluftsdon på veggens ender. Dersom en benytter radielle tilluftsdon ved endene vil det være tilstrekkelig med en veggbredde på ca 13 meter eller mindre avhengig av de radielle tilluftsdonenes egenskaper.

Vi ser at ved bruk av fortregningsventilasjon med de luftmengder som Interconsult ønsker, krever betydelige veggarealer for lufttilførsel dersom en skal være sikker på å unngå trekkproblemer. Det bør derfor vurderes om en bør benytte omrøringsventilasjon om en likevel tenker å ventilere med så høye luftmengder. Imidlertid er det viktig å være oppmerksom på at dette ikke nødvendigvis vil medføre bedre luftkvalitet i lokalene enn ved bruk av fortregningsventilasjon med lavere luftmengder. Dette da fortregningsventilasjon i den typen lokaler det her er snakk om vil være betydelig mer effektiv en omrøringsventilasjon.

På varme dager ønsker en likevel å øke luftmengdene for å bli kvitt overskuddsvarme og skape behagelig luftbevegelse i lokalene. Imidlertid er det problematisk å benytte fortregningsventilasjon til dette formål pga. trekkproblematikken. Trekkfaren øker med temperaturforskjellen mellom tilluften og romluften, slik at den faktisk øker jo varmere det er i rommet. Dette kan en avhjelpe med å forvarme tilluften noe ved hjelp av varmegjenvinneren, men reduserer da samtidig luftens kjøleeffekt slik at romtemperaturen ikke reduseres like mye.

Dynamiske simuleringer indikerer at det i alle tilfelle vil bli ubehagelig varmt i lokalene på varme dager dersom en kun benytter mekanisk ventilasjon uten kjøling. Dette gjelder både om en benytter fortregningsventilasjon og omrøringsventilasjon, og på tross av at en benytter Interconsults dimensjonerende luftmengder og samtidig har god solavskjerming av vinduene i sør og vestfasaden.

En beregning gjort tidligere [1] viste at samtidig åpning av vinduer i nord- og sørfasaden når det er varmt inne kunne være et godt tiltak for å sikre termisk komfort på varme dager, f.eks. gjennom automatisk styring av høyt plasserte dagslysvinduer. Dette fordi gunstige vindforhold gjør at åpning av vinduer på begge sider bidrar til gjennomtrekk og god utlufting (kryssventilasjon) av lokalene. Den høye plasseringen er fordelaktig både på avtrekksiden og tilluftssiden. På avtrekksiden vil den varmeste luften oppunder taket ventileres ut. På tilluftssiden gjør innblanding av den samme varme romluften at en unngår trekkproblemer i oppholdssonen selv ved relativt lave utetemperaturer.

Dette er nå vurdert nærmere, og det er gjort simuleringer på de varmeste dagene for å utrede hvor stor vindusåpning (lysåpning) som er nødvendig for å skape akseptable termiske forhold.

Den varmeste dagen som er analysert er 20. juni, med maksimal utetemperatur på 26,5 °C og skyfri himmel. Det var her forutsatt maksimal personbelastning og bruk av elektriske lys hele dagen. Indre termisk masse i lokalene ble neglisjert, men beregningene ble gjort med god solavskjerming av sør- og vestfasaden. Med de aktuelle vindforhold denne dagen ble den maksimale romluftstemperaturen ved bruk av ren mekanisk fortregningsventilasjon redusert fra 34,4 til 30,0 °C dersom en anvender luftevinduer med totalt 2 m<sup>2</sup> lysåpning i både nord- og sørfasaden. Effekten av en økning ut over 2 m<sup>2</sup> ser ut til å være relativt begrenset sammenlignet med økningen fra 0 til 2 m<sup>2</sup> åpningsareal i fasadene.

Simuleringer for perioden fra 2. mai til 17. juni indikerte likevel at en på tross av denne vinduslufteringen vil kunne få svært høye temperaturer enkelte dager. Dette viste seg å henge sammen med at enkelte varme perioder med mye sol sammenfaller med vindforhold som er ugunstige for gjennomlufting via nord- og sørfasaden. En simulering gjort med 1,5 m<sup>2</sup> lysåpning i nord- og sørfasaden, samt 0,5 m<sup>2</sup> i øst og vestfasaden indikerer at installasjon av noen luftevinduer også på disse fasadene kan være et godt tiltak for å unngå de høye temperaturene.

En simulering der en også antar at en benytter vanlig manuell vinduslufting når det er for varmt inne indikerer at temperaturen praktisk talt vil holde seg under 26 °C for hele vår og høstperioden, med unntak av dagene 19-20 juni.

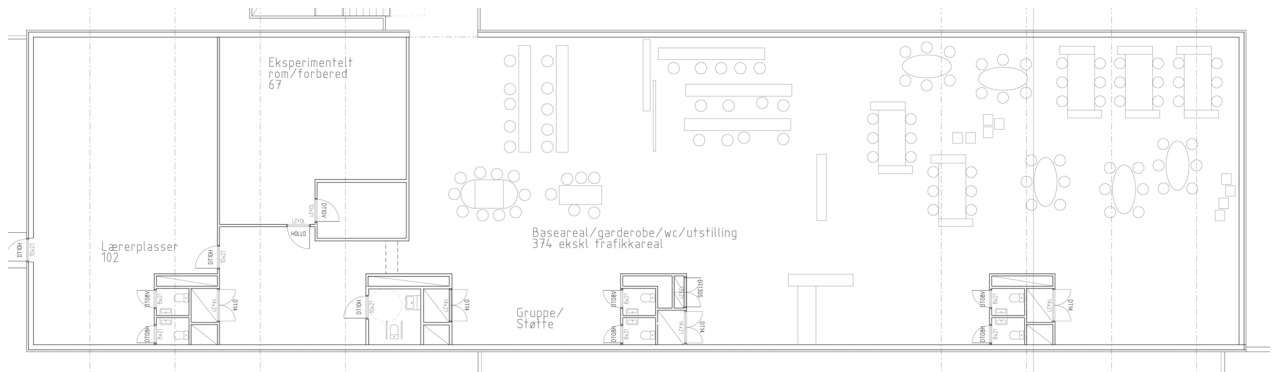
Resultatene tyder på at forholdene ligger godt til rette for å kombinere mekanisk drevet fortregningsventilasjon med vinduslufting for plan 2 i undervisningsfløyene ved Mæla skole. Det mekaniske anlegget vil sikre luftkvaliteten på kalde dager med minimalt energiforbruk på grunn av effektiv ventilasjon som tillater lave luftmengder, høyeffektiv varmegjenvinning og minimalt energiforbruk til viftedrift som følge av lave trykkfall. Når de klimatiske forholdene gjør at en ikke lenger trenger oppvarming av lokalene kan den mekaniske fortregningsventilasjonen suppleres med automatisk styrt vinduslufting å hindre at det blir for varmt, noe som dessuten vil forbedre luftkvaliteten ytterligere. Risikoen for trekk vil være minimal ved bruk av høyt plasserte luftevinduer ettersom en vil få god innblanding av varm romluft før friskluften når oppholdssonen.

Unødig vinduslufting vil likevel kunne medføre økt oppvarmingsbehov, samtidig som unødig bruk av mekanisk ventilasjon når forholdene ligger til rette for vinduslufting vil medføre økt energibruk til viftedrift. Styringsstrategien for vinduslufteringen og mekanisk ventilasjon bør derfor planlegges nøye i forhold til temperaturer og vind slik at en oppnår best mulig termiske forhold inne med lavest mulig energiforbruk.

Simuleringene som er gjort, tar utgangspunkt i en modell med relativt lette vegg, tak og gulvkonstruksjoner. Dette gjør at kjøleeffekten av lufting/ventilasjon om natten får relativt begrenset effekt på forholdene påfølgende dag.

#### 4. Dimensjonering av fortregningsventiler

Figur 1 viser planløsningen for 2 etg. av sørlig undervisningsfløy slik den foreligger per dato. Interconsult har foreslått å integrere fortregningsventilene i de nordlige innerveggene i toalettseksjonene. Imidlertid er bredden av denne veggen kun 2,5 meter per toalett/teknisk rom. Spørsmålet er derfor om løsningen medfører at nærsonen til fortregningsventilene vil strekke seg langt inn i oppholdssonen mot nord slik at en får problemer med trekk. Dette vil hovedsakelig avhenge av luftmengden per fortregningsventil, temperaturdifferansen mellom tilluften og romluften samt egenskapene til fortregningsventilen.



**Figur 1 Planløsningen for 2 etg av sørlig undervisningsfløy**

#### Luftmengder

Fortregningsventilasjon har større ventilasjonseffektivitet enn omrøringsventilasjon. Dersom en antar en personlig eksponeringsindeks på 2, må en ventilere med minst 4,6 l/s per person for å holde CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen i den inhalerte luften under 1000 ppm [1]. En luftmengde på 6 l/s vil tilsvarende holde CO<sub>2</sub>-nivået på 850 ppm ved de samme forutsetninger. Med bakgrunn i målinger og erfaringer med fortregningsventilasjon [2,3], mener vi at en bør kunne oppnå en personlig eksponeringsindeks (ventilasjonseffektivitet) på minst 2 i andre etasje av undervisningsfløyene. Under forutsetning av effektiv fortregningsventilasjon kan derfor 6 l/s brukes som dimensjonerende luftmengde for å sikre luftkvaliteten. Ettersom maksimal belastning er estimert til 165 personer, vil den totale dimensjonerende luftmengden for etasjen bli  $\approx 1000$  l/s eller 1,53 l/s (5,5 m<sup>3</sup>/h) per m<sup>2</sup> grunnflate.

Interconsult står imidlertid som ansvarlig prosjekterende, og ønsker av sikkerhetshensyn å dimensjonere aggregatene basert på veiledningen til teknisk byggforeskrift (TEK) tillagt en ekstra sikkerhetsmargin. Forutsatt lavemitterende materialer, anbefaler veiledningen til TEK en luftmengde på 7 l/s per person + 1 l/s per m<sup>2</sup> grunnflate. Dette gir en total dimensjonerende luftmengde for etasjen på  $\approx 1800$  l/s eller 2,74 l/s (9,9 m<sup>3</sup>/h) per m<sup>2</sup> grunnflate. Dette er 80 % høyere enn SINTEFs anbefalinger, og 116 % høyere enn den beregnede luftmengden for å sikre et CO<sub>2</sub>-nivå på 1000 ppm ved stasjonære forhold og maksimal personbelastning dersom en antar en personlig eksponeringsindeks (ventilasjonseffektivitet) på 2.0 [1].

De negative konsekvensene ved overdimensjonering av aggregatene for fortregningsventilasjon er:

- Økte kostnader
- Økt plassbehov
- Risiko for overventilasjon som forårsaker unødig energibruk samt økt risiko for trekk.

Problemene tilknyttet det siste punktet vil unngås eller reduseres betraktelig dersom en styrer luftmengdene etter behov. Dette da frekvensstyring av vifter gjør at aggregatene kan kjøres med reduserte luftmengder i forhold til det som er aggregatets nominelle luftmengde, dvs. optimalt driftspunkt. Aggregatet vil da muligens medføre noe større forbruk av energi til viftedrift enn et tilsvarende mindre aggregat, men dette vil oppveies delvis gjennom at lavere lufthastigheter over aggregatets komponenter medfører lavere trykkfall, og delvis gjennom mer effektiv varmegjenvinning (pga. lavere hastigheter over varmeveksler enn for et mindre aggregat).

Dessuten gir bruk av større aggregater sikkerhetsmargin, slik at en unngår problemer dersom ventilasjonsbehovet i fremtiden skulle vise seg å bli større enn forutsatt eller at ventilasjonseffektiviteten blir lavere enn antatt.

Imidlertid vil muligheten for styrt vinduslufting som et supplement til det mekaniske systemet kunne gi god sikkerhetsmargin, selv om aggregatene dimensjoneres med utgangspunkt i SINTEFs anbefalinger.

Spørsmålet er hvilke luftmengder som bør brukes for å dimensjonere fortregningsventilene. I det følgende er ventilene dimensjonert både etter luftmengdene anbefalt av SINTEF (5,5 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> grunnflate) og luftmengdene angitt av Interconsult (9,9 m<sup>3</sup>/h per m<sup>2</sup> grunnflate). For enkelhets skyld har en derfor antatt at valget står mellom to aggregattyper:

1. Med SINTEFs alternativ regnes hvert aggregat å levere 1200 m<sup>3</sup>/h (333 l/s) ved maks belastning.
2. Interconsults alternativ regnes hvert aggregat å levere 2160 m<sup>3</sup>/h (600 l/s) ved maks belastning.

Tilluftsløsningen søkes derfor dimensjonert for disse to alternativ.

### Temperaturdifferanse

Når undertemperert luft strømmer ut av en veggmontert fortregningsventil, f.eks en perforert plate, vil luften falle ned mot gulvet for så å spre seg som et teppe radielt utover, se Figur 2 (venstre). Tykkelsen til luftlaget med den undertempererte tilluften er en funksjon av Arkimedes tall:

$$Ar = \frac{\beta \cdot g \cdot h \cdot (T_r - T_s)}{U_s^2} \quad (1)$$

der

$\beta$  = volum ekspansjonskoeffisienten (=  $1/T_r$  der  $T_r$  er temperaturen til romluften i kelvin)

$T_r - T_s$  = undertemperaturen definert som forskjellen mellom temperaturen ved 1,1 meters høyde i rommet og tilluftstemperaturen

$U_s$  = gjennomsnittlig utstrøms hastighet vinkelrett ut fra fortregningsventilen =  $q_s/A_s$

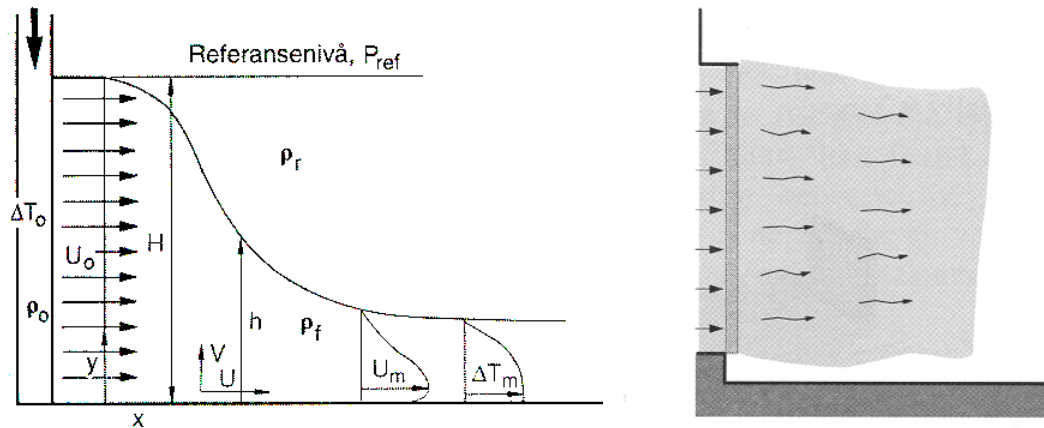
$q_s$  = volumstrømmen for tilluften

$A_s$  = Arealet av fortregningsventilen (høyde  $H$  multiplisert med bredden  $B$ )

Luftlagets tykkelse vil minke når undertemperaturen øker. Typisk vil tykkelsen være rundt 20 cm, og maksimalhastigheten vil være ca 10 % av tykkelsen over gulvnivå, dvs 2 cm over gulvet.

Dersom tilluftstemperaturen er lik temperaturen til romluften vil imidlertid ikke luften falle ned, men fordele seg horisontalt inn i rommet slik den kommer ut av fortregningsventilen, se Figur 2 (høyre).

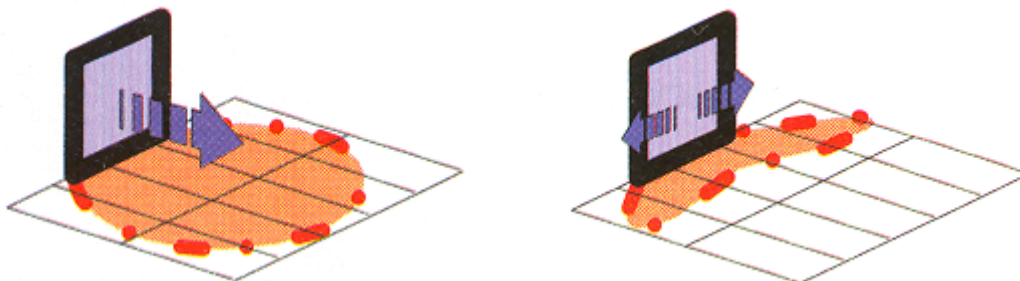




**Figur 2** Vertikalsnitt gjennom nærsonen for fortregningsventil i vegg med horisontal utstrømning av undertemperert luft (venstre) [4]. Når tilluftstemperaturen er tilnærmet lik temperaturen til romluften i utstrømningsområdet vil luften ikke falle ned, men fordele seg innover i romme slik den kommer ut av ventilen[3].

### Fortregningsventilenes egenskaper

De strømnings tekniske egenskapene kan variere mye for veggmonterte fortregningsventiler. Et sentralt punkt er i hvilken grad fortregningen er foroverrettet eller rettet sidelengs. Foroverrettet fortregning medfører at nærsonen strekker seg betydelig lengre ut fra vegg enn når fortregningen er rettet parallelt med vegg, se Figur 3. Moderne fortregningsventiler har normalt betydelig sterkere sidelengs fortregning enn første generasjons fortregningsventiler.



**Figur 3** Foroverrettet fortregning medfører at nærsonen strekker seg betydelig lengre ut fra vegg enn når fortregningen er rettet parallelt med vegg [3].

I realiteten bør nærsonen defineres ut ifra både strømnings hastighet, turbulensintensitet og lufttemperatur. For enkelhets skyld er likevel nærsonen definert som det området der maksimalhastigheten er over 0,2 m/s. Kastelengden defineres som den lengste avstanden fra fortregningsventilen til punktet der maksimalhastigheten har sunket til under 0,2 m/s. Den kan uttrykkes som

$$l_n = 0,005 \cdot q_s \cdot K_{Dr} \quad (2)$$

der  $q_s$  er volumstrømmen for tilluften [l/s] og  $K_{Dr}$  er en karakteristisk parameter som må måles for hver type fortregningsventil [4].

For moderne fortregningsventiler kan  $K_{Dr}$  være ned mot 6-7, mens for mer umoderne ventiler kan verdien, og følgelig kastelengden, være bortimot det dobbelte. Forskjellen ligger i retningen og turbulensnivået til luften som strømmer ut av fortregningsventilen. Høyt turbulensnivå medfører

at tilluften raskt taper bevegelsesmengde og sterk innblanding av romluft. Dermed reduseres maksimalhastigheten og kastelengden.

Dersom en har en rekke med tilluftsventiler, vil fortregningsluftstrømmene smelte sammen og fordele seg som en bred elv over hele rommets bredde. I dette tilfellet vil ikke maksimalhastigheten reduseres med avstanden fra fortregningsventilene. Dermed får ikke kastelengden noen mening. Maksimalhastigheten kan imidlertid uttrykkes som [4]

$$U_m = K_p \cdot (g \cdot \beta \cdot (T_r - T_s) \cdot q_{s,l})^{1/3} \quad (3)$$

I dette tilfellet er  $q_{s,l}$  volumstrømmen per lengdeenhet =  $q_s$ /veggens bredde.  $K_p$  vil påvirkes noe av typen fortregningsventil, Arkimedes tall og volumstrøm. Basert på enkelte antagelser, er likevel  $K_p$  beregnet analytisk til 1,5 [4].

### Dimensjonering

Det antas at lufttilførselen skjer via tre aggregater, hvorav to er plassert i den åpne delen. Luften tilføres fra hvert av disse aggregatene via en veggintegrrert fortregningsventiler. Målet er å unngå at nærsone strekker seg inn i oppholdssonen. I henhold til plantegningene regnes det at sonen for permanent opphold (stillesittende arbeid) starter ca. 2 meter nord for toalett-veggen, se Figur 4. Maksimal kastelengde settes derfor til to meter.

To luftmengder legges til grunn i dimensjoneringen:

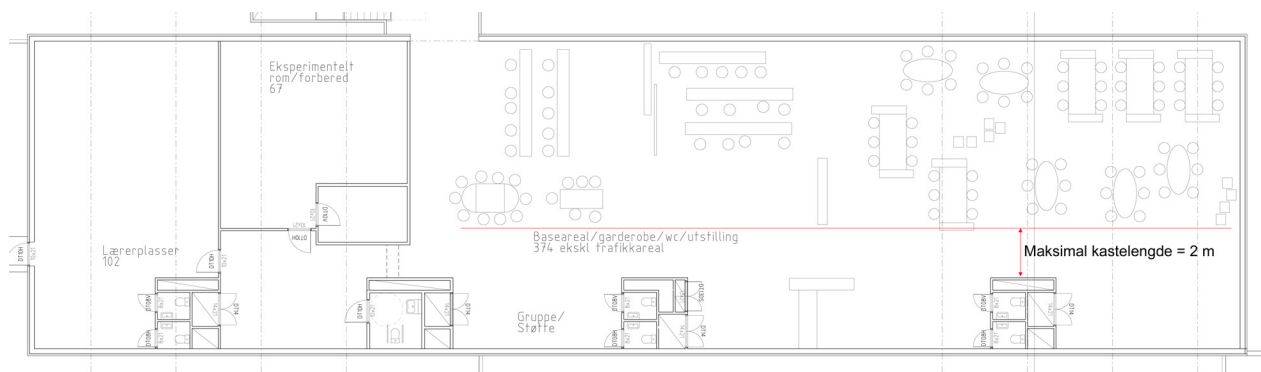
1. SINTEFs alternativ, der hvert aggregat regnes å levere 1200 m<sup>3</sup>/h (333 l/s) ved maks belastning.
2. Interconsults alternativ, der hvert aggregat regnes å levere 2160 m<sup>3</sup>/h (600 l/s) ved maks belastning.

For å unngå ustabil strømning, er det viktig at luften ikke bare tilføres gjennom *en* bred perforert plate. Ustabiliteten forårsakes typisk av sug effekt som oppstår mellom luftstrålene ut fra hullene i platen, og som medfører tilbakestrømning. Tilbakestrømning medfører at hastigheten øker i sonene der en ikke har tilbakestrømning på grunn av at luft blir presset inn i disse.

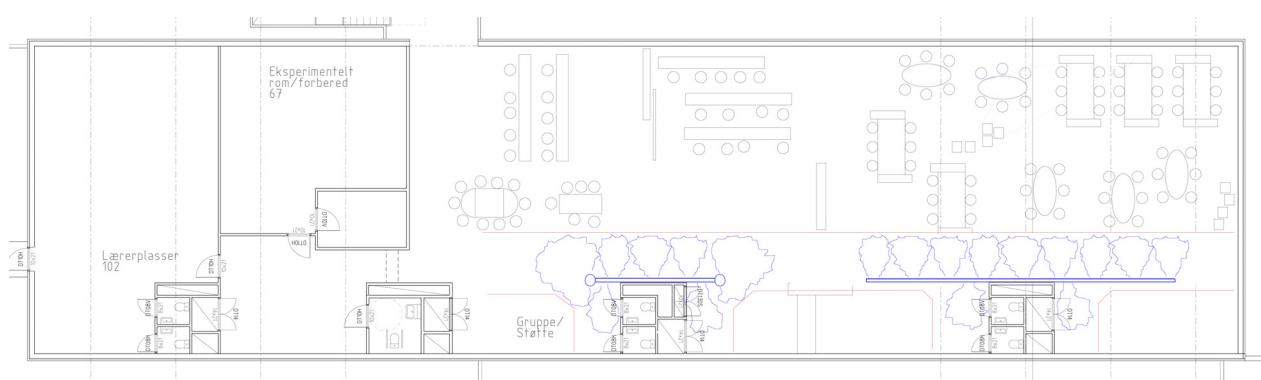
For å unngå tilbakestrømning monterer en derfor gjerne en rekke med fortregningsventiler ved siden av hverandre. Avstanden mellom ventilene bør beregnes ut fra deres egenskaper med det formål at utstrømningsprofilene vokser sammen og skaper jevn lufttilførsel. Løsningen for toalettseksjonen til høyre i Figur 5 illustrerer hvordan nærsone til en serie slike fortregningsventiler bør være.

Antar vi at luftstrålene vokser sammen på en ideell måte slik at luftstrømmen er helt jevn inn i oppholdssonen, kan den nødvendige bredden på veggen med fortregningsventiler beregnes med utgangspunkt i ligning (3). Insatt  $q_{s,l} = Q/l$ , der Q er den totale volumstrømmen ut fra veggen, fås:

$$l = Q \cdot \left( \frac{K_p}{U_m} \right)^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_r - T_s) \quad (4)$$



**Figur 4** Sonen for permanent opphold (stillesittende arbeid) starter ca. 2 meter nord for toalett-veggen. Dette utgjør derfor dimensjoneringskriteriet for fortregningsventilenes nærsone.



**Figur 5** Illustrasjon av nærsonen for fortregningsventiler i veggen nord for toalett-seksjonen med og uten avrundede (radielle) tilluftsdon for veggens ender.

### Uten bruk av radielle tilluftsdon ved endene av veggen

Den første beregningen tar for seg tilfellet der en ikke benytter avrundede tilluftsdon (fortregningsventiler) på endeveggen slik illustrert for toalett-seksjonen til høyre i Figur 5. En del av volumstrømmen kan likevel rettes motsatt vei, dvs mot inngangspartiet til toalettene. Vi gjør følgende antagelser:

- 80 % av aggregatets volumstrøm strømmer ut av nordveggen.
- $T_r - T_s = 3K$
- $T_r = 295 K$
- $K_p = 1,5$
- $U_m = 0,2$
- $g = 9,81 m/s^2$

I praksis er det som nevnt vanskelig å få til helt jevn luftfordeling (ideell sammensmelting av luftstrålene fra fortregningsventilene). Den radielle effekten vil kunne kompensere noe for dette. Likevel ignorerer vi i første omgang den radielle effekten, og legger til 20 % sikkerhetsmargin for å ta hensyn til ujevnheter i hastighetsprofilen.

Dette gir følgende veggbredde:

1. Med SINTEFS luftmengder ( $0,333 m^3/s$ ):  $l = 13,5 m$
2. Med Interconsults luftmengder ( $0,600 m^3/s$ ):  $= 24,2 m$

### **Ved bruk av radielle tilluftsdon ved endene av veggen**

Den andre beregningen tar utgangspunkt i at en benytter radielle (buede) tilluftsdon på endene av veggene slik illustrert for toalett-seksjonen til venstre i Figur 5. Disse tilluftsdonene må muligens blendes noe dersom de kommer nært oppholdssonen mot sør og/eller vendes svakt mot nord for å oppnå den ønskede utstrømning. I tillegg er det viktig å sørge for at trykkfallet stemmer med de øvrige ventilene slik at en får riktig volumstrøm ut av hver fortregningsventil.

Donene kan i samarbeid med leverandør integreres i veggen, eller en kan benytte eksisterende løsninger. Spesifikasjonen for eksisterende don indikerer at en lett kan oppnå luftmengder på opp mot 6-700 m<sup>3</sup>/h.

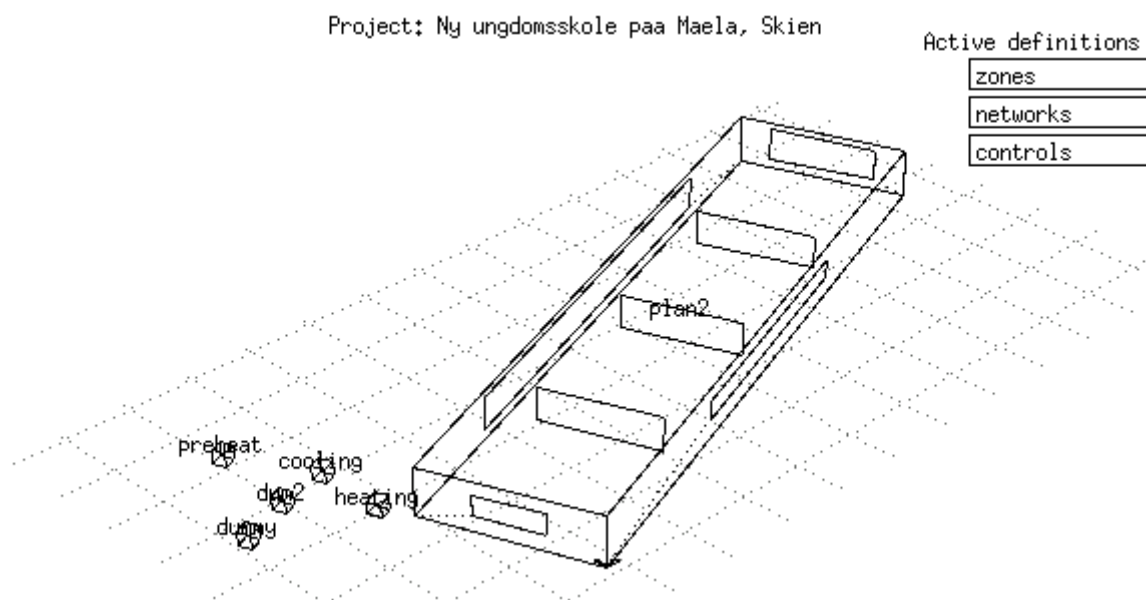
For å ta høyde for eventuell blanding eller annen spesialtilpasning av løsningen, antar vi at hvert don leverer 500 m<sup>3</sup>/h. Det vil si at de veggintegreerte ventilene blir avlastet med 1000 m<sup>3</sup>/h (0,278 m<sup>3</sup>/s). Av det resterende antar vi som over at 80 % strømmer ut av ventiler på nordsiden dersom en bruker Interconsults luftmengder, mens 100 % strømmer ut på nordsiden dersom en bruker SINTEFs luftmengder. Dette da veggen likevel blir så kort at ventiler på veggens sørside neppe er hensiktsmessig med SINTEFs luftmengder.

Med de øvrige forutsetninger som over, gir ligning (4) da følgende veggbredde:

1. Med SINTEFS luftmengder (0,333 m<sup>3</sup>/s):  $l = 2,8$  m
2. Med Interconsults luftmengder (0,600 m<sup>3</sup>/s):  $l = 13,0$  m

## 5. Simuleringer under dimensjonerende sommerforhold

For å kunne analysere komforten under dimensjonerende sommerforhold er det utviklet en generell simuleringsmodell for plan 2 i undervisningsfløyene. Modellen er en videreutvikling av en modell presentert i SINTEF rapport STF22 A04512 [1]. Det er valgt å bruke ESP-r [5], som er et avanserte og anerkjente beregningsverktøy for detaljerte dynamiske simuleringer av varme og massetransport i bygninger.



**Figur 6** En variant av beregningsmodellen slik den ser ut i ESP-r's grafiske brukergrensesnitt.

### 5.1 Betingelser for energisimuleringene

Figur 6 viser en illustrasjon av beregningsmodellen slik den ser ut i ESP-r's grafiske brukergrensesnitt. Grunnflaten er 51,2 x 12,8 m (655 m<sup>2</sup>) og takhøyden satt til 3,8 m. Modellen er rotert i henhold til plantegningene slik at nordfasaden er vinklet 20<sup>0</sup> mot vest. Det er antatt at 40 % av arealet til nord- og østfasaden består av vindu, mens tallet er 15 % for sør- og vestfasaden.

#### 5.1.1 Konstruksjonsdata

Vinduer i nord- og østfasaden:

Pilkington Optitherm SN 6-15-SN6,4L (to lag) med argon fylling.

Angitt U-verdi senter: 1,1. Antatt gjennomsnittlig U-verdi: 1,4.

Optiske egenskaper slik angitt i Figur 7 (venstre).

Vinduer i sør og vestfasaden:

Pilkington Suncool HP-Brilliant 66 6Hbl-15-6 (to lag) med argon fylling.

Angitt U-verdi senter: 1,0. Antatt gjennomsnittlig U-verdi: 1,4.

Vegger: Lette vegger isolert med 20 cm glava. U-verdi: 0,22

Yttertak: Lett tak isolert med 25 cm glava. U-verdi: 0,15

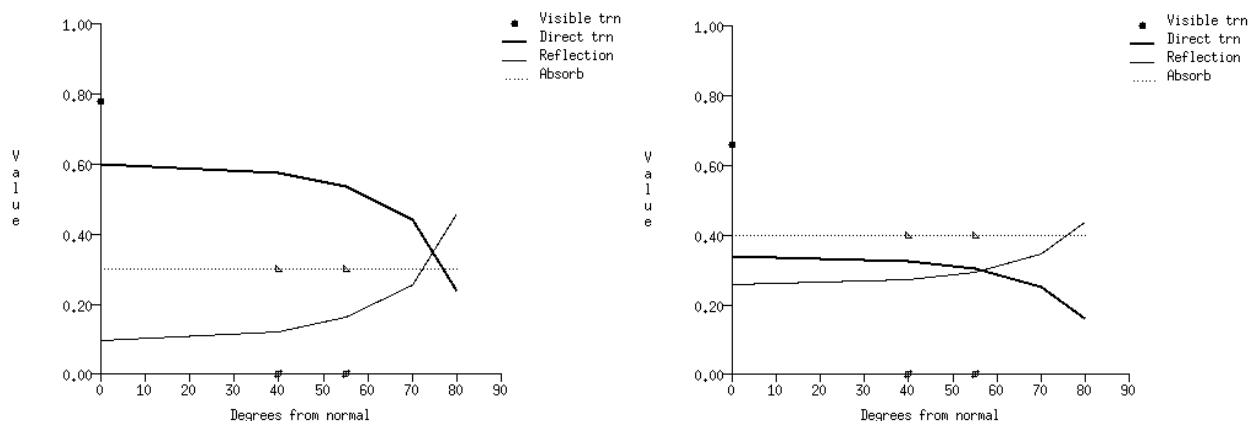
Gulv mot etasjen under: 12 cm lettbetong med PVC belegg.

Indre termisk masse: For å ta hensyn til indre termisk masse i form av møbler, bøker, innervegger o.l. er en del av simuleringene gjort med tre innervegger i betong med 10 cm tykkelse og dimensjoner 2,5x8,8 meter. Disse gir en indre termisk masse på ca 9000 kg, med en eksponert overflate på 132 m<sup>2</sup>.

NB: Eventuelle kuldebroer og utettheter i konstruksjonen er neglisjert i beregningene.

Type: 6-15-SN6\_4L description: Pilk Ophitern SN

Type: 6Hbl-15-6n description: Pilk-HP Brilliant 66 tolags



**Figur 7** Optiske egenskaper til vinduene i nord- og østfasaden (venstre) og sør og vestfasaden (høyre).

### 5.1.2 Koeffisienter - vindusåpning

Trykkstapskoeffisienten for vindusåpningen er satt til 0,65.

### 5.1.3 Vindtrykkskoeffisienter og antagelser relatert til vinduslufting

Over eller undertrykket forårsaket av vind på fasadene beregnes ut fra formelen

$$\Delta p = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \quad (5)$$

der  $C_p$  er vindtrykkskoeffisienten for den aktuelle vindretning,  $\rho$  er lufttettheten og  $v$  er vindhastigheten. 16 vindtrykkskoeffisienter ( $C_p$ -verdier) benyttes for å beregne vindtrykket på fasadene ved forskjellige vindretninger:

0,7 0,525 0,35 -0,075 -0,5 -0,45 -0,4 -0,3 -0,2 -0,3 -0,4 -0,45 -0,5 -0,075 0,35 0,525

Den første gjelder for sektoren med vindretning  $\pm 11,25^0$  direkte mot fasaden, og neste gjelder for sektoren  $22,5^0$  med klokken i forhold til denne, osv. Merk at disse koeffisientene tar utgangspunkt i vindforholdene rundt bygg med typisk kvadratisk form. Det er derfor usikkert hvor godt de stemmer for fasadene til Mæla skole. Dessuten er det ikke tatt hensyn til at vindtrykket vil variere på de forskjellige delene av fasaden, slik at enkelte vindusåpninger vil bli utsatt for større vindtrykk enn andre på samme fasade. Virkningen av turbulens og termiske drivkrefter er også neglisjert i beregningene. Dette gjør at det knytter seg stor usikkerhet til den beregnede luftstrømningen gjennom vinduene. Nøyaktigheten er likevel tilstrekkelig til å gi et godt nok grunnlag for å vurdere den totale effekten av vindusluftingen, og hvor stort åpningsareal som trengs på de forskjellige fasadene.

### 5.1.4 Grensebetingelser

Det antas at luften i etasjen under har samme temperatur.

### 5.1.5 Klimadata

I mangel på kvalitetssikrede klimadata fra Skien er det brukt et såkalt ”test reference year” (TRY) fra Fornebu, Oslo. Disse dataene representerer et klimamessig gjennomsnittsår ved Fornebu både når det gjelder variasjoner og gjennomsnittsverdier. Årsmiddeltemperaturen er  $6,6^0\text{C}$ .

Kalenderåret for simuleringene (2007) er valgt slik at de varmeste dagene i størst mulig grad sammenfaller med vanlige ukedager dvs. når skolen er i full drift.

### 5.1.6 Tidssteg

Tidssteget i simuleringene settes til 6 min (10 tidssteg per time).

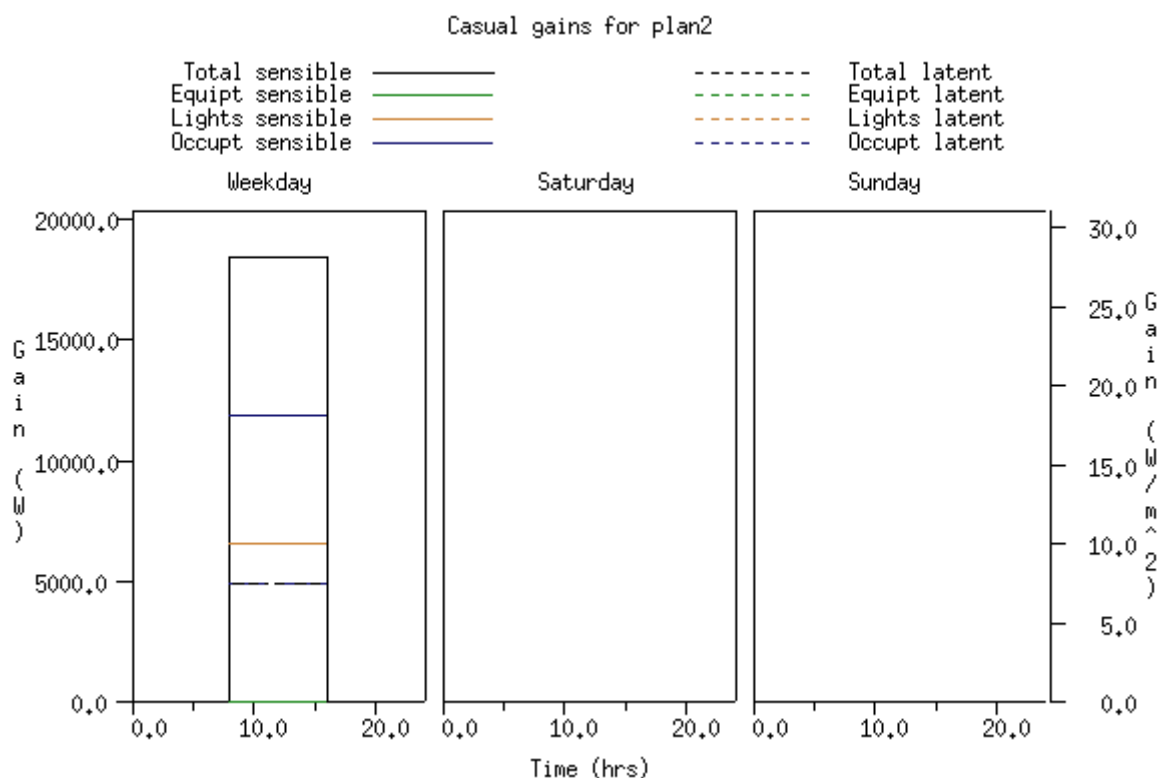
### 5.1.7 Internlaster

For å ta utgangspunkt i den verst tenkelige situasjon, antas maksimal personbelastning hele dagen igjennom, og at den elektriske belysningen samtidig er på. Dette kan være aktuelt dersom etasjen for eksempel brukes til eksamenslokale under en 8 timers eksamen. Internlastene er beregnet som følger:

Personer: Det er antatt at det oppholder seg 165 personer i etasjen fra kl. 0800-1600, og at hver av disse avgir 30 W latent varme, 45 W konvektiv varme og 27 W i form av stråling (totalt 102 W/person).

Belysning: 10W/m<sup>2</sup> fra 0800 til 1600.

Det totale internlast-profilen for etasjen er illustrert i Figur 8.



**Figur 8 Internlastprofil [W] for etasjen (fra ESP-r's grafiske brukergrensesnitt).**

### 5.1.8 Luftmengder for det mekaniske anlegget

Med utgangspunkt i SINTEFs og Interconsults vurderinger, benyttes er to alternative dimensjonerende (maksimale) luftmengder benyttet i beregningene.

#### 1. SINTEFs luftmengder

$$\dot{m}_{\max} = 1,293 \text{ kg/s} = 1,00 \text{ Nm}^3/\text{s} = 3600 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{\min} = 0,847 \text{ kg/s} = 0,65 \text{ Nm}^3/\text{s} = 2356 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

der Nm<sup>3</sup> = Normalkubikkmeterer definert som luftvolum ved 0 °C

## 2. Interconsults luftmengder

$$\dot{m}_{\max} = 2,329 \text{ kg/s} = 1,80 \text{ Nm}^3/\text{s} = 6480 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

$$\dot{m}_{\min} = 0,847 \text{ kg/s} = 0,65 \text{ Nm}^3/\text{s} = 2356 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

### 5.1.9 Styling av oppvarming og ventilasjon

Når det gjelder oppvarming og ventilasjon, skiller det mellom to ulike driftsfaser:

#### 1. Ukedager dagtid (0800-1600):

Setpunkt for oppvarming: 20 °C

Tilluftstemperaturen og ventilasjonsluftmengden levert av det mekaniske systemet styres etter *utendørstemperaturen* på følgende måte:

$T_{\text{ute}} > 19^{\circ}\text{C}$ :  $T_{\text{tilluft}} = T_{\text{ute}}$ , og  $\dot{m} = \dot{m}_{\max}$  der  $\dot{m}_{\max}$  er anleggets dimensjonerende (maksimale) luftmengde.

$T_{\text{ute}} < 19^{\circ}\text{C}$ :  $T_{\text{tilluft}} = 19^{\circ}\text{C}$  og  $\dot{m} = \dot{m}_{\min}$  der  $\dot{m}_{\min}$  er den beregnede minimumsluftmengden for håndtering av emisjoner fra bygningsmaterialer e.l.

#### 2. Helg samt utenom driftstid (1600-0800) ukedager:

Setpunkt for oppvarming: 17 °C

Tilluftstemperaturen og ventilasjonsluftmengden levert av det mekaniske systemet styres da etter *romtemperaturen* på følgende måte:

$T_{\text{rom}} > 18^{\circ}\text{C}$ :  $T_{\text{tilluft}} = T_{\text{ute}}$ , og  $\dot{m} = \dot{m}_{\max}$  der  $\dot{m}_{\max}$  er anleggets dimensjonerende (maksimale) luftmengde.

$T_{\text{rom}} < 18^{\circ}\text{C}$ :  $T_{\text{tilluft}} = 19^{\circ}\text{C}$  og  $\dot{m} = \dot{m}_{\min}$  der  $\dot{m}_{\min}$  er den beregnede minimumsluftmengden for håndtering av emisjoner fra bygningsmaterialer e.l.

Denne styringsstrategien innebærer at en benytter det mekaniske anlegget til å ventilere ut overskuddsvarme og kjøle ned bygningsmassen i helgene og om natten på ukedagene inntil romtemperaturen når 18 °C. Når temperaturen når 18 °C går en over til minimumsluftmengder med 18 °C tilluftstemperatur.

### 5.1.10 Termisk stratifisering

Når vinduene er stengt og en benytter mekanisk fortregningsventilasjon, vil temperaturgradienten i lokalet være betydelig. Ved maksimal personbelastning på en varm dag kan en gjerne ha opp mot 4-5 °C temperaturforskjell fra gulv til tak for de aktuelle lokalene. Det at avtrekket er plassert oppunder tak, betyr da at temperaturen til avtrekksluften typisk vil være 1-2 °C høyere enn gjennomsnittlig romtemperatur.

Likevel har vi for enkelhets skyld valgt å gjennomføre beregningene med den antagelsen at en har full omrøringsventilasjon i lokalene. Dette vil medføre at de beregnede gjennomsnittlige romtemperaturene blir noe høyere enn det en vil se i virkeligheten dersom den termiske stratifiseringen er sterk. Dette fordi en ikke tar hensyn til hvordan det at avtrekksluften er varmere enn romluften påvirker energibalansen. Likevel må en forvente at uteluften blir oppvarmet noe av vifter/aggreat, slik at tilluftstemperaturen er noe høyere enn utetemperaturen, noe som virker i motsatt retning.

Når vinduene åpnes, vil en få større grad av omrøring dess mer luft som strømmer inn gjennom disse. Temperaturforskjellene blir da mindre i lokalet, og antagelsen om full omrøring mer riktig.



En bør likevel være klar over at temperaturen i oppholdssonen i mange tilfeller vil være lavere enn den gjennomsnittlige romtemperaturen som er vist i resultatene. Dette gjelder spesielt når en har liten grad av omrøring i lokalene.

## 5.2 Simuleringer for dimensjonerende sommerforhold

Inspeksjon av klimadata-filen viser at skoleårets varmeste og solrikeste dag er 20. juni, med klart vær og en maksimal utendørstemperatur på 26,5 °C. Også dagene forut for denne var varme, se Figur 9. Disse dagene benyttes derfor som utgangspunkt for dimensjonerende sommerforhold. Det er forøvrig tatt utgangspunkt i kalenderåret 2007 for simuleringene ettersom de varmeste dagene fra klimadata-filen sammenfaller med ukedager med full drift på skolen dette året.

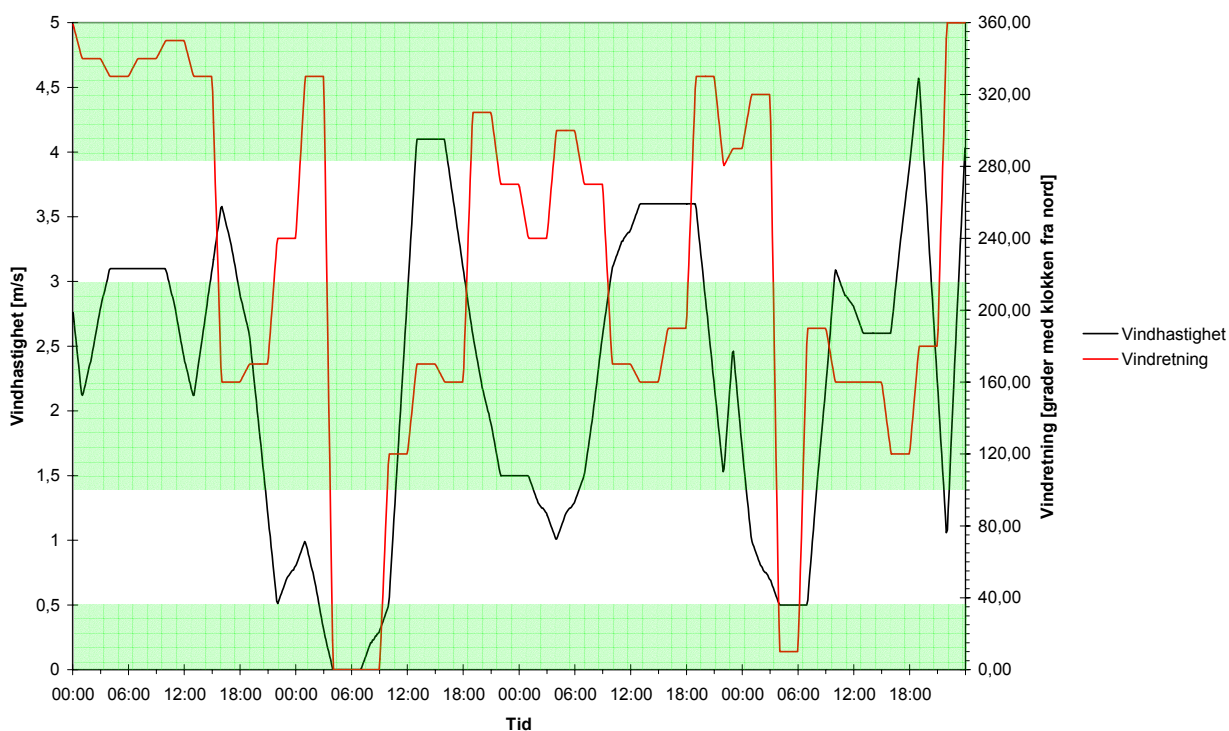
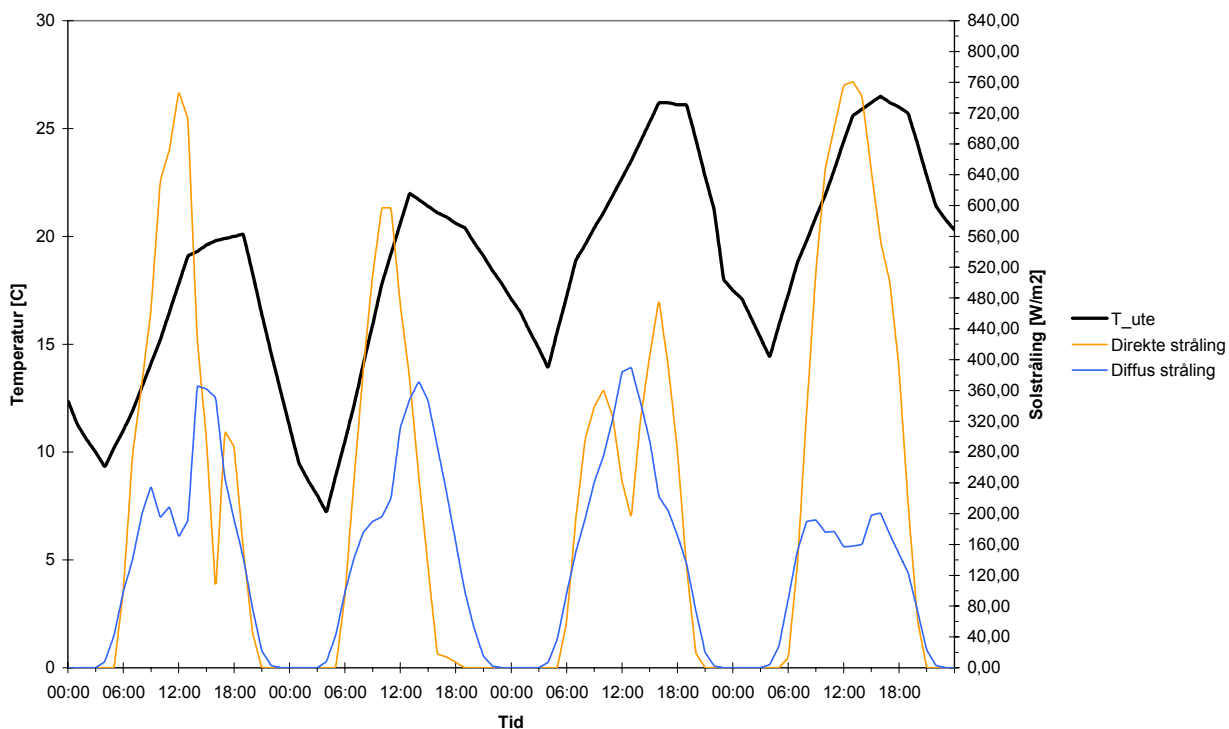
### 5.2.1 Lysåpning i nord- og sørfasaden

Som et utgangspunkt beregnes gjennomsnittlig maksimaltemperatur i lokalet ved varierende vindusåpning (lysåpning) i nord- og sørfasaden. Det er antatt at en utvendig reflekterende duk senkes ned over vinduene i sør- og vestfasaden når strålingsintensiteten på den respektive fasaden overstiger 250 W/m<sup>2</sup>, men at dette ikke reduserer lysåpningen for luftvindue. Videre er det antatt at de mekaniske aggregatene er dimensjonert etter SINTEFs anbefalinger, se avsnitt 5.1.8 over.

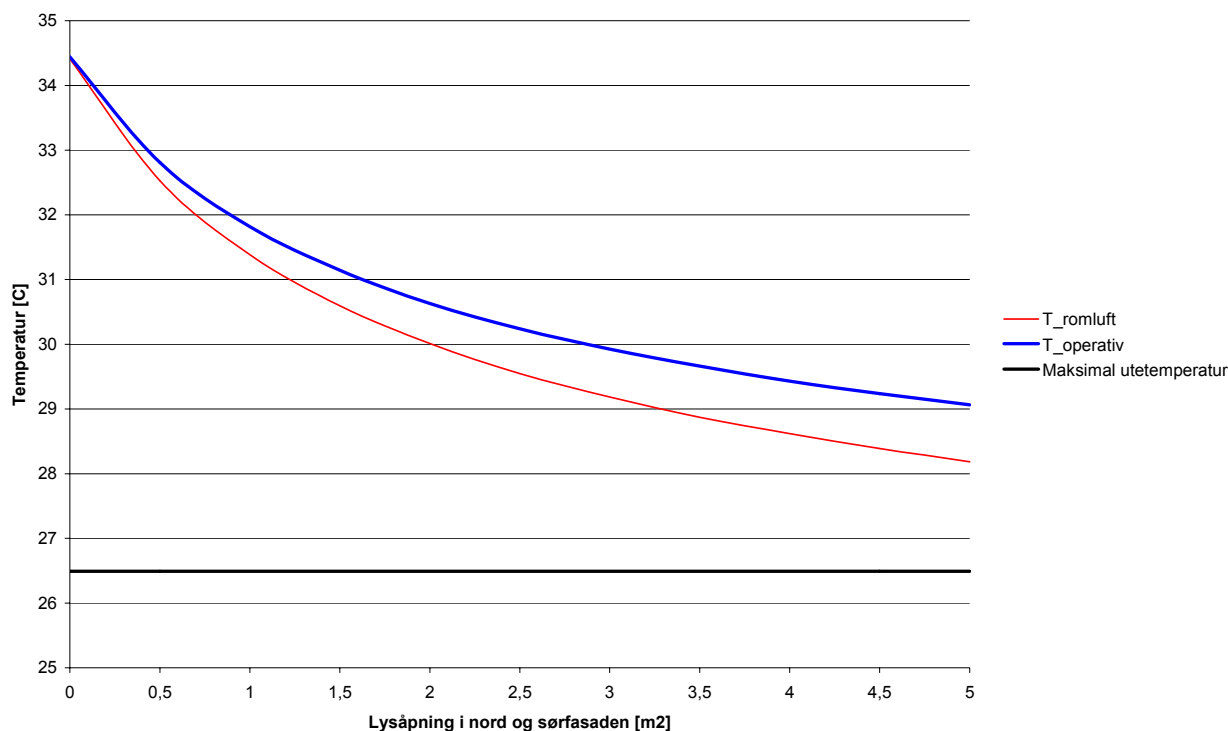
Lysåpningen i hver av fasadene økes samtidig fra 0 til 5 meter. Den resulterende gjennomtrekken beregnes med utgangspunkt i beregnet overtrykk/undertrykk på den aktuelle fasaden med klimadataene angitt i Figur 9. Termiske drivkrefter og turbulens er neglisjert i beregningene.

Figur 10 viser gjennomsnittlig maksimaltemperatur i lokalet på den varmeste dagen (20. juni) plottet mot lysåpningsarealet i fasadene. Beregningsforutsetningene samsvarer med Case 2 beskrevet i avsnitt 5.2.2 under, dvs. at en har solavskjerming og mekanisk ventilasjon med SINTEFs luftmengder, og neglisjerer termisk masse i lokalene. En ser at gjennomluftingen har stor virkning på romtemperaturen. Effekten øker med økende lysåpning, og den relative økningen er sterkest når lysåpningen er liten. En økning fra 0-2 m<sup>2</sup> lysåpning medfører en reduksjon i romluftstemperaturen på 4,4 °C. Dersom en øker åpningsarealet videre fra 2-4 m<sup>2</sup> oppnås en ytterligere reduksjon på kun 1,4 °C.

Hva en skal velge som dimensjoneringskriterium er likevel en vurderingssak. Vi ser at 2 m<sup>2</sup> lysåpning innebærer en lufttemperatur i rommet som er 3,5 °C over utetemperaturen. Tatt i betraktning at dette er den verste dagen i året, og at internlast er satt etter de verst tenkelige forhold, mener vi dette er akseptabelt. En økning ut over 2m<sup>2</sup> ser vi har en relativt begrenset effekt. En må dessuten kunne regne med at på så varme dager vil vanlige vinduer som er tilgjengelig for brukerne åpnes manuelt, og dette vil bidra ytterligere til utluftingen.



**Figur 9 Klimadata for perioden 17-20 juni.**



**Figur 10 Gjennomsnittlig maksimal operativ (opplevd) og lufttemperatur i plan 2 i undervisningsfløyene den 20. juni med variabel vindusåpning i nord- og sørfasaden.**

### 5.2.2 Virkningen av lufting kontra andre komfort-tiltak

For å sammenligne virkningen av lufting med andre tiltak for å bedre termisk komfort på varme dager, er det gjort flere simuleringer for perioden 17.-20 juni. Utgangspunktet for simuleringene er i tråd med de betingelsene beskrevet i avsnitt 5.1 over, med følgende variasjoner:

*Case 1:* Mekanisk ventilasjon med SINTEFs luftmengder

*Case 2:* Mekanisk ventilasjon med SINTEFs luftmengder og utvendig solavskjerming av vinduer i sør og vestfasaden når strålingen på fasaden overstiger 250 W/m<sup>2</sup>.

*Case 3:* Som Case 2, men med 2 m<sup>2</sup> vindusåpning i nord og sørfasaden som gir gjennomlufting av lokalene dersom vindtrykket er forskjellig på fasadene.

*Case 4:* Samme som Case 3, men med ca. 9000 kg indre termisk masse, se avsnitt 5.1.1.

*Case 5:* Samme som Case 4, men en antar at når temperaturen stiger over 22 °C vil en begynne å åpne vanlige vinduer i fasadene. Dette åpningsarealet øker lineært med romtemperaturen til 3m<sup>2</sup> ved 24 °C.

*Case 6:* Samme som Case 5, men med elektrisk belysning avslått inne.

*Case 7:* Også samme forutsetninger som Case 5, men med mekanisk anlegg dimensjonert etter Interconsults vurderinger.

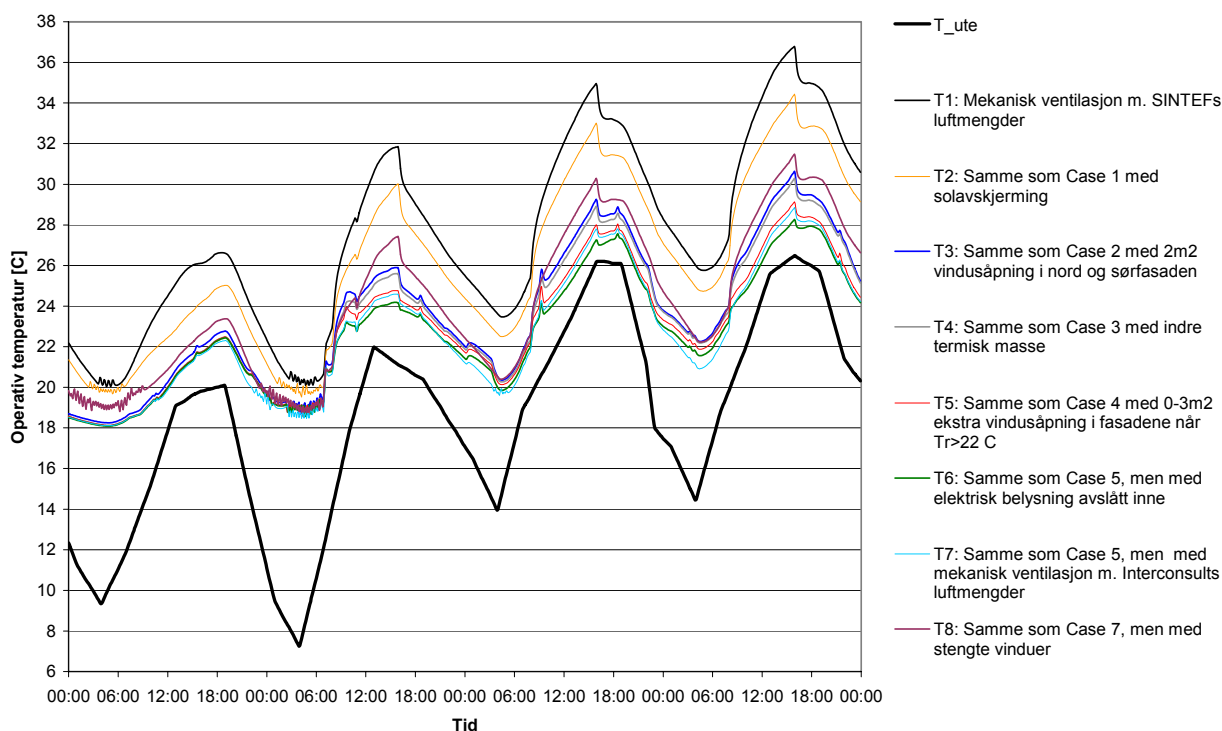
*Case 8:* Samme som Case 7, men med alle vinduer stengt.

Figur 11 viser den gjennomsnittlige operative (opplevde) temperaturen i lokalene for de forskjellige casene. En ser klart at solavskjerming og vinduslufting peker seg ut som de viktigste tiltakene for å forbedre den termiske komforten i lokalene.

Figur 12 viser luftmengdene levert av det mekaniske anlegget i simuleringsperioden for henholdsvis Case 4 (med aggregater dimensjonert med utgangspunkt i SINTEFs vurderinger) og Case 6 (med aggregater dimensjonert med utgangspunkt i Interconsults vurderinger).

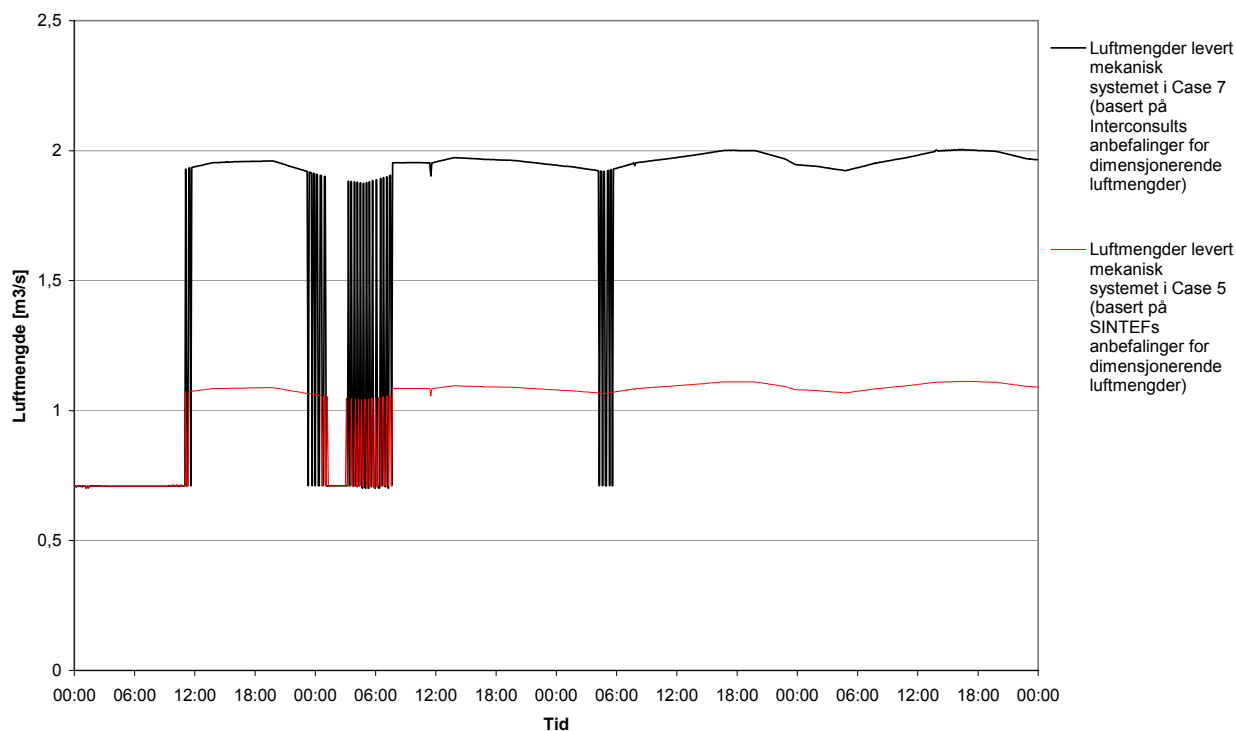
De samme kurvene er plottet i Figur 13, som også viser den absolutte innstrømmende luftmengden gjennom vinduene for henholdsvis Case 3 og 4, som kun tar hensyn til bruk av luftvinduer, og Case 5, der det antas at også vanlige vinduer åpnes når det er varmt i lokalet. Figuren viser at luftmengdene en oppnår naturlig jevnt over er betydelig større enn de en oppnår mekanisk, selv om en legger Interconsults vurderinger til grunn i dimensjonering av ventilasjonsaggregat. Dette forklarer hvorfor naturlig lufting er en mer virkningsfull strategi for de aktuelle dagene enn å forsøke å bedre de termiske forholdene gjennom å gå opp i aggregatstørrelse. Kurvene viser at når en lufter både gjennom luftvinduer og vanlige vinduer (Case 5), bidrar den mekaniske ventilasjonen i liten grad til utluftingen. Dette betyr at en kan stanse det mekaniske anlegget når lufting foregår uten at dette påvirker de termiske forholdene i særlig grad.

Virkingen av vindusluftingen vil imidlertid avhenge direkte av vinden. Figur 9 (nederst) viser vinddataene som brukes i simuleringene for den aktuelle perioden. Dersom kurven for vindretning (rødt) er inne i et av de grønne feltene, betyr det at vinden gir overtrykk på enten sør- eller nordfasaden, dvs. at forholdene ligger godt til rette gjennomlufting via vindusåpninger i disse fasadene. En ser at både vindhastighet og vindretning dagtid er relativt gunstig for de aktuelle dagene. Det kan derfor være at disse dagene ikke er de verste for den aktuelle løsningen. Med utgangspunkt i Case 4, har vi derfor gjort simuleringer for hele perioden fra 2. mai til 16. juni, samt for høstperioden fra 18. august til midten av september.

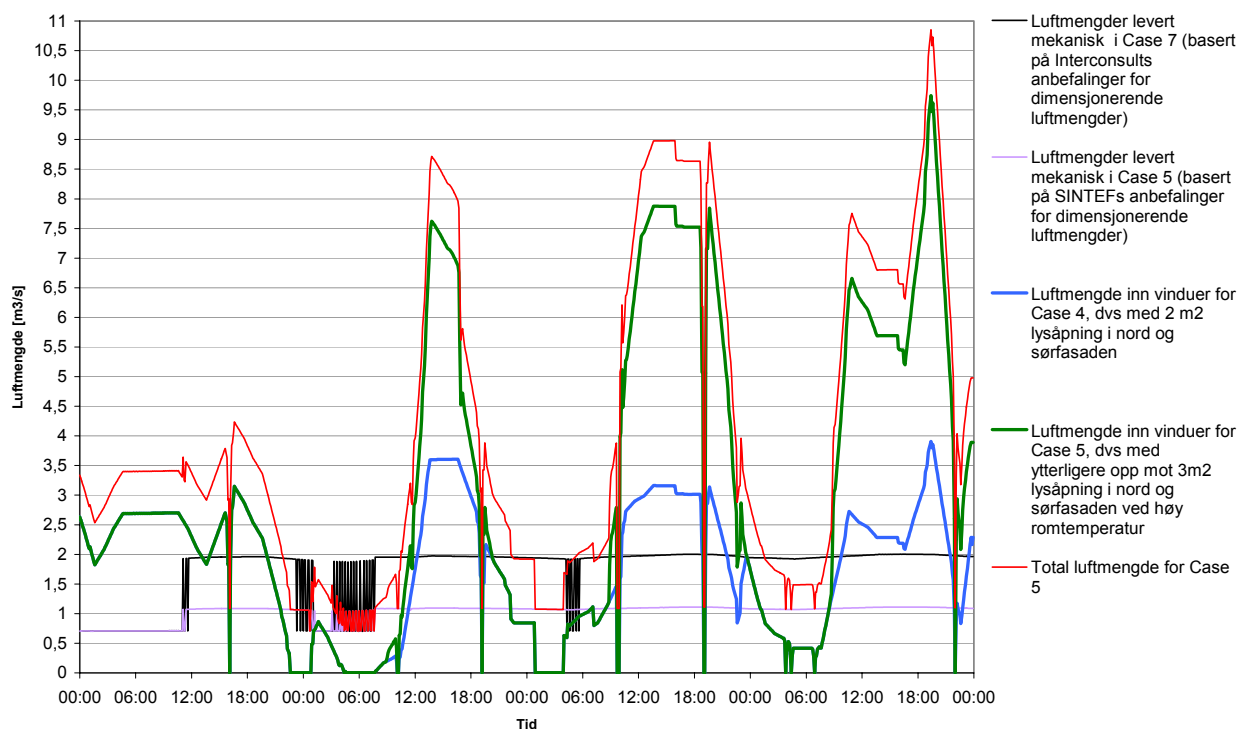


**Figur 11 Simuleringer av operativ temperatur for perioden søndag 17. til onsdag 20. juni, 2007.**

Merk at effekten av de forskjellige tiltakene er avhengig av hverandre. Bla. vil virkningen av solavskjerming være mindre enn Figur 11 gir inntrykk av dersom en tar utgangspunkt i et av Casene med naturlig ventilasjon (f.eks. Case 5 med eller uten solavskjerming).



**Figur 12** Luftmender levert av det mekaniske anlegget dersom dimensjonert etter SINTEFs vurderinger (rødt) eller Interconsults vurderinger (sort), 17.-20. juni, 2007.

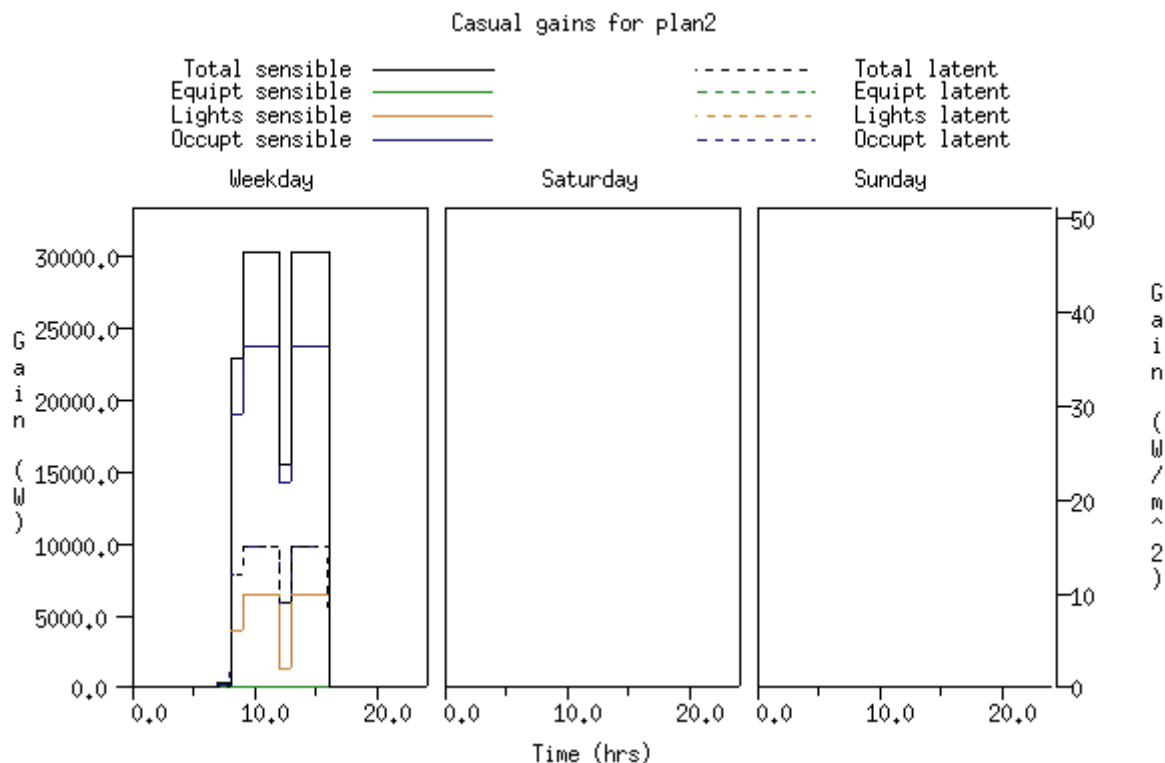


**Figur 13** Luftmengder levert mekanisk og via vinduer, 17.-20. juni, 2007.

### Simuleringer for vår/høst perioden

For å få et bedre grunnlag til å vurdere strategien med kryssløfting beskrevet i Case 4 over, har vi gjort simuleringer for hele perioden fra 2. mai til 16. juni 2002. Det er tatt utgangspunkt i en mer normal skoledag der en tar hensyn til at personbelastningen varierer i løpet av dagen.

Internlastprofilen som ble benyttet for de varmeste dagene i juni, se Figur 8, er derfor endret til det som er illustrert i Figur 14 under.

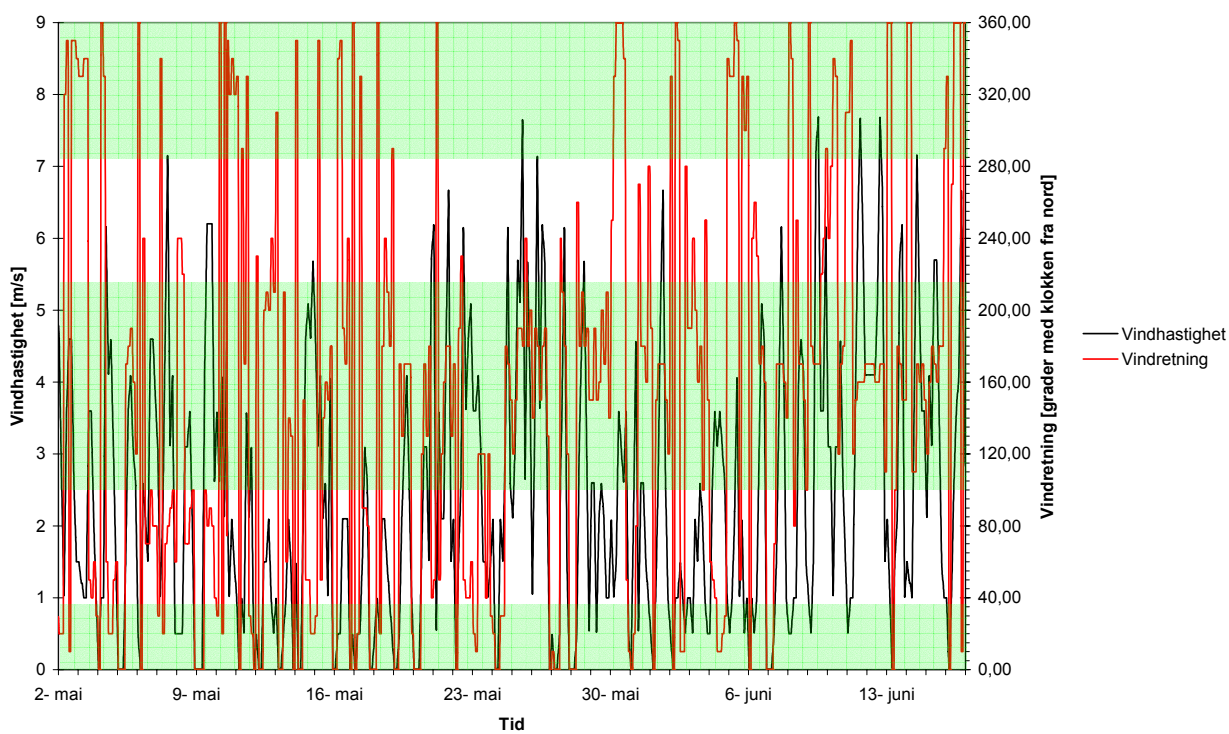
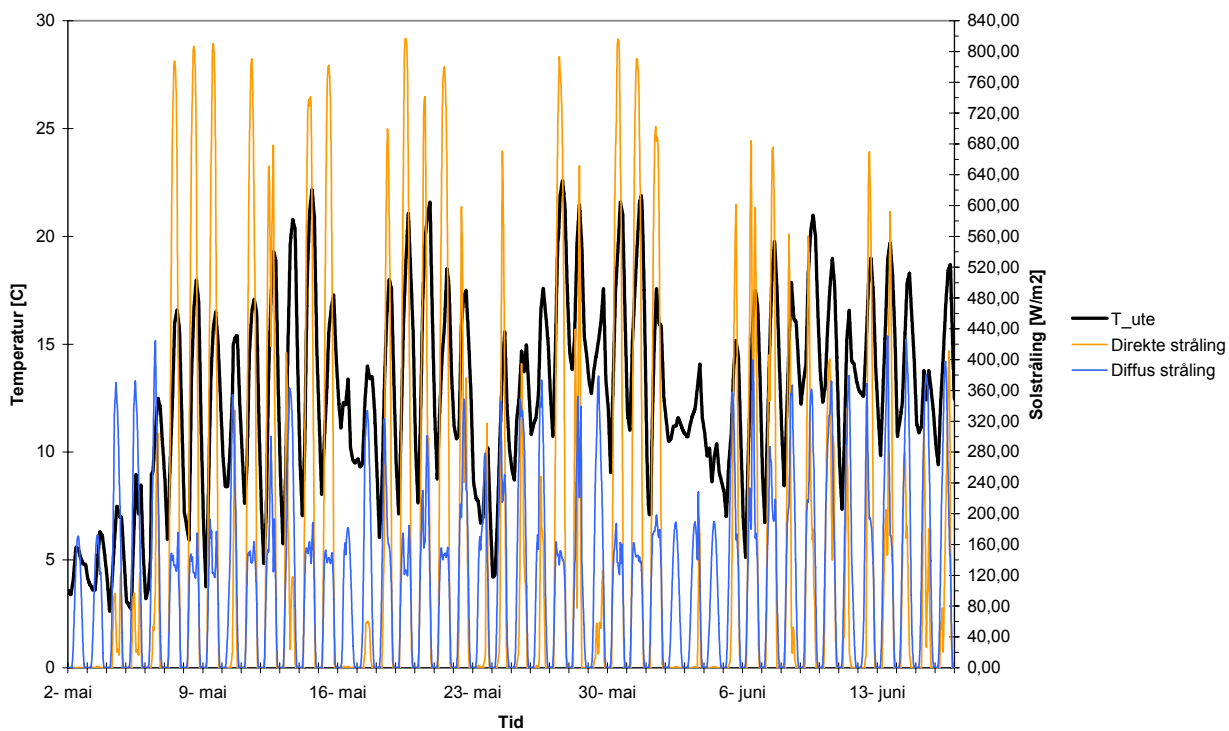


**Figur 14 Internlastprofil [W] for etasjen for vår/høstsimuleringene (fra ESP-r's grafiske brukergrensesnitt).**

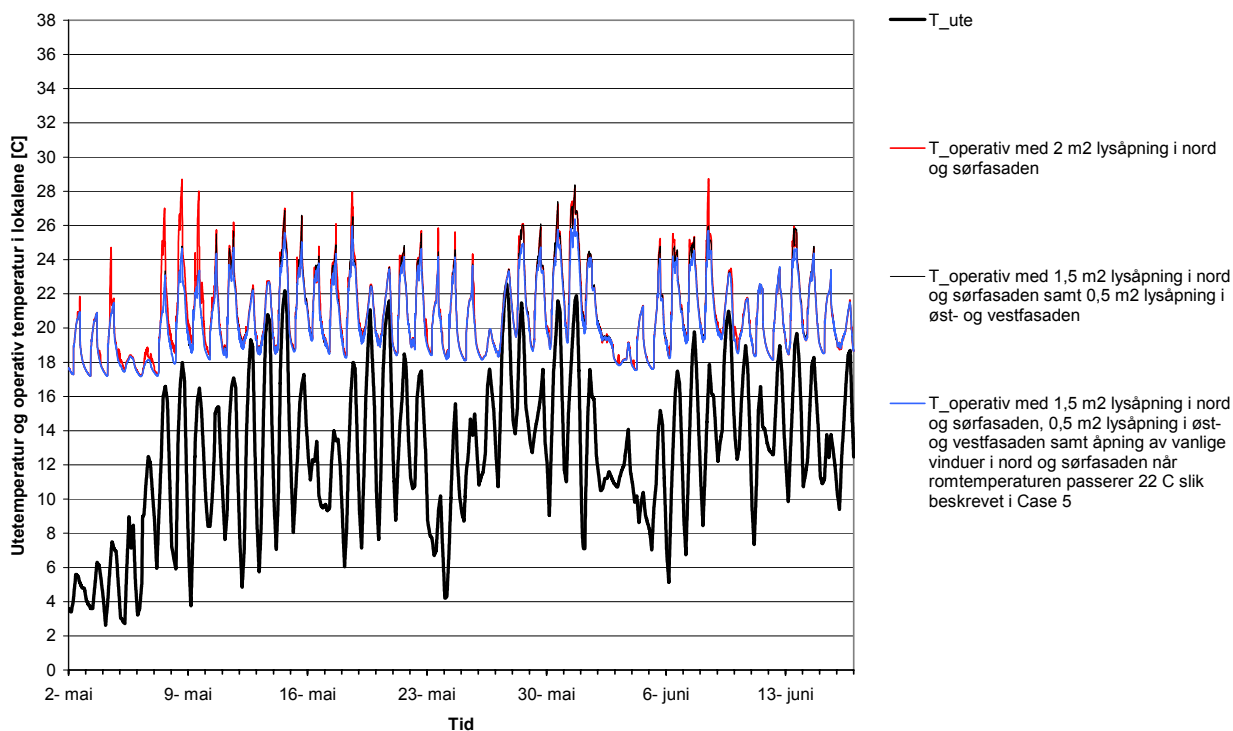
Figur 15 viser klimadataene for perioden, og den røde kurven i Figur 16 viser den operative temperaturen i lokalene med den valgte strategien for vindusløfting. Vi ser at temperaturen periodevis overstiger  $26^{\circ}\text{C}$ , noe som ikke er ønskelig. Når en ser på vinddataene for disse periodene ser en at en i de fleste tilfeller har tilstrekkelig vindhastighet, men at vindretningen er ugunstig (utenfor det grønne området) for gjennomløfting via åpninger i nord- og sørfasaden.

En tilsvarende simulering viser at forholdene bedres betraktelig dersom en flytter  $0,5\text{ m}^2$  av lysåpningsarealet i nord- og sørfasaden til øst og vestfasaden, se den sorte kurven i Figur 16. Forklaringen er at en drar bedre nytte av trykkforskjellene mellom fasadene når dominerende vindretning er nær Ø-NØ eller V-SV, dvs. parallelt med nord- og sørfasaden. Dette forutsetter imidlertid at lokalene tillater gjennomstrømning, også i øst/vestlig retning.

Dersom en antar at også vanlige vinduer vil åpnes jfr. Case 5, og således bidra til å øke gjennomløftingen, vil romtemperaturen reduseres ytterligere slik den blå kurven i Figur 16 viser. En ser da at simuleringresultatene indikerer at den opplevde temperaturen vil holde seg under  $26^{\circ}\text{C}$  praktisk talt hele simuleringperioden. Simuleringer gjort for høstperioden (18 august til midten av september) indikerer at temperaturen med særdeles få unntak vil holde seg under  $26^{\circ}\text{C}$  også for denne perioden.



**Figur 15 Klimadata for perioden 2. mai – 16. juni.**



**Figur 16 Simuleringer av operativ temperatur for perioden onsdag 2. mai til lørdag 16. juni, 2007.**

Merk at simuleringene som er gjort, tar utgangspunkt i en modell med relativt lette vegg, tak og gulvkonstruksjoner. Selv om det i Case 4-8 er lagt inn noe termisk masse inne i lokalene i form av betongvegger, gjør dette at kjøleeffekten av lufting/ventilasjon om natten får relativt begrenset effekt på forholdene påfølgende dag. Tyngre termisk masse i de delene av konstruksjonen som vender inn mot lokalene vil gjøre at nattkjølingen får langt større betydning. Kombinasjonen mellom tunge gulv og fortrekningsventilasjon er spesielt gunstig når det gjelder nattkjøling pga. at den gir god konvektiv varmeovergang mellom gulv og tilluft.



## 6. Referanser

- 
- 1 Wachenfeldt, B.J. (Aug. 2004) *Utredning av alternative ventilasjonsløsninger for ny ungdomsskole på Mæla i Skien*, SINTEF rapport STF22 A04512, ISBN 82-14-03417-5
  - 2 Ethridge D., Sandberg, M (1996) *Building Ventilation – Theory and measurement*, Wiley.
  - 3 Skistad H., Mundt E., Nielsen P.V., Hagström K., Railio J. (2002) *Displacement Ventilation in non-industrial premises*, rehva, Federation of European Heating and Air-conditioning Associations, Guidebook NO1, ISBN 82-594-2369-3
  - 4 Eimund Skåret (2000), *Ventilasjonsteknisk håndbok*. NBI, ISBN 82-536-0714-8
  - 5 Clarke J A (2001) *Domain Integration in Building Simulation*, *Energy and Buildings*, 33(4), pp303-8.