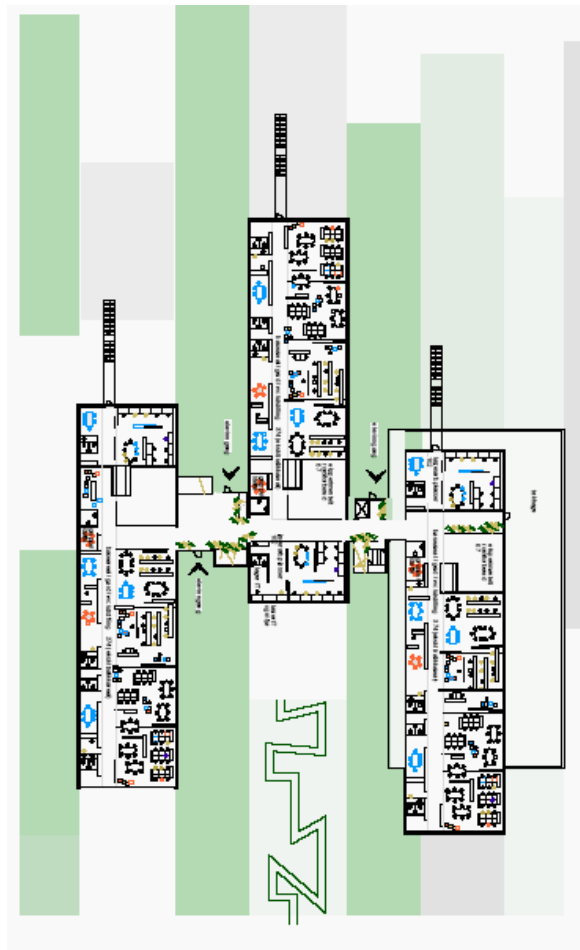


Utredning av alternative ventilasjonsløsninger for ny ungdomsskole på Mæla i Skien



August 2004



SINTEF RAPPORT

SINTEF Bygg og miljø
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

TITTEL

Utredning av alternative ventilasjonsløsninger for ny ungdomsskole på Mæla i Skien.

FORFATTER(E)

Bjørn J. Wachenfeldt

OPPDRAGSGIVER(E)

Pir 2 Arkitektkontor AS

RAPPORTNR. STF22 A04512	GRADERING Åpen	OPPDRAGSGIVERS REF. Ogmund Sørli	
GRADER. DENNE SIDE	ISBN 82-14-03417-5	PROSJEKTNR. 22416800	ANTALL SIDER OG BILAG 34
ELEKTRONISK ARKIVKODE MælaRapport1-SINTEF.doc	PROSJEKTLEDER (NAVN, SIGN.) Bjørn J. Wachenfeldt,	VERIFISERT AV (NAVN, SIGN.) Håkon Skistad,	
ARKIVKODE	DATO 2004-08-21	GODKJENT AV (NAVN, STILLING, SIGN.) Siri H. Blakstad, Forskningsjef,	

SAMMENDRAG

Med fokus på plan 2 i undervisningsfløyene er det gjort kvalitative vurderinger av de mest aktuelle ventilasjonsløsninger for nye Mæla Ungdomsskole i Skien. Videre er ventilasjonsbehovet analysert og dimensjonerende luftmengder beregnet med bruk av fortregningsventilasjon og omrøringsventilasjon.

En beregningsmodell for en typisk undervisningsfløy er konstruert med beregningsverktøyet ESP-r, og aspekter relatert til energibruk og komfort er analysert ved hjelp av dynamiske simuleringer. Energiforbruket til viftedrift, belysning, romoppvarming samt oppvarming av ventilasjonsluft ble beregnet til 96 kWh/m² per år for en tradisjonell løsning med mekanisk ventilasjon, sentralt aggregat og luftmender dimensjonert i henhold til veiledningen til TEK. Til sammenligning vil en løsning med lave trykkfall, luftmengder dimensjonert etter bruk av effektiv fortregningsventilasjon samt behovsstyring av ventilasjon og belysning medføre et energiforbruk på 52 kWh/m² per år til de samme formål. I lys av de kvalitative og kvantitative vurderingene som er gjort, er det prinsipielt to forskjellige ventilasjonstekniske løsninger som vurderes som spesielt aktuelle; desentraliserte luftbehandlingsaggregater i hver etasje og sentrale luftbehandlingsaggregater i kjeller for de enkelte bygg. Begge forslagene til løsning innebærer minimal bruk av horisontale ventilasjonskanaler i lokalene.

Simuleringene viser også at det er nødvendig med tiltak for å bedre termisk komfort i varme perioder. En beregning gjort der en åpner vinduer i nord og sør-fasaden samtidig for å oppnå gjennomtrekk når det er for varmt inne tyder på at det er mulig å oppnå god komfort uten mekanisk kjøling.

STIKKORD

EGENVALGTE	Bygningsintegrert ventilasjon	Komfort
	Energibruk	Naturlig ventilasjon

INNHOLD

1	Bakgrunn	4
2	Mål	4
3	Konklusjoner	5
4	Innledende betraktninger	7
	4.1 Generelt	7
	4.2 Planløsningen	7
	4.3 Takhøyden	8
	4.4 Muligheter for behovsstyring av ventilasjonen	9
	4.5 Andre momenter	9
5	Alternative ventilasjonsløsninger for Mæla ungdomsskole	10
	5.1 Tradisjonelt mekanisk anlegg med sentralt luftbehandlingsaggregat og balanserte luftmengder	10
	5.2 Avtrekksventilasjon med tilluft via yttervegg og avtrekksvifter på tak	10
	5.3 Veggintegreerte ventilasjonsaggregater med varmegjenvinning	12
	5.4 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene	12
	5.5 Sentrale luftbehandlingsaggregater i kjeller i de enkelte byggene	13
	5.6 Naturlig ventilasjon	13
6	Ventilasjonsbehovet ved Mæla ungdomsskole	16
	6.1 Dimensjonering av ventilasjonsluftmengder med hensyn til luftkvalitet	16
	6.2 Dimensjonering av ventilasjonsluftmengder med hensyn til termisk komfort	21
7	Tillufts og avtrekksløsning ved bruk av fortregningsventilasjon	23
8	Aktuelle ventilasjonsløsninger for den skisserte tillufts- og avtrekksløsning	25
	8.1 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater plassert i mesaninetasje over toaletter	25
	8.2 Tilførsel og avtrekk til etasjen via vertikale ventilasjonskanaler	25
9	Energi og ventilasjonsteknisk analyse av alternative ventilasjonsløsninger for plan 2 i undervisningsfløyene ved Mæla ungdomsskole	27
	9.1 Tradisjonelt mekanisk anlegg med balanserte luftmengder og sentralt luftbehandlingsaggregat	29
	9.2 Avtrekksventilasjon med tilluft via yttervegg og avtrekksvifter på tak	29
	9.3 Veggintegreerte ventilasjonsaggregater med varmegjenvinning	29
	9.4 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene eller sentrale aggregat med minimal bruk av ventilasjonskanaler og dimensjonering for lavt trykkfall	29
	9.5 Behovsstyring av lys og ventilasjon	30
	9.6 Energibruk	30
	9.7 Termisk komfort	31
10	Referanser	34

1 Bakgrunn

Pir II Arkitekter arbeider med prosjekteringen av ny ungdomskole på Mæla i Skien kommune. Pir II er i dialog med Interconsult angående alternative varme og ventilasjonsløsninger. En løsning som har vært antydnet som aktuell av Interconsult er bruk av et mekanisk "lavtrykksanlegg" med balanserte luftmengder og sentralt aggregat med varmegjenvinning [1,2]. Imidlertid innebærer denne løsningen omfattende bruk av kanalføringer, med hovedkanaler som legges over eller under tak.

På grunn av de åpenbare negative arkitektoniske konsekvensene forbundet med en slik løsning, samt ønsket om et enklere system med redusert bruk av ventilasjonskanaler, har Pir II Arkitektkontor ved Ogmund Sørli kommet med flere forslag og ideer til alternative løsninger. Interconsult har gjort enkelte arealmessige og tekniske vurderinger for noen av disse alternativene [3].

SINTEF har imidlertid påtatt seg å bistå med en mer omfattende utredning av aktuelle ventilasjonsløsninger for skolen.

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

Vi har vurdert de mest aktuelle ventilasjonsløsninger for den nye ungdomsskolen på Mæla i Skien. Vi har i denne omgang valgt å fokusere på plan 2 i undervisningsfløyene.

Ventilasjonsbehovet er analysert. Dimensjonerende ventilasjonsluftmengde for plan 2 i undervisningsfløyene beregnet med utgangspunkt i veiledningen til byggforeskriften (TEK) er 1790 l/s (6444 m³/h) forutsatt bruk av lavemitterende materialer. På grunn av god takhøyde ser imidlertid forholdene ut til å ligge til godt til rette for bruk av fortregningsventilasjon. Gitt at det benyttes effektiv fortregningsventilasjon kan den dimensjonerende ventilasjonsluftmengden reduseres til 1000 l/s (3600 m³/h) basert på overslagsberegninger av forurensningskonsentrasjoner, se avsnitt 6.1.3.

En beregningsmodell for en typisk undervisningsfløy er konstruert med beregningsverktøyet ESP-r, og energibruk og komfort er analysert ved hjelp av dynamiske simuleringer. Energiforbruket til viftedrift, belysning, romoppvarming samt oppvarming av ventilasjonsluft ble beregnet til 96 kWh/m² per år for en tradisjonell løsning med mekanisk ventilasjon, sentralt aggregat og luftmender dimensjonert i henhold til veiledningen til TEK. Til sammenligning vil en løsning med lave trykkfall, luftmengder dimensjonert etter bruk av effektiv fortregningsventilasjon samt behovsstyring av ventilasjon og belysning medføre et energiforbruk på 52 kWh/m² per år til de samme formål. Dette tilsvarer en reduksjon på 46 % i forhold til en tradisjonell mekanisk løsning, og innebærer således store besparelser både når det gjelder energiutgifter og miljøbelastning relatert til energiforbruk.

I lys av dette virker to prinsipielt forskjellige ventilasjonstekniske løsninger å være gunstige:

1. Desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene.
2. Sentrale luftbehandlingsaggregater i kjeller i de enkelte byggene.

For begge alternativ forutsettes det at de nødvendige kanaler og komponenter dimensjoneres for svært lave trykkfall, dvs. med et totalt trykkfall fra luftinntak til avtrekk på under 50 Pa.

For alternativ 1 plasseres desentraliserte aggregat på mesanin i enkelte av toalettene i etasjen. Luften tas inn via fasade. I etasjen distribueres luften via fortregningsventiler, og trekkes av oppunder tak.

Samme tillufts- og avtrekksløsning benyttes for alternativ 2, men her skjer lufttilførsel og avtrekk via vertikale ventilasjonskanaler i tilknytning til toalettene. En bør vurdere om en kan integrere føringsveiene for ventilasjonsluft med føringsveiene for vann/avløp.

Alternativ 1 og 2 vil følgelig benytte samme type tillufts og avtrekksløsning. Forutsatt at plasseringen av toalettene forskyves i planet til stedet der tillufts- og avtrekksventilene ønskes plassert, innebærer begge alternativ minimal bruk av horisontale ventilasjonskanaler i lokalene. Alternativ 1 medfører god utnyttelse av et areal som ellers må vurderes som unyttig (mesaninetasjen over toalettene). Det er viktig at aggregatene plasseres slik at de er lett tilgjengelig for vedlikehold.

Alternativ 2 vil kreve arealer i form av tekniske rom til aggregatene, samt ekstra kanalføringer for lufttilførsel og avtrekk.

Begge alternativene må kunne regnes som fleksible. Det er fullt mulig å koble kanaler til de eksisterende system dersom enkelte rom skulle vise seg å få spesielle ventilasjonsbehov.

Det bør benyttes støysvake aggregater, spesielt for alternativ 1 ettersom disse er plassert lokalt i etasjen. Det kan være aktuelt å bygge dem inn for ytterligere støyreduksjon.

For alternativ 1 plasseres luftinntak i sør-fasaden. Dette innebærer en viss risiko for soloppvarming av selve luftinntaket. Dette bør en vurdere ved utforming av dette.

For alternativ 2 vil luften taes inn via sentrale inntak. Disse kan gjerne plasseres på byggenes nordside slik at en unngår soloppvarmet luft.

Videre viser simuleringene at det for begge alternativ er nødvendig med ytterligere tiltak for å bedre termisk komfort i varme perioder. En beregning der en har antatt at vinduer i nord og sør-fasaden åpnes samtidig for å oppnå gjennomtrekk når det er varmt inne tyder på at det er mulig å oppnå god komfort uten mekanisk kjøling. Ved naturlige ventilasjon bør styringsstrategien vurderes videre i forhold til bedre utnyttelse av frikjølingspotensialet samt faren for trekk, regninntregning og økt energibruk.

4 Innledende betraktninger

4.1 Generelt

I en byggesak bør krav til inn klima og energibruk klargjøres og tallfestes, slik at byggherren vet hva han har bestilt, og etter overtakelsen kan kontrollere at han har fått det han har bestilt og betalt for.

4.1.1 Kravspesifikasjon

Vi vil foreslå at det utarbeides konkrete kravspesifikasjoner hvor følgende data tallfestes:

Klima:

- Temperatur:
 - max/min
 - maks vertikal temperaturgradient
 - strålingsasymmetri
- Trekk:
 - maks lufthastighet i oppholdssonene
- Luftkvalitet
 - maksimal CO₂-konsentrasjon i pustesonen
 - luftmengde
- Fuktighet
 - krav til fuktighet angis normalt ikke
- Støy fra tekniske anlegg
 - spesifisere lydtrykknivået i oppholdssonene som kommer fra de tekniske installasjonene.

Energi og effektbehov:

- Energiforbruk pr. år til klimatisering
- Maksimalt effektbehov til klimatisering

Når utetilstanden ligger innenfor dimensjonerende sommertilstand og dimensjonerende vintertilstand skal inn klimaet ligge innenfor de verdiene som er spesifisert.

4.1.2 Ansvarsspesifikasjon

Vi anbefaler at ansvarsforholdene klargjøres og spesifiseres i kontrakten. For eksempel bør Rådgivende Ingeniør være ansvarlig for at de spesifiserte klimaytelsene og det spesifiserte energiforbruket er i henhold til spesifikasjonene når anleggene er installert slik som rådgiveren har spesifisert.

Etterprøving gjøres enten av en utenforstående instans, eller av byggherre/rådgiver i fellesskap.

4.2 Planløsningen

Av plantegningene ser en at undervisningsfløyene ved Mæla ungdomsskole er utformet med lang og smal bygningskropp. Dette gir gode muligheter i forhold til utnyttelse av dagslys og naturlig ventilasjon.

Konvensjonelle mekaniske ventilasjonsanlegg med et sentralt aggregat i denne typen bygg innebærer bruk av lange horisontale kanalføringer. Dersom det ikke tas spesielle forholdsregler i prosjekteringen kan dette medføre en rekke ulemper. De viktigste er:

- **Luftkvalitet:** Lange kanalføringer medfører høyere trykkfall, og gjør det nødvendig med kraftige ventilasjonsvifter. Viftene, eventuelt i kombinasjon med uisolerte ventilasjonskanaler,

øker sjansen for uønsket oppvarming friskluften. For høy tilluftstemperatur kan medføre kortslutningsventilasjon (dårlig ventilasjonseffektivitet) samt for høy romtemperatur. Videre er det en viss risiko for at forurensninger kan avsettes i horisontale ventilasjonskanaler og bidra til forurensning av tilluften. Dersom ikke kanalene lar seg inspisere kan det være vanskelig å oppdage slike problemer. Et tredje moment som kan gå ut over luftkvaliteten er dersom ventilasjonskanalene medfører bruk av nedsenkede himlinger og følgelig redusert takhøyde og romvolum. Det reduserte volumet kan resultere i høyere forurensningskonsentrasjon i perioder med høy forurensningsbelastning.

- **Energibruk:** Lange føringsveier medfører økt energibruk til viftedrift. Ulempene nevnt i punktet over kan dessuten medføre bruk av mekanisk kjøling og/eller at en må øke luftmengdene for å oppnå god nok luftkvalitet.
- **Kostnader:** Risikoen for økte kostnader forbundet med lange føringsveier for ventilasjonsluft er relatert til økt energibruk (jfr. punktet over) samt kjøp, installasjon og på lang sikt også utskiftning av ventilasjonskanaler.
- **Estetikk og dagslysforhold:** Når det gjelder estetikk, oppfattes ventilasjonskanaler gjerne som forstyrrende elementer. Ofte benyttes det derfor nedsenkede himlinger. I tillegg til at dette som nevnt kan gå ut over luftkvaliteten, vil det gi redusert romfølelse. Nedsenket himling vil også innebære lavere vindusplassering og følgelig dårligere dagslysforhold.
- **Støy:** De kraftige ventilasjonsviftene som er nødvendige i forbindelse med lange føringsveier genererer støy. En kan risikere at noe av denne støyen vil kunne spre seg inn til rommene via ventilasjonskanalene. Et annet risikomoment er susing i kanaler og tilhørende ventiler som følge av høye strømningshastigheter.

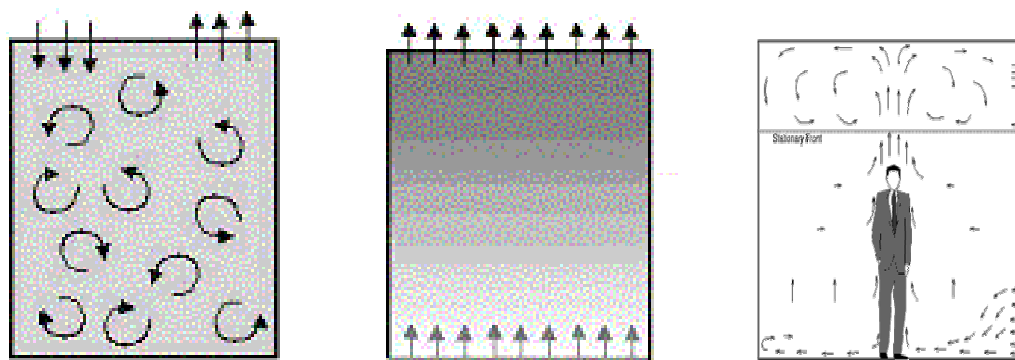
Mange av ulempene nevnt over kan elimineres eller reduseres ved hjelp av forskjellige tiltak. Imidlertid bør det først utredes om det kan finnes gode alternativ der en unngår bruk av lange føringsveier.

4.3 Takhøyden

Skolen er planlagt med en takhøyde på ca. 4 meter. Dette gjør at det ligger godt til rette for bruk av fortrenningsventilasjon, se Figur 1.

Ved fortrenningsventilasjon tilføres friskluften med lav hastighet ved gulvnivå. Tilluftstemperaturen ligger typisk 2-6 °C under gjennomsnittlig romtemperatur. Det er spesielt gunstig med stor takhøyde da dette gir en stor buffersone med plass til varm og forurenset luft over oppholdssonen. Den varme og forurensete luften trekkes av ved tak, noe som gir en mer effektiv ventilasjon. Dette gjør at tilsvarende eller bedre luftkvalitet enn ved omrøringsventilasjon kan oppnås med betydelig lavere luftmengder. Fortrenningsventilasjon medfører dessuten forbedret termisk komfort og/eller redusert kjølebehov i varme perioder.

Trekkproblematikk ved gulvet nært tilluftsventiler er den største risikofaktoren ved bruk av fortrenningsventilasjon. I tillegg kreves en viss andel av vegg og/eller gulvareal. Plassering av tilluftsventiler for fortrenningsventilasjon bør derfor ta hensyn til bruken av rommene og planlegges i nært samarbeid med arkitekt.



Figur 1 Illustrasjon av prinsippene for omrøringsventilasjon (til venstre) og fortregningsventilasjon (i midten og til høyre).

4.4 Muligheter for behovsstyring av ventilasjonen

Pga. persontettheten per m² er normalt personer den viktigste forurensningskilden i skolebygg. Behovsstyring av ventilasjonen går ut på å øke ventilasjonsluftmengdene når det er mange personer til stede, og følgelig høy forurensningsbelastning og stort behov. Når det er få eller ingen mennesker i rommet reduseres ventilasjonsluftmengden tilsvarende.

En undersøkelse av 157 klasserom i Oslo regionen viste at gjennomsnittlig brukstid pr. klasserom var 4 timer [4]. Dette betyr at behovet for ventilasjon ikke bare er lavt om natten, men også mesteparten av dagen. Sammenligning av ventilasjonssystemene for disse klasserommene viste at ventilasjonsluftmengdene var henholdsvis 57 % og 46 % lavere ved bruk av henholdsvis CO₂-basert og IR-basert (bevegelsessensor-basert) behovsstyrt ventilasjon sammenlignet med tradisjonell ventilasjon uten behovsstyring og med konstante luftmengder (CAV) dagtid. Dette medfører tilsvarende reduksjon av energibruk til oppvarming og kjøling av ventilasjonsluft uten at det går ut over luftkvaliteten når folk er tilstede. Luftkvaliteten vil til og med forbedres i forhold til CAV-løsningen dersom en øker luftmengdene ut over de dimensjonerende når behovet tilsier dette.

Behovsstyring av ventilasjonen lar seg forøvrig lett kombinere med bruk av fortregningsventilasjon, og ved bruk av IR-sensorer har en mulighet til å kombinere løsningen med behovsstyring av belysning.

4.5 Andre momenter

God luftkvalitet bør en primært oppnå gjennom redusert forurensningsbelastning. Typiske forurensningskilder foruten personer er emisjoner fra bygningsmaterialer, data- og kopimaskiner, bruk av rengjøringsmidler eller andre interne prosesser.

Skolens utforming med relativt begrenset overflateareal av vegger, gulv og tak i forhold til luftvolumet i lokalene er gunstige med tanke på slike emisjoner. Dersom en i tillegg bruker lavemitterende bygningsmaterialer og begrenser andre forurensende prosesser i bygget vil dette bidra til god luftkvalitet med minimalt behov for ventilasjon.

5 Alternative ventilasjonsløsninger for Mæla ungdomsskole

En rekke forslag til ventilasjons- og varmetekniske løsninger har vært fremmet i forbindelse med prosjekteringen av Mæla Ungdomsskole. Dette avsnittet presenterer SINTEFs kvalitative vurderinger av disse, samt mulige modifikasjoner som kan være aktuelle.

5.1 Tradisjonelt mekanisk anlegg med sentralt luftbehandlingsaggregat og balanserte luftmengder

Et sentralt aggregat nødvendiggjør omfattende bruk av horisontale føringsveier for tilluft og avtrekk. Standard dimensjoner på kanalføringene krever mindre plass men innebærer bruk av kraftige vifter for å overvinne de høye trykktapene, og forøvrig større risiko for støy som følge av høye strømningshastigheter i kanalene (susing). Gjennom å gå opp på kanaldimensjonene reduseres disse problemene, men slike løsninger er mer plasskrevende med de negative konsekvensene dette innebærer. Avsnitt 4.2 oppsummerer forøvrig de viktigste problemene med lange føringsveier.

Likevel er det også mange fordeler forbundet med bruk av et tradisjonelt mekanisk anlegg med sentralt aggregat. Noen av de viktigste er:

- **Enkel prosjektering:** Det å bruke en standard ventilasjonsteknisk løsning setter mindre krav til prosjekteringen. Det er en vel utprøvd løsning som enkelt kan dimensjoneres og implementeres.
- **Energibruk:** Ved sentral luftbehandling med balanserte luftmengder er det relativt lett å få til effektiv varmegjenvinning.
- **Kostnader:** Et sentralt luftbehandlingssystem kan ha betydelige fordeler når det gjelder både investeringskostnader og kostnader til drift og vedlikehold sammenlignet med mer desentraliserte systemer.
- **Støy:** Et sentralt luftbehandlingssystem plassert i et teknisk rom kan være enklere å støyisolere enn desentraliserte aggregater plassert nærmere oppholdsrommene.

Både fortrenningsventilasjon og behovsstyring er mulig å få til ved bruk av et sentralt aggregat. Behovsstyring nødvendiggjør imidlertid bruk av spjeld/ventiler som kan åpnes og lukkes etter behov, og da helst i kombinasjon med frekvensstyring av ventilasjonsviftene.

5.2 Avtrekksventilasjon med tilluft via yttervegg og avtrekksvifter på tak

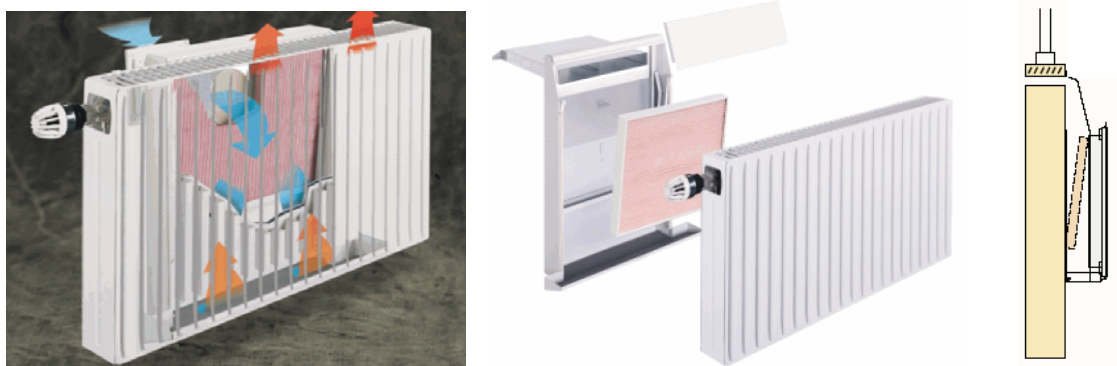
Dette er en løsning som antydes av Interconsult i et forsøk på å imøtekomme arkitektens ønske om å redusere omfanget av ventilasjonskanaler. Det er foreslått at luften tilføres gjennom ITEKs fasadeventiler med innebygd varmebatteri og filter for frittstående plassering på yttervegg, se Figur 2. Denne typen fasadeventiler har vært brukt i Sverige og Danmark på skoler, men vi har dessverre ikke funnet dokumenterte erfaringer i forbindelse med anvendelsen.

En viktig fordel med denne typen løsning er at kort tilførselsvei for friskluften med få komponenter minimerer sjansen for at luften forurenses på vei inn i bygningen. Forvarming av tilluft gjøres via røranlegget som forsyner radiatorene. Dette må derfor oppdimensjoneres for å dekke det økte kapasitetsbehovet.



Figur 2 Comfort 100 fasadeventiler med varmebatteri og filter fra ITEK AS.

Et alternativ til denne tilluftsløsningen som kan vurderes er å benytte radiator og fortregningsventil i kombinasjon. Denne løsningen leveres bla. av det svenske firmaet Thermopanel AB, se Figur 3. Fortregningsventilasjonsprinsippet kan også brukes ved denne typen løsning. Imidlertid vil den gjøre det problematisk å oppnå riktig tilluftstemperatur når oppvarmingsbehovet ikke samsvarer med behovet for forvarming av ventilasjonsluften. Konsekvensen av dette kan bli trekk i perioder da romoppvarmingsbehovet er lavere enn behovet for forvarming av tilluft, og kortslutningsventilasjon i motsatt fall (friskluften blir da for varm, og stiger ut av oppholdssonen før den har gjort nytte for seg). Alternativt kan varmepådraget styres etter behovet for oppvarming av ventilasjonsluft, men dette kan medføre for høy eller for lav romtemperatur i perioder og/eller unødig høy energibruk.



Figur 3 Kombinert radiator og fortregningsventil fra Thermopanel AB (www.thermopanel.se)

Luften trekkes av via kanaler ført opp i sjakter gjennom øvre plan, og luftmengden reguleres etter behov. Bruk av sentrale avtrekkstårn av en viss høyde vil bidra til utnyttelse av termiske drivkrefter, og dersom tårnene utformes på en gunstig måte vil også vinden bidra til ventilasjonen gjennom at den reduserer trykket over utløpsåpningen som følge av den såkalte Venturi-effekten. Dette kan gjøre at naturlige drivkrefter er tilstrekkelig for å drive ventilasjonen mesteparten av tiden, se forøvrig avsnitt 5.6.

Varmegjenvinning på avtrekkssiden er av Interconsult vurdert som ulønnsom pga. høye investeringskostnader [2]. Likevel mener vi det er grunn til å vurdere nærmere om anvendelse av en avtrekksvarmepumpe kan være en gunstig løsning.

Behovsstyring av ventilasjonsluftmengdene på avtrekkssiden vil ikke gi mulighet for lokal behovsstyring med mindre en installerer regulerbare spjeld i ventilene. Undertrykket i rommene

vil forøvrig bidra til en generell økning av infiltrasjonen (den utilsiktede ventilasjonen gjennom utettheter i fasaden e.l.) i rommene, noe som har negative konsekvenser både i forhold til komfort og energibruk.

Fasadeventilene baserer seg på samme prinsipp som fortrenningsventiler for å oppnå effektiv ventilasjon, og tilluftstemperaturen bør følgelig ligge 2-6 °C under gjennomsnittlig romtemperatur. Trekkproblematikk i ventilenes nærsone må tas med i vurderingen av denne typen løsning.

5.3 Veggintegreerte ventilasjonsaggregater med varmegjenvinning

Det tyske selskapet FassadenSystemLüftung (FSL) markedsfører desentraliserte ventilasjonsaggregater som kan integreres i vegg, alternativt under hevet gulv eller over senket himling. Aggregatene er utstyrt med filter, varmegjenvinner og varmeveksler for forvarming eller kjøling av ventilasjonsluften. Også denne løsningen innebærer kort tilførselsvei for friskluften, noe som minimerer sjansen for at luften forurenses på vei inn i bygningen. Forutsatt at avtrekksventiler er plassert nært aggregatet medfører den også minimalt behov for ventilasjonskanaler.



Figur 4 Desentralisert, veggintegreert ventilasjonsaggregat fra FSL (<http://www.troxtechnik.com>)

I likhet med fasadeventilene til ITEK AS, ligger løsningen til rette for bruk av fortrenningsventilasjon, slik at plassering og trekkproblematikk må vurderes nøye i forhold til bruken av rommene.

Systemet hevdes å være kostnadseffektivt både i forhold til drift og vedlikehold. Varmegjenvinningen, samt det at en sannsynligvis lettere kan få til lokal behovsstyring, gjør at dette systemet kommer bedre ut når det gjelder energiforbruk enn løsningen skissert i avsnitt 5.2 over. Vi kjenner imidlertid ikke til om det finnes erfaringer med bruken av denne typen system i Norge. Effektiviteten på varmegjenvinningssystemet samt anleggets kapasitet og støynivå er forøvrig ikke angitt i dokumentasjonen på FSLs nettside, noe som også skaper usikkerhet når det gjelder hva en kan forvente av systemet. Den nære plassering til oppholdssonen gjør det forøvrig svært viktig at aggregatet er støysvakt.

5.4 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene

Et annet alternativ er å plassere desentraliserte luftbehandlingsaggregater på en messaninetasje over toalett/grupperomdelene av de enkelte etasjene. Luftinntak plasseres lokalt i fasaden, og avkast over tak. Interconsult har skissert mulige aggregatplasseringer og løsning når det gjelder kanalføringer [3,5]. Det hevdes blant annet at med tanke på service vil det være gunstigst å plassere aggregatet vinkelrett i forhold til fasaden, men at dette i så fall krever 1,5 m nedsenket

himling både i toalett/grupperomdelene og lenger inn i lokalet. Det er foreslått horisontale ventilasjonskanaler for tilluft og avtrekk der tilluftsventiler plasseres i nedforet skjørt inn mot klasserommene, mens avtrekksventiler plasseres i himling i korridorsonen. Totalt medfører dette omkring 100 meter med horisontale kanalføringer for hver etasje.

Den skisserte løsningen ser ut til å basere seg på omrøringsventilasjon. Vi mener at forholdene ligger godt til rette for bruk av fortregningsventilasjon. Dette gir grunn til å revurdere valget av aggregatstørrelse, samt nødvendigheten av horisontale føringsveier. Dette er nærmere behandlet i avsnitt 7 under. Løsningen vil i så tilfelle muliggjøre balansert ventilasjon med høyeffektiv varmegjenvinning og begrenset bruk av ventilasjonskanaler, og følgelig være interessant av flere grunner.

5.5 Sentrale luftbehandlingsaggregater i kjeller i de enkelte byggene

En annen løsning som er antydnet er å plassere sentrale luftbehandlingsaggregater i kjelleren i hvert enkelt bygg, med til og fraluftskanaler i sentrale sjakter i fløyene [3,5]. Distribusjonskanaler i etasjen legges over himling i toalettsonen. Nedsenket himling er følgelig ikke nødvendig i trafikkarealet (dvs. arealet som skiller toalett/grupperomdelene i sør mot undervisningsarealene i fløyenes nordlige del).

For den skisserte løsningen er det antydnet bruk av horisontale tillufts- og avtrekkskanaler i hele fløyens lengde, med tillufts- og avtrekksystem tilsvarende den som er antydnet i avsnitt 5.4 over. Totalt er det snakk om ca. 150 meter horisontale kanalføringer for hver etasje. Vi mener som nevnt i avsnitt 5.4 over at bruk av fortregningsventilasjon gir grunn til å revurdere nødvendigheten av horisontale føringsveier, se avsnitt 7.

Fordelen med dette systemet sammenlignet med ett sentralt aggregat er at en unngår horisontale føringsveier mellom fløyene og det sentrale aggregatet. Det at hovedtilførselen kommer inn sentralt i hver enkelt fløy gjør dessuten at de største horisontale kanalene i etasjene kan dimensjoneres etter ca. halvparten av etasjenes totale luftmengde, og ikke hele slik det ville vært ved bruk av et sentralt aggregat.

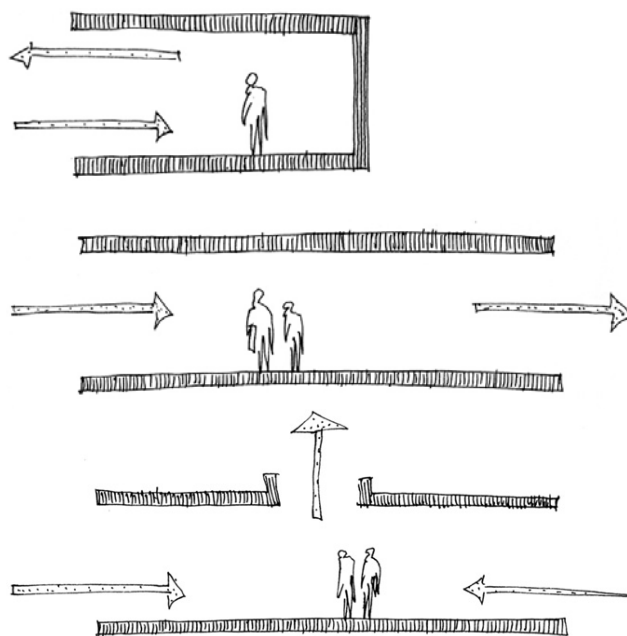
5.6 Naturlig ventilasjon

Eventuell bruk av naturlig ventilasjon har så langt ikke fått særlig oppmerksomhet av prosjekteringsgruppen. Imidlertid mener vi det er grunn til å gjøre en seriøs vurdering av mulighetene til å utnytte naturlig ventilasjon, spesielt i forhold til å forbedre termisk komfort samt unngå eller redusere bruk av mekanisk kjøling. Dagtid gjøres dette gjennom at overskuddsvarme effektivt ventileres ut samtidig som luftbevegelsen inne har en kjølede effekt på de som oppholder seg der. På natten kan naturlig ventilasjon bidra til å kjøle ned bygningsmassen og dermed forhindre at temperaturen blir for høy neste dag. En viktig fordel med naturlig ventilasjon er at tilluften ikke får uønsket oppvarming som følge av varmeavgivelse fra vifter eller varme ventilasjonskanaler, samt at en unngår å bruke energi på å drive ventilasjonen.

Bruk av naturlig ventilasjon medfører likevel en del utfordringer og mulige ulemper. Ofte innebærer naturlig ventilasjon benyttelse av ufiltrert uteluft. Dette kan øke konsentrasjonen av støv, pollen og andre forurensninger i luften innendørs, spesielt dersom kvaliteten på uteluften i utgangspunktet er dårlig. Risikoen for regninntregning, inntregning av støy utenfra samt inntregning av insekter eller andre uønskede elementer medfører også utfordringer i utformingen av løsninger med naturlig ventilasjon.

Naturlig ventilasjon går ut på å utnytte vind og/eller termisk oppdrift som drivkrefter for ventilasjonen som et alternativ til vifter i mekaniske ventilasjonsanlegg. De naturlige drivkreftene

er imidlertid relativt beskjedne slik at lave trykkfall i føringsveiene er en forutsetning for å oppnå tilstrekkelige luftmengder. I stedet for tradisjonelle ventilasjonskanaler benyttes derfor eksempelvis korridorer, trapperom eller rett og slett rommene i seg selv som føringsveier for ventilasjonsluften. Et ventilasjonssystem basert på naturlige drivkrefter er derfor integrert i bygningsutformingen i større grad enn mekaniske systemer.



Tre hovedprinsipper er aktuelle når et rom eller lokale skal ventileres naturlig. Disse er ensidig ventilasjon, kryssventilasjon og skorsteinsventilasjon, se Figur 5. Som en tommelfingerregel kan ensidig ventilasjon (øverst) anslås å være effektiv for en avstand fra fasaden på inntil 2-2,5 ganger takhøyde. Kryssventilasjon (midten) anbefales når avstanden mellom fasadene er mindre en 5 ganger takhøyden, mens skorsteinsventilasjon (nederst) anslås å være effektiv fem ganger takhøyden fra luftinntak i retning mot det sentrale avtrekket.

Kryssventilasjon og skorsteinsventilasjon er de klart mest effektive ventilasjonsprinsippene, og begge kan være aktuelle for undervisningsfløyene ved Mæla skole.

Figur 5 Prinsippene for naturlig ventilering: Ensidig ventilasjon (øverst) kryssventilasjon (midten) og skorsteinsventilasjon (nederst).

Kryssventilasjon

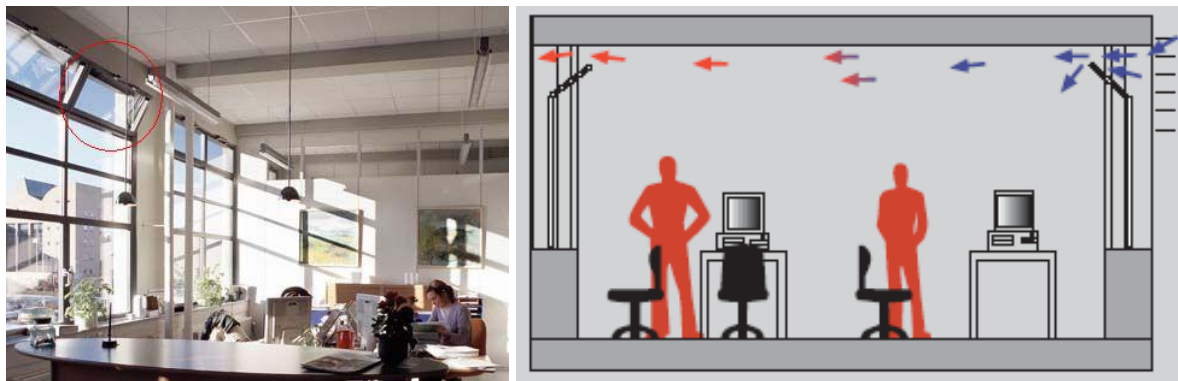
Ved kryssventilering utnytter en overtrykket vinden skaper på byggets lo-side og et undertrykket på le-siden for å skape gjennomtrekk i lokalet. Det skal svært lite vind til for å oppnå relativt store luftmengder.

Selv på vindstille dager kan solen bidra til å skape luftstrømning gjennom lokalene. På byggets solside vil det typisk oppstå en oppadgående luftstrøm som følge av termisk oppdrift. Denne vil skape et undertrykk ved vindusåpningene som "suger" varm luft ut av lokalene samtidig som en unngår at den soloppvarmede luften strømmer inn.

Kraftig vind kan medføre at papir blir blåst av kontorpulter, spesielt dersom luftevinduene er plassert lavt. For høye lufthastigheter og/eller lav temperatur på tilluften kan dessuten medføre trekkfølelse, spesielt for de som sitter for nært vinduet på tillufts-siden. Et annet problem er risikoen for regninntregning gjennom vinduer som en har glemt å lukke.

Et alternativ som reduserer risikoen for problemer både i forhold til trekk og vanninntregning, og som dessuten vil bidra til god ventilasjonseffektivitet, er å benytte høyt plasserte vinduer som vender innover, se Figur 6. Det at avtrekksluften trekkes av ved taknivå gjør at den varmeste luften oppunder taket blir ventilert ut gjennom vinduet på le-siden. Den høye plasseringen kan imidlertid gjøre dem utilgjengelige for manuell betjening. En løsning er å utstyre de med motor som muliggjør åpning og lukking enten via et kontrollpanel og/eller automatisk.

Automatisk styring gir forøvrig muligheter for mer optimal styring, gjerne innbefattet en bevisst nattkjølingsstrategi med utnyttelse av tunge bygningsmasser for å eliminere kjølebehovet. Dessuten unngår en at vinduer blir stående åpne når dette ikke er ønskelig. Konsekvensanalyse av alternative strategier med bruk av naturlig ventilasjon samt optimalisering av styringsstrategier kan gjøres gjennom dynamiske simuleringer. Forøvrig har et dansk firma (Windowmaster A/S) spesialisert seg innenfor naturlig ventilasjon, og leverer blant annet komplette vindusløsninger med styringssystem.



Figur 6 Høyt plasserte vinduer som vender innover er gunstig både med hensyn til naturlig ventilering og dagslysutnyttelse (venstre). Kryssventilasjon kan gi god ventilasjon selv ved relativt lave vindhastigheter (høyre) Illustrasjonene er hentet fra <http://www.windowmaster.com>

Skorsteinsventilasjon

På grunn av at avtrekksluften trekkes av ved taknivå, er skorsteinsventilasjon spesielt effektiv i forhold til å bli kvitt overskuddsvarme. Skorsteinsventilasjon gjør det forøvrig mulig å trekke inn friskluft fra alle fasadene samtidig når forholdene ligger til rette for dette. En løsning basert på skorsteinsventilasjon vil være naturlig å kombinere med løsningen beskrevet i avsnitt 5.2, *Avtrekkventilasjon med tilluft via yttervegg og avtrekksvifter på tak.*

6 Ventilasjonsbehovet ved Mæla ungdomsskole

Før en kan gå videre med en mer kvantitativ analyse av de forskjellige løsningsalternativene er det nødvendig å gjøre en vurdering av ventilasjonsbehovet ved skolen. For enkelhets skyld tas det først utgangspunkt i en etasje i en av undervisningsfløyene.

§ 8-32, punkt 2 i *Forskrift om krav til byggverk og produkter til byggverk (TEK)* sier følgende om innendørs luftkvalitet: "Luftkvaliteten i en bygning skal være tilfredsstillende. Inneluften skal ikke inneholde forurensninger i kjente skadelige konsentrasjoner med hensyn til helsefare og irritasjon". Videre sier § 8-36 følgende om termisk inneklima: "Det termiske inneklimaet i rom for varig opphold skal gi tilfredsstillende helseforhold og komfortopplevelse ved forutsatt bruk."

Både kravet til luftkvalitet og termisk inneklima kan være dimensjonerende for ventilasjonsinstallasjonene.

6.1 Dimensjonering av ventilasjonsluftmengder med hensyn til luftkvalitet

Veiledningen til TEK gir en rekke anbefalinger for å oppfylle dette kravet. Blant annet at frisklufttilførselen bør vurderes ut fra følgende tre forhold:

A: Personbelastning

B: Materialbelastning (forurensning fra bygningsmaterialer, inventar og installasjoner)

C: Forurensning fra aktiviteter og prosesser

Frisklufttilførselen beregnes med utgangspunkt i verdiene (A + B) og C. De to verdiene (A + B) og (C) sammenlignes og den største verdien legges til grunn for dimensjonering av ventilasjonsinstallasjonene. For Mæla skole vil det i all hovedsak være person- og materialbelastningen som dominerer.

6.1.1 Personbelastning A

For lett aktivitet, slik en typisk vil ha i undervisningslokaler, anbefales det at A er minst 7 l/s pr. person. Det er imidlertid viktig å være oppmerksom på at dette er en minimumsanbefaling. Videre tar anbefalingen utgangspunkt i normal takhøyde og standard ventilasjonstekniske løsninger basert på omrøringsventilasjon. Ved benyttelse av effektiv fortregningsventilasjon kan luftmengdebehovet for å dekke personbelastningen reduseres, se avsnitt 6.1.4 under.

6.1.2 Materialbelastning B

Uteluftmengden som må tilføres på grunn av lukt og irritasjonseffekter fra stoffer som avgis fra bygningsmaterialer og inventar, må være minst 1 l/s pr. m² brutto gulvareal (innvendig målt fra yttervegg til yttervegg) under forutsetning av at det i hovedsak benyttes kjente og godt utprøvde materialer som er bedømt å være lavemitterende. Dersom det benyttes godt utprøvde og dokumentert lavemitterende materialer som ikke avgir kjente irriterende eller helseskadelige stoffer, kan uteluftmengden reduseres til 0,7 l/s pr. m² brutto gulvareal. Høyemitterende produkter må benyttes i lite omfang.

Eksempel på materialer som normalt er lavemitterende er betong, tegl, keramiske fliser, høytrykkslaminater, gipsplater, papirtapet, glass, massivt tre o.l. Trevirke fra løvtre avgir mindre stoffer enn trevirke fra nåletre. Tilsetningsstoffer i betongen kan føre til økt avgassing.

Benyttes udokumenterte materialer eller høyemitterende produkter, må det tilføres minimum 2 l/s uteluft pr. m² brutto gulvareal.

6.1.3 Grenseverdier for CO₂

Dersom personbelastningen dominerer kan luftmengdene alternativt dimensjoneres etter grenseverdier for CO₂.

Arbeidstilsynet har satt grenser for hvor høyt innhold av CO₂ som kan tolereres i arbeidsatmosfære. Denne grenseverdi er satt til maksimalt 5000 ppm CO₂ i gjennomsnitt over en normal arbeidsdag.

I inneklimasammenheng brukes imidlertid CO₂ kun som en indikator på forurensningsbelastningen, og i Norge anbefales en øvre ”komfortgrense” på 1000-1200 ppm CO₂. Grenseverdien henger sammen med den diskomfort vi føler i et rom med for dårlig ventilasjon i forhold til antall mennesker i rommet (støv, pollen, svettelukt, fuktighet, temperatur o.l.). Det vil si at vi føler luften som ”tung”.

Luftmenden som må til for å holde CO₂ nivået under denne grenseverdien kan beregnes basert på antagelser om forventet CO₂ avgivelse fra personer, samt CO₂-nivå i friskluften og forventet ventilasjonseffektivitet.

6.1.4 Beregninger for plan 2 i undervisningsfløyene

Maksimal personbelastning for øverste etasje i undervisningsfløyen er beregnet til 165 personer.

Videre er grunnflaten pr. undervisningsfløy ca. 655 m² hvorav toaletter totalt utgjør ca 20 m². Undervisningslokalet utgjør følgelig 635 m².

Det forutsettes at det ikke brukes høyemitterende bygningsmaterialer, men kun kjente, lavemitterende materialer.

Luftmengder basert på veiledningen til TEK

Bruk av tommelfingerreglene i veiledningen til TEK gir følgende resultater.

Personbelastning A: 165 personer x 7 l/s pr. person = 1155 l/s

Materialbelastning B: 635 m² x 1 l/s pr. m² = 635 l/s

Total luftmengde: 1790 l/s (6444 m³/h)

Totalt pr. person ved maksimal personbelastning: 10,8 l/s

Merk at veiledningen anbefaler at minst 10 l/s av denne luftmengden skal trekkes av fra hvert toalett for å gi tilfredsstillende luftkvalitet her.

Til sammenligning har Interconsult [3] antydnet at kapasiteten til ventilasjonsaggregatene bør være ca. 3600 l/s (13000 m³/h) per etasje, dvs. ca. det dobbelte av minimumsluftmengdene beregnet med utgangspunkt i veiledningen til TEK.

Luftmengder basert på maksimal CO₂-konsentrasjon ved omrøringsventilasjon

Full omrøringsventilasjon innebærer at CO₂ konsentrasjonen overalt i rommet er lik konsentrasjonen i avtrekksluften. Den nødvendige luftmengden for å holde seg under en grenseverdi på 1000 ppm under maksimal belastning, kan beregnes ut fra følgende formel [6]:

$$q_s = \frac{q_{CO_2}}{(C_{CO_2_max} - C_s) \cdot 10^{-6}} \quad (1)$$

der q_s er den nødvendige luftmengde pr. person for å holde konsentrasjonen under $C_{CO_2,max}$ gitt konsentrasjonen C_s [ppm] i tilluften og en CO_2 avgivelse pr. person på q_{CO_2} . Da Mæla skole ligger i landlige omgivelser kan en anta at C_s er 350 ppm. CO_2 avgivelsen fra en person med lavt aktivitetsnivå kan antas å ligge i området 0,005-0,006 l/s [6,7]. Innsatt $q_{CO_2} = 0,006$ l/s gir dette:

$$q_s = \frac{0,006}{(1000 \text{ ppm} - 350 \text{ ppm}) \cdot 10^{-6}} = 9,23 \text{ l/s}$$

Vi ser at denne luftmengden er på nivå med anbefalingene i REN teknisk veiledning.

Gitt fullstendig omrøringsventilasjon for hele etasjen og maksimal personbelastning over et lengre tidsrom, kreves altså følgende luftmengde for å kunne holde CO_2 -nivået under 1000 ppm: 165 personer x 9,23 l/s = 1523 l/s

Luftmengder basert på maksimal CO_2 -konsentrasjon ved fortregningsventilasjon

Ved bruk av fortregningsventilasjon er det flere faktorer som vil bidra til forbedret ventilasjonseffektivitet enn ved omrøringsventilasjon:

1. Konsentrasjonen av forurensninger og CO_2 vil være betydelig lavere i oppholdssonen enn ved avtrekk oppunder tak.
2. Den termisk drevne strømmingen rundt personer kan bidra til at luftkvaliteten for luften som pustes inn er enda bedre enn ellers i oppholdssonen ettersom den reneste lufta (frisklufta) befinner seg nært gulvet.
3. Det at takhøyden er ca. fire meter innebærer at luftvolumet over oppholdssonen er betydelig. Dette volumet vil fungere som en buffer som kan akkumulere forurensninger i perioder med høy belastning uten at det påvirker luftkvaliteten i oppholdssonen i særlig grad. Dersom periodene med høy belastning er begrenset i tid, kan dette bidra til tilfredsstillende luftkvalitet i oppholdssonen selv om ventilasjonsluftmengden ikke er dimensjonert for vedvarende maksimalbelastning. Dette forutsetter imidlertid at det er tilstrekkelig tid etter en periode med maksimalbelastning (f.eks. i friminuttet) til å redusere forurensningene i buffersonen nok til at den er klar for å akkumulere forurensninger på ny før neste periode med stor forurensningsbelastning.

Ventilasjonseffektiviteten kan uttrykkes på flere måter. For å analysere punkt 1 og 2 over har vi her valgt å uttrykke den i form av en personlig eksponeringsindeks:

$$\varepsilon_{\text{exp}} = \frac{C_e - C_s}{C_{\text{exp}} - C_s} \quad (2)$$

der C_e , C_s og C_{exp} [ppm] er forurensningskonsentrasjonen i henholdsvis avtrekksluften, tilluften og den inhalerte luften. Jo høyere denne indeksen er, jo mer effektiv er ventilasjonen.

Ved stasjonære forhold kan CO_2 avgivelsen pr. person uttrykkes som:

$$q_{CO_2} = q_s \cdot (C_e - C_s) \cdot 10^{-6} \quad (3)$$

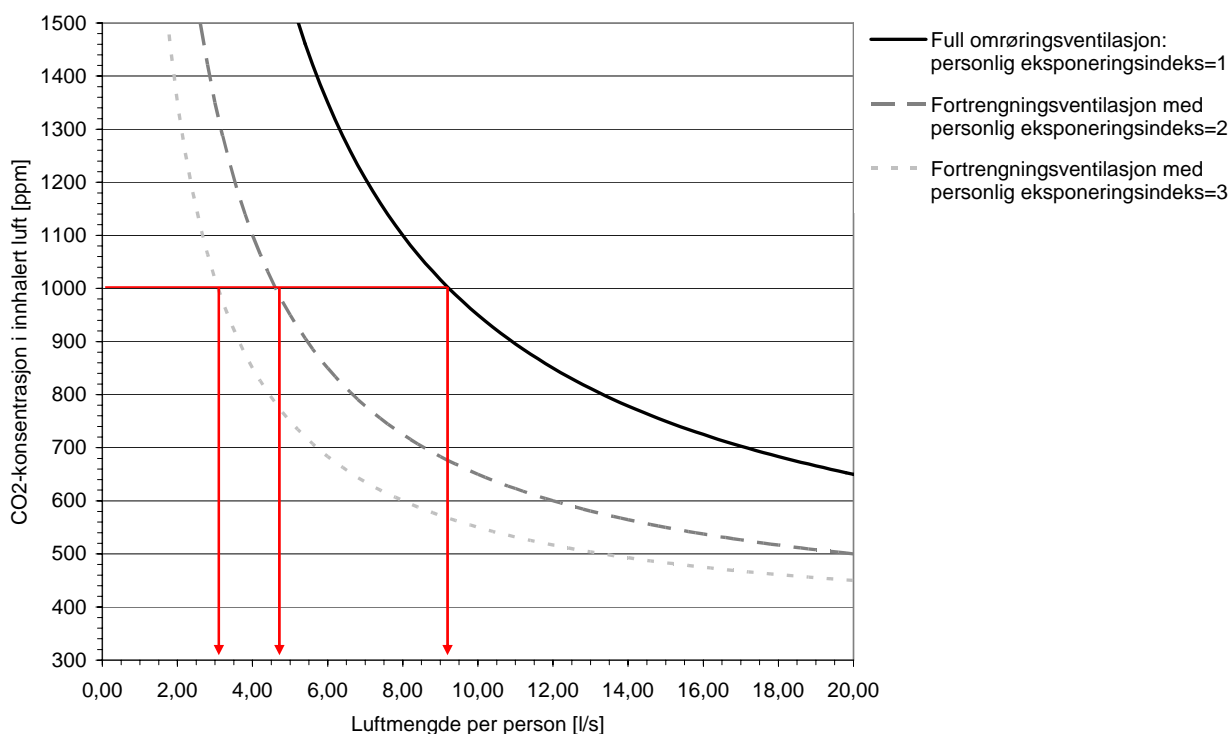
der q_s er tilluftsmengde pr. person.

Ligning (2) og (3) gir nå følgende uttrykk for forurensningskonsentrasjonen i den inhalerte luften som funksjon av tilluftsmengden pr. person og eksponeringsindeksen (ventilasjonseffektiviteten):

$$C_{\text{exp}} = C_s + \frac{q_{\text{CO}_2}}{q_s \cdot \varepsilon_{\text{exp}}} \cdot 10^6 \quad (4)$$

Dette uttrykket er plottet med tre forskjellige ventilasjonseffektiviteter i Figur 7. Med full omrøringsventilasjon vil den personlige eksponeringsindeksen være lik 1 ettersom forurensningskonsentrasjonen i den inhalerte luften C_{exp} da vil være lik konsentrasjonen i avtrekksluften C_s . Som beregnet over og antydnet på grafen, medførte en grenseverdi for CO₂ konsentrasjonen på 1000 ppm da en luftmengde på ca 9,2 l/s.

Problemet er imidlertid å bestemme ventilasjonseffektiviteten ved fortregningsventilasjon. Denne vil påvirkes av en rekke faktorer. Kaldras langs yttervegger og vinduer vil dra forurensninger fra den øvre delen av rommet og ned i oppholdssonen, mye aktivitet i lokalene kan medføre omrøring av lufta, valg av fortregningsventil og riktig tilluftstemperatur er avgjørende for hvor effektivt friskluften fordeles i lokalet osv. Eksponeringsindeksen vil derfor være situasjonsavhengig og kunne variere for forskjellige deler av oppholdssonen.



Figur 7 CO₂-konsentrasjonen i inhalert luft som funksjon av luftmengde pr. person og personlig eksponeringsindeks (ventilasjonseffektivitet).

Skistad m.fl. [6] har gjort et case studium av et klasserom med 2,8 meters romhøyde der de antar en konsentrasjonsøkning av CO₂ fra fortregningsventil til pustesonen på 50 %. Dette gir en personlig eksponeringsindeks på 2, og en luftmengde på 4,6 l/s pr. person.

Ved Mæla skole vil romhøyden bli ca 4 meter, og en konsentrasjonsøkning fra fortregningsventil til pustesonen på 33 % kan være realistisk. Dette gir en personlig eksponeringsindeks på 3, og en luftmengde på 3,1 l/s pr. person. Dette er lavere enn den ventilasjonsluftmengden som ble beregnet med utgangspunkt i veiledningen til byggeforeskriften (TEK) for å ta hånd om forurensning fra bygningsmaterialer, inventar og installasjoner. Denne ble beregnet til 635 l/s, som tilsvarer 3,85 l/s pr. person ved full belastning. Bruker en 800 ppm som grenseverdi, får en imidlertid 4,5 l/s pr. person.

Når det gjelder utnyttelse av romvolumet over oppholdssonen til akkumulering av forurensninger jfr pkt. 3 side 18, utgjør dette ca 1300 m³ dersom en regner at oppholdssonen strekker seg til ca 2 meter over gulvnivå.

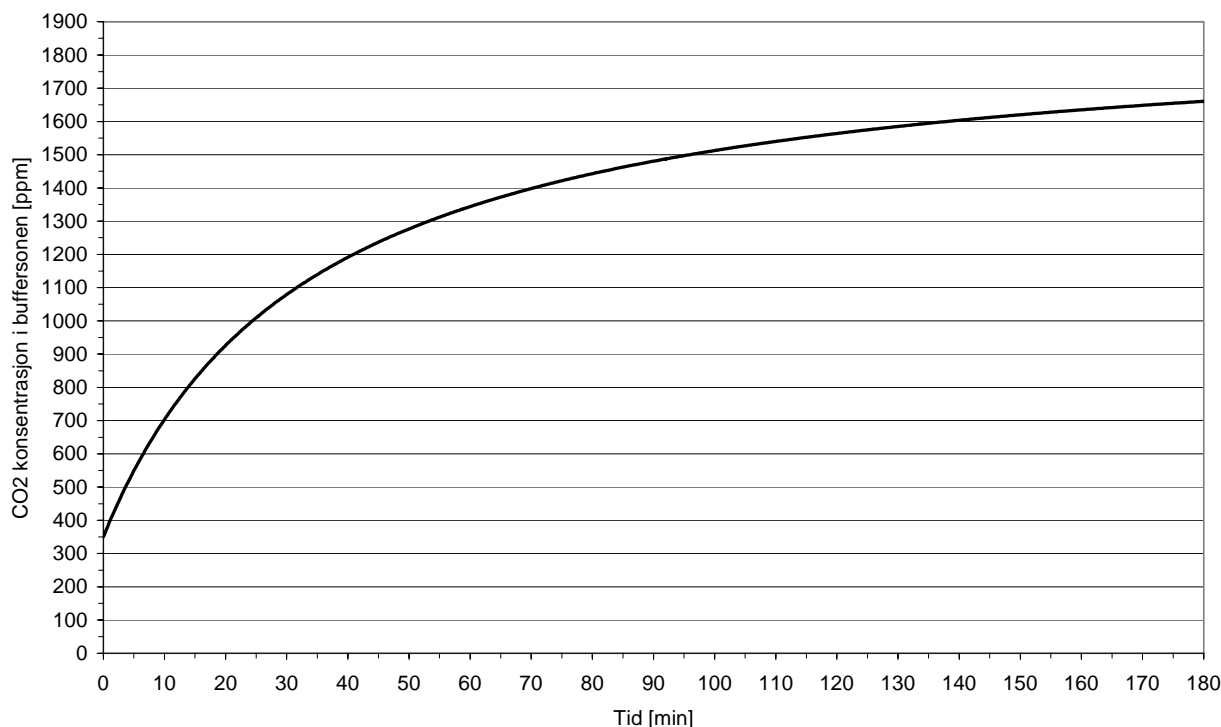
For å gjøre et overslag over den effekten dette kan ha på luftkvaliteten, gjøres følgende antagelse:

- Personbelastningen går ved starttidspunktet fra null til maks (165 personer).
- Hver person avgir 0,006 l/s CO₂ [6,7]
- All CO₂ avgivelsen fra personene stiger opp til buffersonen, slik at CO₂-konsentrasjonen i oppholdssonen holder seg på 350 ppm
- Ved starttidspunktet er konsentrasjonen i innelufta 350 ppm.
- CO₂-konsentrasjonen i tilluften er også 350 ppm.
- Avtrekket befinner seg i buffersonen slik at CO₂-konsentrasjonen i avtrekksluften er lik CO₂-konsentrasjonen i buffersonen.
- Ventilasjonsluftmengden holdes konstant på 635 l/s (3,85 l/s pr. person), som er den dimensjonerende luftmengden med hensyn til materialbelastning.

Konsentrasjonen i buffersonen kan da uttrykkes etter følgende formel:

$$C(t) = C(0) \cdot \frac{V}{V + q_s \cdot t} + \frac{C_s \cdot q_s \cdot t}{V + q_s \cdot t} + \frac{q_{CO_2} \cdot t}{V + q_s \cdot t} \cdot 10^6 \quad (5)$$

Utviklingen over tid er vist i Figur 8. Legg merke til at selv med en så lav ventilasjonsluftmengde vil det ta hele 25 min før CO₂-nivået i buffersonen når 1000 ppm.



Figur 8 Teoretisk beregning av CO₂-konsentrasjonen i buffersonen, se forutsetningene angitt punktvis over. Legg spesielt merke til at konsentrasjonen i oppholdssonen antas å holde seg konstant på 350 ppm.

Det er antatt at CO₂-nivået i oppholdssonen holder seg på 350 ppm. I praksis vil en del av forurensningen imidlertid komme ned i dette området, slik at en får en stigning også her. Likevel

illustrerer beregningen at buffersonen kan bidra til akseptabel luftkvaliteten i oppholdssonen over lengre tid, muligens over et ubegrenset tidsrom dersom ventilasjonseffektiviteten er tilstrekkelig høy. Dette på tross av at personbelastningen er maksimal og luftmengdene er dimensjonert for håndtering av kun materialbelastningen.

6.1.5 Konklusjoner angående dimensjonering av ventilasjonsbehov med hensyn til luftkvalitet

På tross av at det er stor usikkerhet forbundet med ventilasjonseffektiviteten, mener vi at analysen presentert over gir grunnlag for å hevde at en halvering av dimensjonerende luftmengden beregnet med utgangspunkt i veiledningen til byggforeskriften kan være akseptabelt dersom en legger til rette for effektiv fortrenningsventilasjon. Erfaringer fra tilsvarende skolebygg med fortrenningsventilasjon understøtter denne konklusjonen [4]. Effektiv fortrenningsventilasjon forutsetter imidlertid at en velger gode løsninger både når det gjelder det rent ventilasjonstekniske og det byggtekniske.

Forholdene ligger likevel så godt til rette for plan 2 av undervisningsfløyene ved Mæla skole at en bør kunne få til dette uten altfor store problemer. Vi mener da at en vil kunne basere seg på en dimensjonerende ventilasjonsluftmengde tilsvarende 6 l/s pr. person*165 personer =1000 l/s (3600 m³/h) for plan 2 i hver av undervisningsfløyene for å sikre tilfredsstillende luftkvalitet. Denne luftmengden vil være tilstrekkelig til å håndtere både maksimal personbelastning og materialbelastning gitt at en bruker lavemitterende materialer.

6.2 Dimensjonering av ventilasjonsluftmengder med hensyn til termisk komfort

Avsnitt 6.1 tok utgangspunkt i at forurensningsbelastningen var dominerende i forhold til dimensjonering av maksimale ventilasjonsluftmengder. Imidlertid kan det være at de luftmengdene som ble beregnet her ikke er tilstrekkelige for å tilfredsstille byggforskriftens krav til termisk komfort. Som nevnt sier byggforskriftens § 8-36 følgende: ”Det termiske inneklimaet i rom for varig opphold skal gi tilfredsstillende helseforhold og komfortopplevelse ved forutsatt bruk.”

Det er flere forhold må vurderes når ventilasjonsluftmengdene skal dimensjoneres med hensyn til termisk komfort. En ventilasjonsløsning som normalt sett burde kunne gi godt termisk inneklima kan vise seg å ikke strekke til dersom ugunstige arkitektoniske og tekniske løsninger medfører store solvarmetilskudd. Fasade og vindusutforming er spesielt viktig i denne sammenheng.

Videre finnes det flere passive strategier som kan taes i bruk for å skape tilfredsstillende forhold uten behov for kjøling av ventilasjonsluft eller lokal kjøling i rommene. En strategi er bevisst bruk av naturlig ventilasjon slik beskrevet i avsnitt 5.6. Gjennom å benytte kryssventilasjon kan en som nevnt oppnå svært høye luftmengder sammenlignet med mekanisk ventilasjon selv på dager med relativt lite vind. Ved skorsteinsventilasjon kan også termisk oppdrift bidra til effektiv ventilasjon ved tilstrekkelig skorsteinshøyde og temperaturdifferanse mellom uteluften og avtrekksluften.

En annen strategi som er gunstig å kombinere med bruk av naturlig ventilasjon er å kjøle ned den termiske massen om natten i varme perioder. Her er det en fordel med tunge bygningsmasser som har god termisk lagringsevne. Tunge gulv og tak er spesielt gunstige i denne sammenheng da de har store eksponerte overflater som kan motta varmestråling fra personer i bygget, og således gi en direkte kjøleende effekt. I tillegg vil de bidra til konvektiv kjøling av romluften.

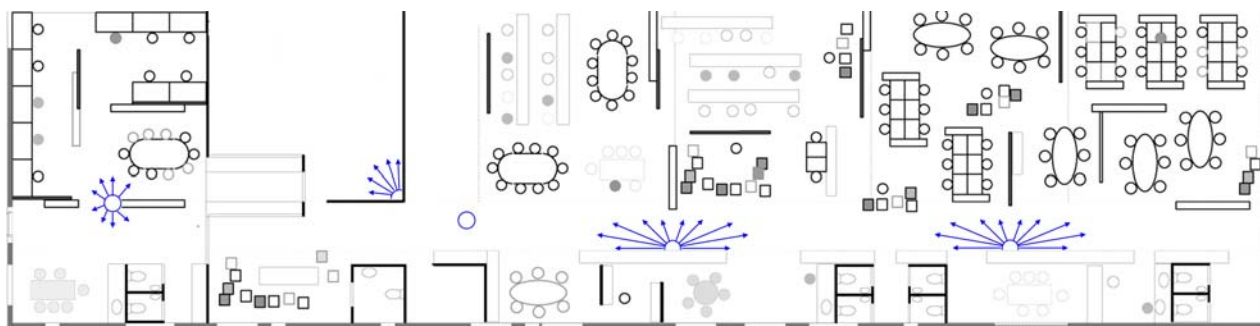
Kjølingen kan en enklest få til dersom en har mulighet til å benytte naturlig ventilasjon om natten. En viktig fordel med naturlig ventilasjon er at tilluften ikke får uønsket oppvarming som følge av varmeavgivelse fra vifter eller varme ventilasjonskanaler, og at den ikke krever bruk av energi.

Dersom det ikke lar seg gjøre å benytte naturlig ventilasjon kan bruk av mekanisk ventilasjon med eller uten kjøling være aktuelt.

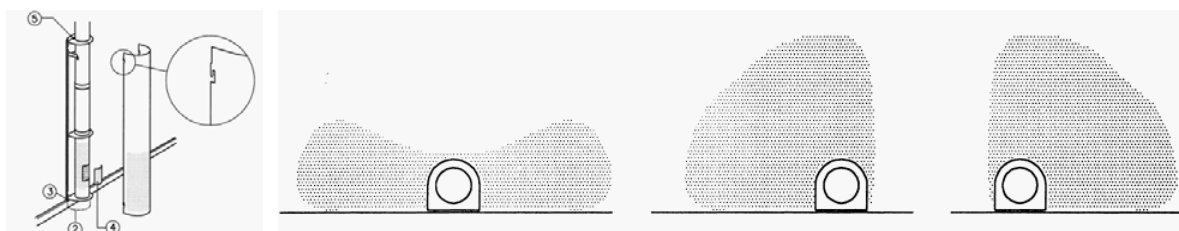
Hvilken strategi en bør legge opp til avhenger i stor grad av det lokale klimaet. Dette, sammen med den kompliserte fysikken som er involvert, gjør at avanserte dynamiske beregninger kan være til stor hjelp for å komme frem til mest mulig optimale løsninger. Avsnitt 9 presenterer innledende beregninger utført med fokus på termisk komfort og energibruk for plan 2 i en av undervisningsfløyene.

7 Tillufts og avtrekksløsning ved bruk av fortregningsventilasjon

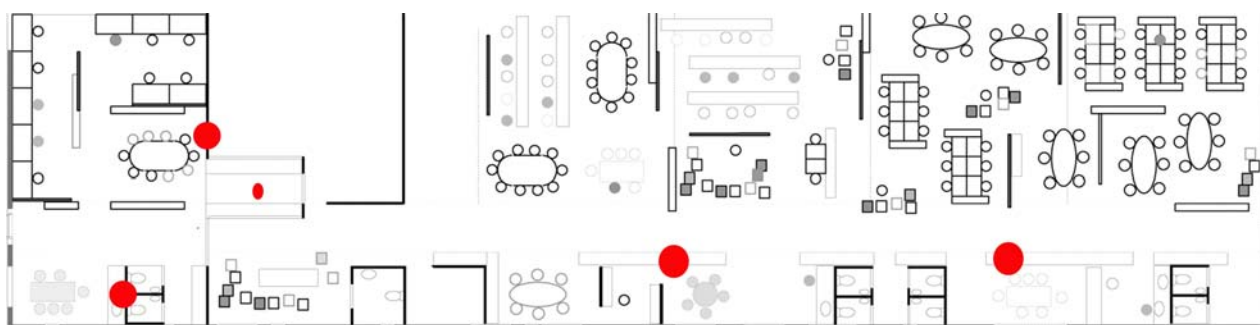
Fortregningsventilasjonen drar nytte av at varm og forurenset luft er lettere enn den noe kjøligere tilluften. Frisk, undertemperert luft tilføres ved gulvnivå. Den noe undertempererte tilluften (typisk 2 - 6 °C under gjennomsnittlig romtemperatur) vil så spre seg ut over gulvet. Nært fortregningsventilene vil strømningshastigheten imidlertid være relativt høy. Dette i kombinasjon med den lave tilluftstemperaturen gjør at permanent opphold i nærheten til fortregningsventilene bør unngås pga. risiko for trekk.



Figur 9 Forslag til plassering av fortregningsventiler for lufttilførsel ved gulvnivå.



Figur 10 Illustrasjon av fortregningsventil med inspeksjonsluke for renhold og blendemuligheter¹ (fra <http://www.auranor.no>).



Figur 11 Forslag til plassering av avtrekksventiler oppunder tak.

Etter hvert som friskluften tar opp varme og forurensninger fra personer og utstyr i lokalet, vil den stige opp mot taket og følgelig ut av oppholdssonen. Termisk lagdeling vil bidra til at den noe kjøligere friskluften vil spre seg jevnt utover i oppholdssonen, mens den varme, forurensete luften vil spre seg under taket. De termiske drivkreftene vil således kunne bidra til relativt jevn friskluftstilførsel over hele lokalet selv ved bruk av få fortregningsventil. Av samme grunn vil det være tilstrekkelig med bare et begrenset antall avtrekksventiler. Planløsningen i øverste etasje i

¹ NB: Blending av fortregningsventiler vil medføre noe større trykkfall, og følgelig redusert ventilasjonsluftmengde dersom ikke viftepådraget økes.

undervisningsfløyene tilsier at persontettheten vil være høyest nær nord-fasaden. Det er forøvrig planlagt å plassere radiatorer for romoppvarming langs denne fasaden.

Dette taler for at fortregningsventil plasseres i tilknytning til basearealet sør for hovedlokalene slik illustrert i Figur 9. Det bør benyttes veldokumenterte, støysvake fortregningsventiler med høy kapasitet og lett rengjøring. Det kan også være en fordel at det finnes mulighet for å blende deler av utløpsåpningen for å oppnå ønsket strømningsmønster og avgrensning av nærsonen (trekksonen), se Figur 10. For å lette rengjøringen, kan en vurdere å benytte fortregningsventiler som kan monteres uten sokkel (som ikke går helt ned til gulvet).

Friskluften vil spre seg utover gulvet. Etter hvert som friskluften tar opp varme og forurensninger fra personer og utstyr i lokalet, vil den stige opp mot taket og følgelig ut av oppholdssonen. I perioder med høyt oppvarmingsbehov vil også varmen fra radiatorene bidra til å skape en oppadgående varmluftstrøm. Om denne varmluften har høy luftkvalitet vil dette redusere ventilasjonseffektiviteten. Imidlertid gjør plasseringen langs nord-fasaden at friskluften fra fortregningsventilene må krysse hele oppholdssonen før den når radiatorene. Det er derfor sannsynlig at den tar opp en del forurensninger på veien, og vil følgelig ikke redusere ventilasjonseffektiviteten like mye som dersom radiatorene var plassert svært nær tilluftsåpningen.

Avtrekk vil generelt kunne plasseres oppunder taket ved samme sted som fortregningsventilene slik skissert i Figur 11. Plassering av toalettene i tilknytning til fortregningsventil og avtrekk gir muligheter for å eliminere bruken av horisontale ventilasjonskanaler for mesteparten av etasjen.

Merk at Figur 9 og Figur 11 ikke representerer et komplett og endelig forslag til løsning. Skissene er ment som en illustrasjon på hvordan tillufts- og avtrekksproblematikken prinsipielt kan løses for å oppnå effektiv fortregningsventilasjon med minst mulig bruk av horisontale ventilasjonskanaler i etasjen. I tillegg til avtrekkene skissert i figuren, skal også toalettene ha eget avtrekk. Likeledes kan det vise seg nødvendig med bruk av flere avtrekk, f.eks i forbindelse med grupperom. Det kan også vise seg nødvendig med bruk av noen flere fortregningsventiler for enkelte rom enn det som er antydnet. Dette for å sikre tilstrekkelig luftfordeling uten risiko for trekk. Disse forholdene må det naturligvis tas hensyn til i detaljprosjekteringen.

8 Aktuelle ventilasjonsløsninger for den skisserte tillufts- og avtrekksløsning

Tillufts- og avtrekksløsningen antydnet i avsnitt 7 over kan en få til gjennom å plassere desentraliserte luftbehandlingsaggregater i en mesaninetasje over toalettene, eller gjennom en løsning der tilførsel og avtrekk for etasjen skjer via vertikale ventilasjonskanaler i tilknytning til toalettene.

8.1 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater plassert i mesaninetasje over toaletter

Denne løsningen ble omtalt i avsnitt 5.4. For å minimalisere bruken av horisontale ventilasjonskanaler er det en fordel om toalettene langs sør-fasaden plasseres i tilknytning til fortregningsventil og avtrekk. Luften taes inn via inntaksventil i sør-fasaden, og avkastluften kan sendes ut over tak. Den sydlige eksponeringen innebærer en viss risiko for soloppvarming av selve luftinntaket. Dette bør en vurdere ved utforming av dette slik at en unngår for høye tilluftstemperaturer. Forøvrig bør både inntaks og avkastløsningen utformes slik at en unngår inntregning av regn og fukt, samt at trykkfallet blir lavest mulig.

På grunn av det lave luftmengdebehovet vil det være tilstrekkelig med relativt små aggregater. Ved bruk av tre aggregater per etasje bør hvert aggregat ha en nominell luftmengde på ca. 350 l/s (1260m³/h) ved det aktuelle trykkfall, se avsnitt 6.1.5. Det bør videre velges støysvake aggregat med høyeffektiv varmegjenvinner, lett vedlikehold og gode muligheter for bruk i kombinasjon med behovsstyring. Det forøvrig være aktuelt å bygge dem inn for ytterligere støyreduksjon. Figur 12 viser et typisk eksempel på en aktuell aggregattype.



Figur 12 Eksempel på komplett "Topvex" luftbehandlingsaggregat fra Systemair med roterende høyeffektiv varmegjenvinner, filter og varme/kjølebatteri. Et aggregat med ytre dimensjoner 1,48x1,28x0,85 m har en angitt nominell luftmengde på 375 l/s (<http://www.systemair.no>)

8.2 Tilførsel og avtrekk til etasjen via vertikale ventilasjonskanaler

Det er også mulig å minimere bruken av horisontale ventilasjonskanaler ved bruk av et sentralt aggregat slik omtalt i avsnitt 5.1, eller sentrale aggregater i kjeller i de enkelte bygg, se avsnitt 5.5. Dette forutsetter imidlertid bruk av vertikale tilførsels og avtrekkskanaler via kjeller i nær tilknytning til fortregningsventil og avtrekk i etasjen.

Slik som for alternativet med desentraliserte aggregater i etasjen vil det også ved denne tilnærmingen kunne være en fordel om toalettene langs sør-fasaden plasseres i tilknytning til fortregningsventil og avtrekk. Dette gir muligheter for å plassere vann og avløpskanaler og

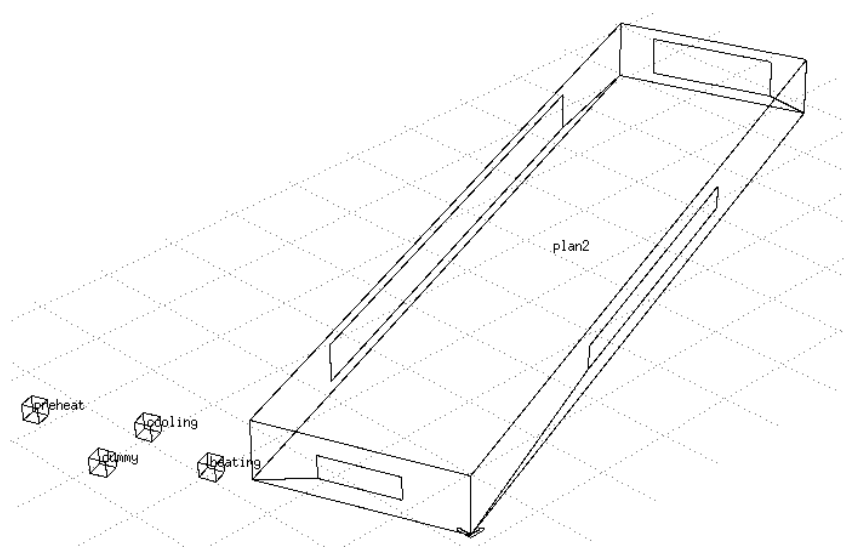
kanaler for transport av ventilasjonsluft i en og samme vertikale sjakt, noe som kan spare både plass og kostnader.

Arealbehov for det/de sentrale aggregatene og tilhørende føringsveier for ventilasjonsluft vil medføre økte kostnader. Dersom det må bygges egne lokaler for å få plass til sentrale aggregater og tilhørende ventilasjonskanaler, eller at de tar opp areal som ellers kunne vært brukt til andre formål, kan det hende at desentraliserte aggregater i etasjen er et kostnadmessig bedre alternativ siden mesaninetasjen på toalettene ellers må kunne sies å ha begrenset nytteverdi.

Når det gjelder energibruk, burde effektiv behovsstyring og høyeffektiv varmegjenvinning være mulig å få til også ved bruk av sentrale aggregater. På tross av at luftføringsveiene nødvendigvis blir noe lengre enn for den desentraliserte løsningen, og da spesielt ved bruk av kun et sentralt aggregat, behøver ikke dette medføre mye større energibruk til viftedrift forutsatt tilstrekkelig dimensjonering av kanalnettet til å unngå store trykkfall. Imidlertid må det resulterende arealbehov samt andre mulige negative konsekvenser forbundet med lange føringsveier tas med i vurderingen, se avsnitt 4.2.

9 Energi og ventilasjonsteknisk analyse av alternative ventilasjonsløsninger for plan 2 i undervisningsfløyene ved Mæla ungdomsskole

For å kunne analysere energibruk og komfort for de alternative ventilasjonsløsningene presentert i avsnitt 5 og avsnitt 8, er det utviklet en generell simuleringsmodell for plan 2 i undervisningsfløyene. Det er valgt å bruke ESP-r [8], som er et avanserte og anerkjente beregningsverktøy for detaljerte dynamiske simuleringer av varme og massetransport i bygninger. Beregningsmodellen er laget så enkel som mulig da en detaljert modell ikke er hensiktsmessig på dette stadium av prosjekteringen. Den er likevel tilstrekkelig avansert for å gi et godt grunnlag for å sammenligne de forskjellige ventilasjonstekniske alternativene.



Figur 13 Beregningsmodellen slik den ser ut i ESP-r's grafiske brukergrensesnitt.

Generelle betingelser for energisimuleringene

Figur 13 viser en illustrasjon av beregningsmodellen slik den ser ut i ESP-r's grafiske brukergrensesnitt. Grunnflaten er 51,2 x 12,8 m (655 m²) og takhøyden satt til 4 m. Modellen er rotert i henhold til plantegningene slik at nord-fasaden er vinklet 20⁰ mot vest. Det er antatt at 40 % av arealet til nord og øst-fasaden består av vindu, mens tallet er 15 % for sør og vest-fasaden.

Konstruksjonsdata:

Vinduer: Pilkington type 4-15-Ot4 (to lag) med en U-verdi på 1,6.

Vegger: Lette vegger isolert med 20 cm glawa. U-verdi: 0.18

Yttertak: Lett tak isolert med 30 cm Glawa. U-verdi: 0.12

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

Eventuelle kuldebroer og utettheter er neglisjert i beregningene.

Grensebetingelser:

Det antas at luften i etasjen under har samme temperatur.

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 °C.

Styring av oppvarming/kjøling

Det forutsettes ideell styring av varmepådraget med følgende setpunkt:

Romoppvarming: 22 °C 07:00-16:00 og 19 °C ellers.

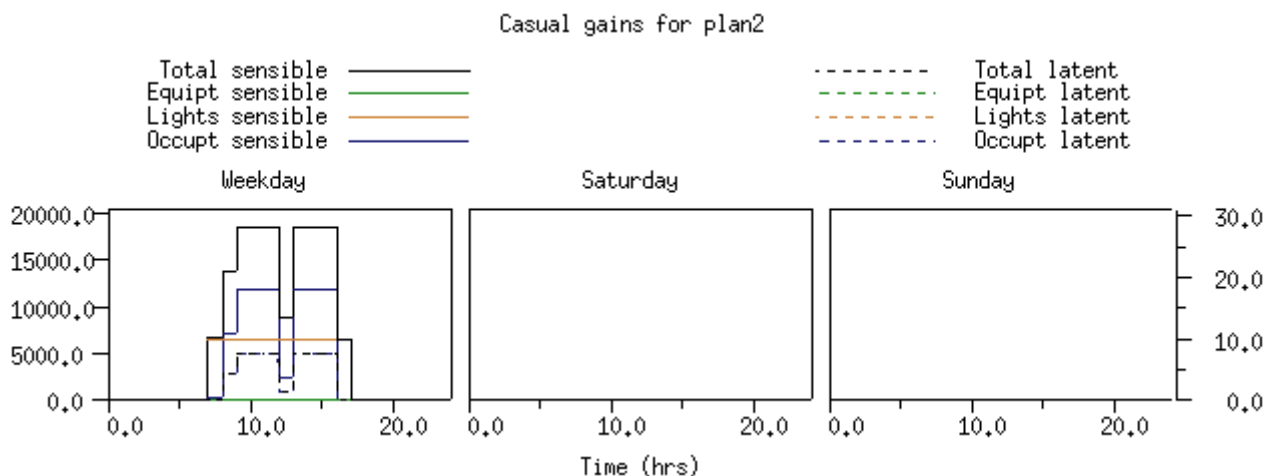
Tilluftstemperatur: 18 °C

Videre benyttes det ikke i noe tilfelle mekanisk kjøling verken lokalt i etasjen eller til kjøling av ventilasjonsluft.

Internlaster og ferieavvikling

Internlastene for en vanlig uke er slik antydnet i Figur 14. Internlasten settes til null i forbindelse med ferieavvikling. Det antas ferieavvikling i følgende perioder:

- Vinterferie: Uke 6
- Påskeferie: Man 10/4- Man 17/4
- Samlet ferie som representerer fridagene i mai: Lørdag 13/5 - Fredag 19/5
- Sommerferie i juli måned.
- Høstferie: Uke 40
- Juleferie: Torsdag 21/12 - Søndag 31/12



Figur 14 Internlastprofil [W] for etasjen (Illustrasjon fra ESP-r's grafiske brukergrensesnitt).

Ventilasjon

Luftmengdene som er angitt gjelder for lufttettheten ved 0 °C. I simuleringene brukes konstante luftmengder i kg/s. Disse fremkommer ved å multiplisere de angitte luftmengder med lufttettheten ved 0 °C (1,293 kg/m³). Den resulterende volumstrømmen vil derfor variere noe i forhold til de angitte verdiene.

Virkingen av infiltrasjon og vinduslufting neglisjeres.

Simuleringene gjøres for hele året 2006 med unntak av juli måned da det antas at etasjen ikke er i bruk, og varme og ventilasjonssystemet følgelig er stengt av. Under øvrige ferier antas det at ventilasjon går som normalt dersom den ikke styres etter behov.

Tidssteg

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

9.1 Tradisjonelt mekanisk anlegg med balanserte luftmengder og sentralt luftbehandlingsaggregat

Ved tradisjonell mekanisk ventilasjon (uten behovsstyring) ventileres etasjen dagtid (07:00 til 16:00) på ukedagene med dimensjonerende total luftmengde basert på veiledningen i TEK, mens den ellers ventileres med dimensjonerende luftmengde for håndtering av materialbelastning.

Beregningene forutsetter enten bruk av ett sentralt aggregat for hele bygningskomplekset (se avsnitt 5.1) eller sentrale aggregat i kjeller i de enkelte bygningene (se avsnitt 5.5). Et sentralt aggregat for hele bygningskomplekset vil medføre noe lengre føringsveier og følgelig større trykktap. Imidlertid er vifter i større aggregater normalt mer energieffektive enn små, slik at vi regner med at energiforbruket til viftedrift kommer noenlunde likt ut. Følgende antagelser er gjort i simuleringene:

- Energieffektivitet varmegjenvinner: 80 %
- Luftmengde man-fre 07:00-16:00: 2,314 kg/s (tilsv. 1790 l/s (6444 m³/h) ved 0 °C)
- Luftmengde man-fre 16:00-07:00 og lø-sø: 0,821 kg/s (tilsv. 635 l/s (2286 m³/h) ved 0 °C)
- Trykkfall for tilluft og avtrekk dagtid/ellers: 1500 Pa /200 Pa
- Resulterende vifteeffekt dagtid/ellers: 2x3,8 kW/2x0,8 kW
- Økning av tilluftstemperaturen pga. varmetap fra vifte og varme ventilasjonskanaler: 2 °C

9.2 Avtrekksventilasjon med tilluft via yttervegg og avtrekksvifter på tak

Det antas at systemet gir mulighet til god styring av tilluftstemperaturen slik at en oppnår effektiv fortregningsventilasjon. Luftmengdene kan følgelig reduseres i henhold til avsnitt 0 - 6.1.5. Systemet kan implementeres praktisk talt uten bruk av ventilasjonskanaler, og trykkfallet blir derfor svært lavt. Imidlertid antas det i utgangspunktet at en ikke gjenvinner varme fra avtrekksluften:

- Energieffektivitet varmegjenvinner: 0 %
- Luftmengde man-fre 07:00-16:00: 1,293 kg/s (tilsv. 1000 l/s (3600 m³/h) ved 0 °C)
- Luftmengde man-fre 16:00-07:00 og lø-sø: 0,821 kg/s (tilsv. 635 l/s (2286 m³/h) ved 0 °C)
- Trykkfall for tilluft og avtrekk dagtid/ellers: 40 Pa /16 Pa
- Resulterende vifteeffekt dagtid/ellers: 0,3 kW/0,1 kW
- Økning av tilluftstemperaturen pga. varmetap fra vifte og varme ventilasjonskanaler: 0 °C

9.3 Veggintegreerte ventilasjonsaggregater med varmegjenvinning

Også for denne løsningen tas det utgangspunkt i benyttelse av fortregningsventilasjon. Aggregatene antas å ha moderat trykkfall samt varmegjenvinning med moderat effektivitet. Ellers blir antagelsene ganske like som for avtrekksystemet over:

- Energieffektivitet varmegjenvinner: 50 %
- Luftmengde man-fre 07:00-16:00: 1,293 kg/s (tilsv. 1000 l/s (3600 m³/h) ved 0 °C)
- Luftmengde man-fre 16:00-07:00 og lø-sø: 0,821 kg/s (tilsv. 635 l/s (2286 m³/h) ved 0 °C)
- Trykkfall for tilluft og avtrekk dagtid/ellers: 40 Pa /16 Pa.
- Resulterende vifteeffekt dagtid/ellers: 3x0,4 kW/3x0,3 kW
- Økning av tilluftstemperaturen pga. varmetap fra vifte og varme ventilasjonskanaler: 0 °C

9.4 Desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene eller sentrale aggregat med minimal bruk av ventilasjonskanaler og dimensjonering for lavt trykkfall

Her tar en utgangspunkt i aggregater med høyeffektiv varmegjenvinning, samt at det benyttes effektiv fortregningsventilasjon og minimalt med ventilasjonskanaler. Følgende antagelser er gjort:

- Energieffektivitet varmegjenvinner: 80 %
- Luftmengde man-fre 07:00-16:00: 1,293 kg/s (tilsv. 1000 l/s (3600 m³/h) ved 0 °C)
- Luftmengde man-fre 16:00-07:00 og lø-sø: 0,821 kg/s (tilsv. 635 l/s (2286 m³/h) ved 0 °C)

- Trykkfall for tilluft og avtrekk dagtid/ellers: 40 Pa /16 Pa.
- Resulterende vifteeffekt dagtid/ellers: 3x0,4 kW/3x0,3 kW
- Økning av tilluftstemperaturen pga. varmetap fra vifte og varme ventilasjonskanaler: 0 °C

9.5 Behovsstyring av lys og ventilasjon

Som tidligere nevnt, vil behovsstyring i gjennomsnitt medføre en reduksjon i luftmengden på 57 % ved CO₂-styring og 46 % ved bruk av bevegelsessensorer [4]. Disse tallene baserer seg imidlertid på sammenligning av CAV- og behovsstyrt ventilasjon. Samme reduksjonen kan altså ikke forventes ved bruk av effektiv fortregningsventilasjon pga. at luftmengdene i utgangspunktet er betydelig lavere. Undersøkelse av tilstedeværelse i 157 klasserom i Oslo regionen viste imidlertid at gjennomsnittlig brukstid pr. klasserom var 4 timer.

Tiden det ventileres med dimensjonerende luftmengder satt til 9 timer, mens det benyttes 10W/m² elektrisk belysning 10 timer for en vanlig skoledag. En kan anta at en vha. behovsstyring kunne ha benyttet minimumsluftmengder i 5 av disse 9 timene, samt halvert bruken av belysning til fem timer. Et grovt overslag for effekten av behovsstyring kan derfor gjøres ved å anta bruk av dimensjonerende luftmengder fra 09:00 til 13:00, og belysning fra 08:00 til 13:00. I tillegg taes det hensyn til at behovsstyringen sikrer bruk av minimumsluftmengder ved ferieavvikling.

Behovsstyring av ventilasjonen er sannsynligvis lettest å få til ved bruk av desentraliserte luftbehandlingsaggregater i etasjene, men bør også gå greit å få til for løsningen skissert i avsnitt 8.2, ”Tilførsel og avtrekk til etasjen via vertikale ventilasjonskanaler.”

Antagelsene for simuleringene gjort med behovsstyring er som følger:

Energieffektivitet varmegjenvinner: 80 %

- Luftmengde man-fre 09:00-13:00: 1,293 kg/s (tilsv. 1000 l/s (3600 m³/h) ved 0 °C)
- Luftmengde man-fre 13:00-09:00 og lø-sø: 0,821 kg/s (tilsv. 635 l/s (2286 m³/h) ved 0 °C)
- Trykkfall for tilluft og avtrekk dagtid/ellers: 40 Pa /16 Pa.
- Resulterende vifteeffekt ved maksimalbehov/ellers: 3x0,4 kW/3x0,3 kW
- Økning av tilluftstemperaturen pga. varmetap fra vifte og varme ventilasjonskanaler: 0 °C

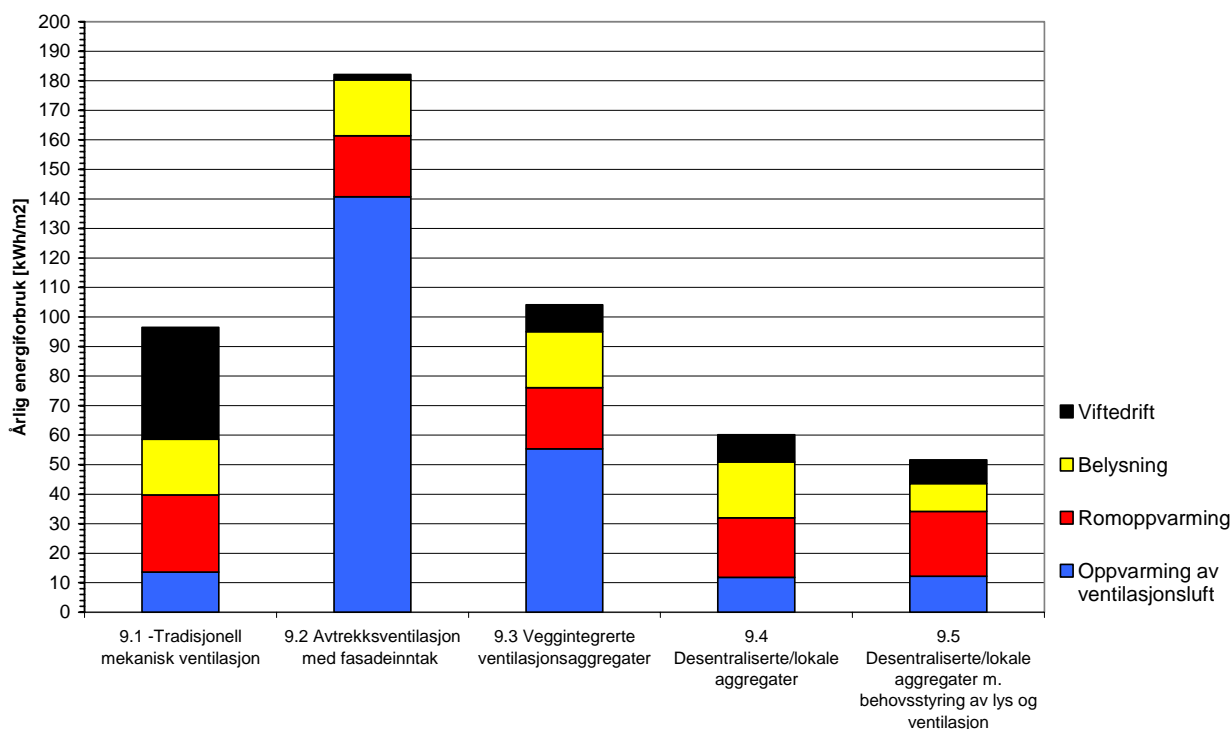
9.6 Energibruk

Figur 15 viser det beregnede årlige energibruk til henholdsvis viftedrift, belysning, romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft for de forskjellige alternativene.

Gjennomsnittlig energibruk til romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft ligger på ca. 150-160 kWh/m² for skolebygg. Vi ser at den beregnede energibruken stort sett er relativt lav i forhold til dette, noe som i all hovedsak skyldes bruk av høyeffektiv varmegjenvinning.

Merk at kuldebroer i konstruksjonen er neglisjert. Det samme gjelder effekten av infiltrasjon. Forøvrig er styringen av varmepådraget ideell, og effektiviteten til varmesystemet satt til 100 %. Dette medfører at energibruken i realiteten blir noe høyere enn resultatene tilsier. Over tid er det også risiko for tilsmussing av varmegjenvinneren, noe som vil redusere effektiviteten på denne.

Energibruk til tappevannsoppvarming og utstyr (PCer, kaffetraktere, vannkokere, kjøleskap e.l.) ikke tatt med i beregningene, slik at disse bidragene kommer i tillegg.



Figur 15 Beregnet energibruk [kWh/m²] for de forskjellige ventilasjonstekniske alternativ.

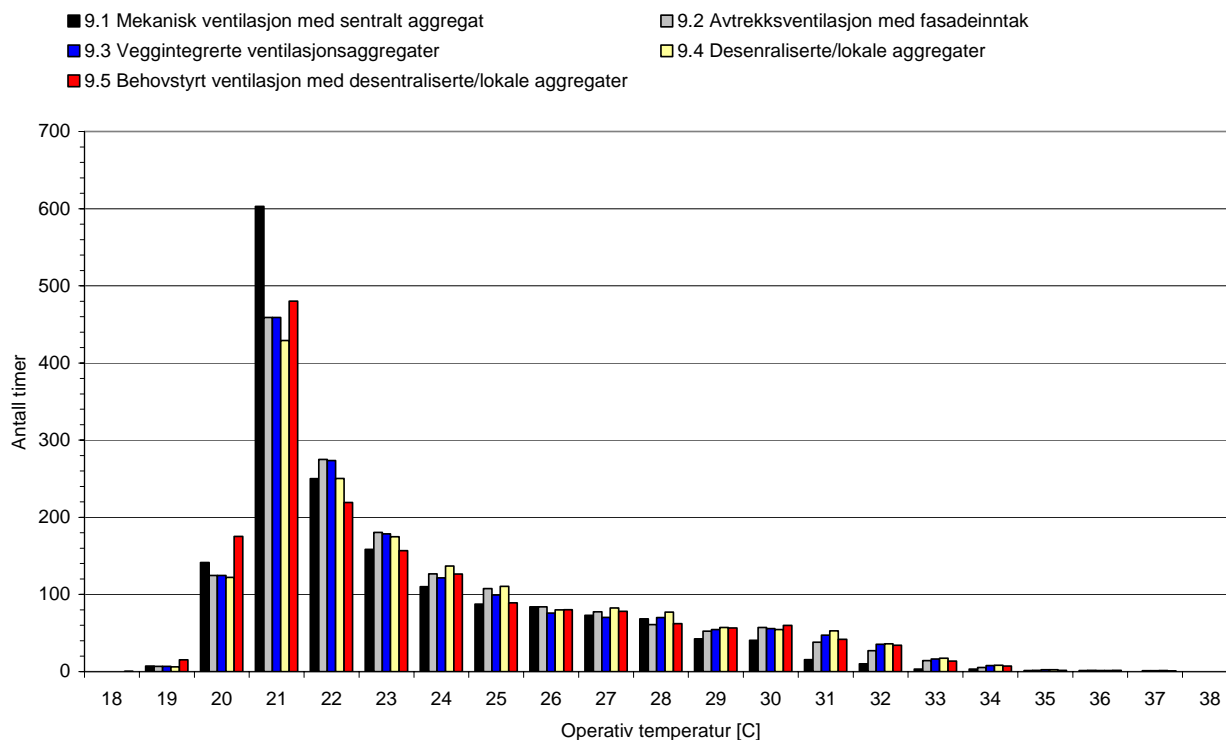
Sammenligning av løsning 9.1 og 9.4, viser at en kan spare ca 36 kWh/m² gjennom å gå ned på luftmengdene i forbindelse med benyttelse av fortrekningsventilasjon. Bare ca 8 kWh/m² av disse omfatter imidlertid energibruk til oppvarming, men dette tallet vil bli større dersom effektiviteten på varmegjenvinneren går ned. Imidlertid er det regnet en kan spare betydelig ca 29 kWh/m² vifteenergi på bruk av lavere luftmengder i kombinasjon med lavere trykkfall i luftføringsveiene.

Den høye effektiviteten på varmegjenvinneren, sammen med at det er liten forskjell på maksimum og minimumsluftmengden, gjør også at effekten av behovsstyring av ventilasjon og belysning med utgangspunkt i løsning 9.4 blir bare 8 kWh/m². Paradoksalt nok øker faktisk behovet for oppvarming av ventilasjonsluft ved behovsstyring pga. reduserte internlaster i form av belysning, og følgelig redusert romtemperatur. Dette medfører at det er mindre varme å gjenvinne, slik at oppvarmingsbehovet øker.

Behovsstyring ville hatt langt større betydning for systemet med avtrekksventilasjon med fasadeinntak. En halvering av luftmengdene her ville kunne medført nesten halvering av energiforbruket til luftoppvarming. Imidlertid viser beregningen at avtrekksventilasjon uten varmegjenvinning i alle tilfelle er ugunstig energimessig. Kombinasjon med en avtrekksvarmepumpe vil likevel kunne forbedre dette betraktelig, og gjøre løsningen mer aktuell.

9.7 Termisk komfort

I tillegg til energiforbruket, ble også den gjennomsnittlige operative (opplevde) romtemperaturen analysert for de forskjellige ventilasjonstekniske løsningene. Den gjennomsnittlige operative temperaturen i et rom er beregnet med utgangspunkt i overflatetemperaturen til alle rommets flater, og gjennomsnittlig lufttemperatur i rommet. Dataene er filtrert med hensyn til tilstedeværelse, slik at temperaturen i ferier, i helgene eller på kveldstid ikke er tatt med. Resultatene er presentert i Figur 16.



Figur 16 Timefordeling av den operative romtemperaturen i hele oppholdstiden for de alternative løsningene uten bruk av naturlig ventilasjon eller mekanisk kjøling.

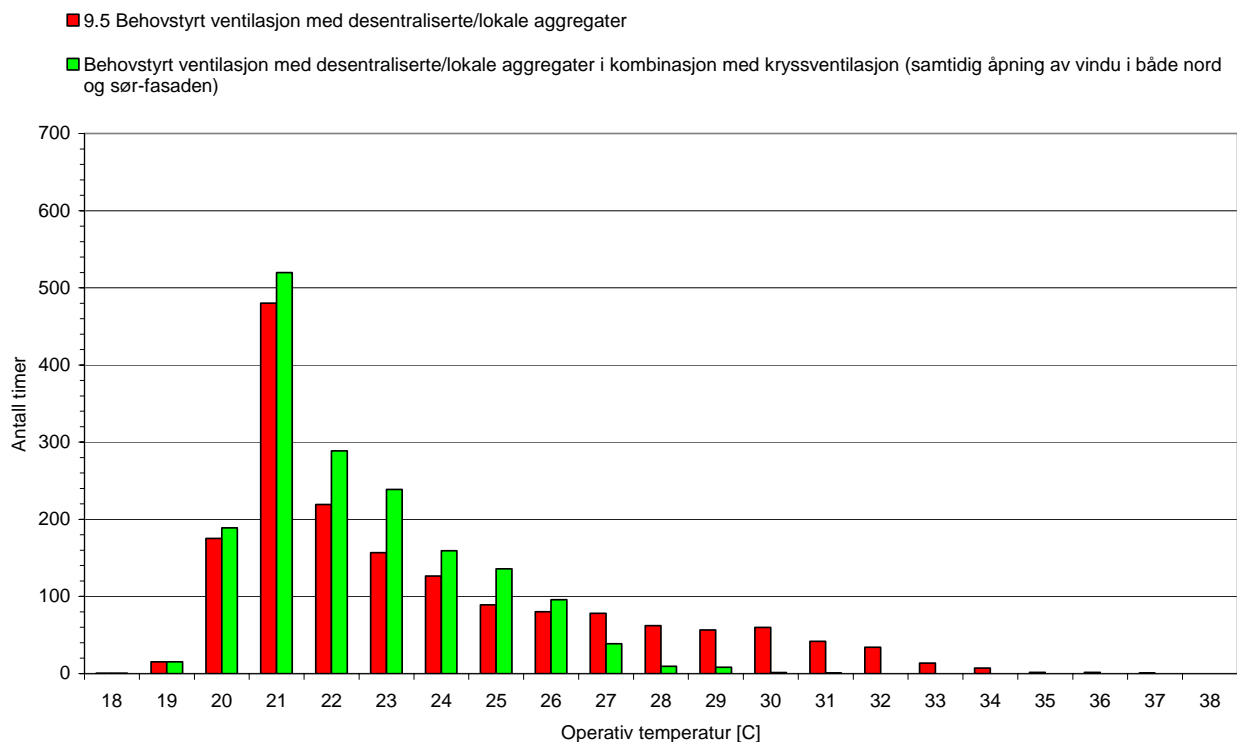
Det er imidlertid viktig å være oppmerksom på at den operative temperaturen i oppholdssonen i etasjen vil være lavere enn den gjennomsnittlige operative temperaturen. Dette da en, takket være fortregningsventilasjon og god takhøyde, vil ha sterk termisk lagdeling i etasjen på varme dager slik at lufttemperaturen i oppholdssonen er betydelig lavere enn gjennomsnittstemperaturen. Dersom tilluftstemperaturen er 20 °C, og temperaturen under tak 30 °C, vil temperaturen ved gulv typisk være 25-26 °C. Dette bør en ta hensyn til ved vurderingen av termisk komfort. Videre bør en også ta hensyn til bekledning og lufthastigheter innendørs. Slike analyser er imidlertid ikke utført i forbindelse med disse innledende beregningene.

Resultatene i Figur 16 viser likevel klart utilfredsstillende høy temperatur for en betydelig andel av oppholdstiden. Dette gjelder alle de ventilasjonstekniske alternativene presentert så langt, det vil si uten bruk av naturlig ventilasjon eller mekanisk kjøling.

9.7.1 Naturlig ventilasjon

For å gjøre en enkel vurdering av potensialet til bruk av naturlig ventilasjon, ble det gjort en ny simulering med tilsvarende betingelser som løsningen presentert i avsnitt 9.5, *Behovsstyring av lys og ventilasjon*, men der en i tillegg antar at vinduer på nord og sør-fasaden åpnes når romtemperaturen overstiger 24°C. Dette gir kryssventilasjon (gjennomtrekk) i lokalene dersom det er vind. Maksimum åpningsareal som tillates er totalt 10m² for hver av fasadene. Merk at dette ikke på noen måte tilsvare noen ideell styring av et system med naturlig ventilasjon, men det gir en pekepinn på potensialet i forhold til å oppnå god termisk komfort uten bruk av mekanisk kjøling. Resultatene er presentert i Figur 17.

Resultatene markerer en markant forbedring av den termiske komforten ved benyttelse av kryssventilasjon, se de grønne søylene i Figur 17.



Figur 17 Timefordeling av den operative romtemperaturen i hele oppholdstiden.

Av figuren ser en at temperaturer over 27 °C nesten ikke forekommer, mens temperaturer opp mot 32-33°C ikke er uvanlig for tilfellet der vinduene holdes stengt, se de røde søylene i Figur 17.

Merk at det foreløpig ikke er gjort beregninger for å undersøke andre passive tiltak som solavskjerming, nattkjøling og benyttelse av tyngre bygningsmaterialer.

10 Referanser

- 1 Wibe Bjørn Aage (08.06.2004) *Ny ungdomsskole på Mæla – Anbefaling konsept luftbehandlingssystem* Notat, Interconsult
- 2 Wibe Bjørn Aage (21.06.2004) *Mæla ungdomsskole – Kostnadsvurdering alternativet luftbehandlingssystem* Notat, Interconsult
- 3 Folden Oscar BJ. (09.07.2004) *Ny ungdomsskole på Mæla – Arealbehov for VVS-rom og sjakter.*
- 4 Mysen Mads., Berntsen Sveinung., Nafstad Per. Schild Peter G. *Occupancy density and benefits of demand controlled ventilation in Norwegian primary Schools*, Vitenskapelig artikkel innsendt for publisering i Energy and Buildings.
- 5 Skisser fra Interconsult AS
- 6 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
- 7 William J. Fisk og Anibal T. De Almeida (1998) *Sensor-based demand-controlled ventilation: a review* Energy and Buildings, Volume 29, Issue 1, side 35-45
- 8 Clarke J A (2001) *Domain Integration in Building Simulation*, Energy and Buildings, 33(4), pp303-8.