

BJØRN JENSSEN WACHENFELDT OG TOR HELGE DOKKA

# Mot passivhusstandard i undervisningsbygg Mæla smartbygg – Sluttrapport

Prosjektrapport 10

2008



SINTEF Byggforsk

# **Mot passivhusstandard i undervisningsbygg Mæla smartbygg – Sluttrapport**

Prosjektrapport 10 – 2008

Prosjektrapport 10

Bjørn Jenssen Wachenfeldt og Tor Helge Dokka

**Mot passivhusstandard i undervisningsbygg  
Mæla smartbygg – Sluttrapport**

Emneord:

Bygningsintegrert design, energi, passivhus

Building integrated design, energy, passive houses

ISSN 0801-6461

ISBN 978-82-536-1006-1

Prosjektnr. 50102100

35 eks. trykt av AIT AS e-dit

Innmat: 100 g scandia

Omslag: 240 g trucard

© Copyright SINTEF Byggforsk 2008

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverklovens bestemmelser. Uten særskilt avtale med SINTEF Byggforsk er enhver eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseorgan for rettighetshavere til åndsverk. Utnyttelse i strid med lov eller avtale kan medføre erstatningsansvar og inndragning, og kan straffes med bøter eller fengsel.

Adr.: Forskningsveien 3 B  
Postboks 124 Blindern  
0314 OSLO

Tlf.: 22 96 55 55

Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08

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

## Sammendrag

SINTEF har i samarbeid med prosjekteringsgruppen for Mæla Skole arbeidet for å komme frem til smarte og helhetlige løsninger som gjør at en oppnår god komfort med lav energibruk, lav miljøbelastning og lave investeringskostnader. Prosjektet har fått navnet ”Mæla Smartbygg”. Med utgangspunkt i de konseptuelle løsningene som er valgt vil Mæla Skole kunne bli et av landets mest energieffektive undervisningsbygg. Dersom en skal være sikker på å nå målsetningen om at behovet for levert energi ikke skal overstige  $80 \text{ kWh/m}^2$ , forutsetter dette at løsningene tilfredsstiller kravspesifikasjonen utarbeidet med utgangspunkt i energimålsetningen for bygget, samt at varme- og ventilasjonsteknisk utstyr blir driftet optimalt.

Dersom det reelle forbruket skal komme ned mot beregnet energibehov, kreves det bevisste brukere som ikke bidrar til sløsing av energi. Videre må styringen av varme og ventilasjon fungere optimalt, og settpunkt for oppvarming, ventilasjon må settes riktig. I tillegg er en avhengig av driftspersonell med god innsikt i hvordan en slik bygning fungerer og at driftsansvarlig evner å drifte den på en tilnærmet optimal måte.

I utformingen av de konseptuelle varme- og ventilasjonstekniske løsningene ble det i tillegg til fokus på energieffektivitet lagt stor vekt på å komme frem til alternativer som også bidrar positivt i forhold til arkitektur og innemiljø. Generelt er behovet for ventilasjonskanaler redusert til et minimum, og den mekaniske ventilasjonen er dimensjonert med hensyn til luftkvalitet. Termisk komfort er sikret ved hjelp av passive tiltak som naturlig ventilasjon, solavskjerming og utnyttelse av termisk masse i tak, vegger og gulv. Valget av vindu og vegger med gjennomskinnelig isolasjon innebar noe økt risiko for at det ville kunne bli for varmt i undervisningsfløyene i 2. etasje i varme og solrike perioder. Ettersom disse lokalene pga. skoleferien normalt ikke vil være i bruk sommerstid ble likevel tiltakene i form av solavskjerming, naturlig ventilasjon og nattkjøling (utlufting av overskuddsvarme om natten) vurdert som tilstrekkelige til å sikre akseptabel termisk komfort gjennom skoleåret.

Av branntekniske årsaker har løsningene med gjennomskinnelig isolasjon blitt omprosjektert i etterkant. Dette har konsekvenser både i forhold til energi og innemiljø, men det er ikke gjennomført noen detaljerte analyser av disse endringene av SINTEF i dette prosjektet.



# Innhold

<b>1</b>	<b>Bakgrunn</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Målsetninger</b> .....	<b>7</b>
	Energimålsetning .....	7
	Kostnadmålsetning .....	8
<b>3</b>	<b>SINTEFs rolle i prosjektet</b> .....	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Kravspesifikasjon</b> .....	<b>9</b>
<b>5</b>	<b>Utvikling av varme- og ventilasjonskonsept</b> .....	<b>10</b>
5.1	Generelt.....	10
5.2	Kjellerplan .....	10
5.3	Plan 1 .....	11
5.4	Plan 2 .....	13
<b>6</b>	<b>Styring og valg av settpunkt</b> .....	<b>17</b>
6.1	Styring – tillufts- og romtemperatur .....	17
6.2	Styring – naturlig ventilasjon vs. romoppvarming.....	17
<b>7</b>	<b>Omprosjektering</b> .....	<b>18</b>
<b>8</b>	<b>Konklusjoner</b> .....	<b>19</b>
<b>9</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>20</b>



# 1 Bakgrunn

På oppdrag fra Pir II arkitektkontor og COWI (tidligere Interconsult ASA), har SINTEF i løpet av 2004 utredet alternative ventilasjonsløsninger og gjort romklimatiske vurderinger av 2. etasje av undervisningsfløyene. Utredningene er presentert i SINTEF rapportene STF22 A04512 [1] og STF22 A04515 [2].

Under prosjekteringsmøtet i Skien 8. desember 2004 orienterte så SINTEF ved Tor Helge Dokka og Bjørn J. Wachenfeldt om mulighetene for et lavenergikonsept for skolen. Det ble søkt om prosjekteringsstøtte fra Enovas program: *Energibruk - nye næringsbygg*. Søknaden ble innvilget støtte på 210 kkr. Ved årsskiftet 2004–2005 inngikk SINTEF kontrakt med Skien kommune om å bistå prosjekteringsgruppen som spesialrådgiver.

Hensikten med SINTEFs deltagelse er å bidra til at Mæla skole blir et demonstrasjonsprosjekt der en viser hvordan en ved hjelp av smarte og helhetlige løsninger oppnår god komfort med lav energibruk, lav miljøbelastning og lave investeringskostnader. Skolen er et pilotbygg i et forskningsprosjekt ved NTNU og SINTEF kalt ”*Smartbygg – Fremtidens smarte energieffektive bygg*”.

Denne rapporten beskriver i korte trekk de konseptuelle valgene som ble gjort, og bakgrunnen for disse.

## 2 Målsetninger

Hovedmålet for SINTEFs deltagelse er at Mæla skole skal bli Norges første skole med passivhusstandard, og at dette skal realiseres med høy fokus på innemiljø, og innenfor kostnadsrammer som medfører økonomisk lønnsomhet for byggherre.

### Energimålsetning

I gjennomsnitt ligger totalt årlig netto energiforbruk for norske skolebygninger på rundt 200 kWh/m<sup>2</sup>.<sup>i</sup> Selv om isolasjonsstandarden i våre bygninger har økt kraftig de siste 30–40 årene, og det er blitt mer vanlig med balansert ventilasjon med varmegjenvinning, er det en tendens til at den spesifikke energibruken i bygninger øker. Når det gjelder skolebygg, viser en studie utført av Enova at spesifikk energibruk i nye og eldre skoler er omtrent lik<sup>ii</sup>. Et energiforbruk på 200 kWh/m<sup>2</sup> er derfor et realistisk referansenivå for Mæla skole.

Et av hovedmålene for prosjektet er passivhusstandard for de deler av Mæla skole der dette lar seg gjennomføre med utgangspunkt i gjeldende planer. Dette innebærer at følgende krav må oppfylles:

- Totalt *spesifikt netto energibehov* til romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft skal ikke overstige 15 kWh/m<sup>2</sup> år.
- Total installert *effekt* for romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft skal ikke overstige 10 W/m<sup>2</sup>
- Energibruk til viftedrift skal ved dimensjonerende luftmengder ikke overstige 1,5 kW per m<sup>3</sup>/s med ventilasjonsluft (maks SFP=1,5 kW/m<sup>3</sup>/s).
- Byggets tetthet skal tilfredsstille kravet om maksimalt 0,6 luftskifter per time ved et overtrykk på 50 Pa.
- Gjennomsnittlig U-verdi for vindu med ramme skal ikke overstige 0,8 W/m<sup>2</sup> K.
- Mekanisk kjøling skal unngås.

<sup>i</sup> Bygningsnettverkets energistatistikk – Årsrapport 2002, Enova SF (2003)

<sup>ii</sup> Byggstudien 2002 - Grunnlag for utvikling og tilpasning av programmer for å fremme energireduksjon og bruk av fornybar energi innenfor byggenæringen, Enova SF (2003)



Med utgangspunkt i disse kravene, er energimålsetningen for passivhusdelen av Mæla Skole at totalt spesifikt netto energibehov ikke skal overstige 60 kWh/m<sup>2</sup> år.

For å tilfredsstille dette kravet kan følgende tjene som utgangspunkt for maksimalt spesifikt netto energibehov fordelt på formål:

Romoppvarming og oppvarming av ventilasjonsluft	15	kWh/m <sup>2</sup> år
Varmtvann	20	kWh/m <sup>2</sup> år
Vifter og pumper	7	kWh/m <sup>2</sup> år
Belysning	7	kWh/m <sup>2</sup> år
Diverse	11	kWh/m <sup>2</sup> år
Kjøling	0	kWh/m <sup>2</sup> år

Valg som allerede var tatt før SINTEF ble engasjert i prosjektet gjør likevel at passivhusstandard ikke er realistisk for alle deler av bygget uten at det får store uønskede konsekvenser for arkitektur og/eller kostnader. Spesielt gjelder dette de delene av bygget der det er benyttet moderat isolasjonstykkelse, gjennomskinnelig isolasjon eller en stor andel glass i fasadene. For disse delene av bygget er målsetningen nedjustert til lavenergistandard med et spesifikt energibehov under 90 kWh/m<sup>2</sup> år.

For bygget som helhet er målsetningen at behovet for levert energi i gjennomsnitt skal være under 80 kWh/m<sup>2</sup> år, det vil si ca. 40 % av forbruket til et typisk referansebygg.

## Kostnadmålsetning

Målsetningen om passivhusstandard og energimålsetningen fremsatt over skal realiseres innenfor en kostnadsramme som medfører økonomisk lønnsomhet for byggherre.

Om energimålsetningen nås, vil dette medføre en besparelse i netto energiforbruk på ca. 720 000 kWh/år. Om en antar en energipris på 0,65 øre/kWh, medfører dette følgelig driftsmessige kostnadsbesparelser på ca. 470 000 kr/år.

## 3 SINTEFs rolle i prosjektet

SINTEFs rolle i prosjektet har hovedsakelig vært å være konsulent og samarbeidspartner for den øvrige prosjekteringsgruppen. I samarbeid med prosjekteringsgruppen har SINTEF:

- utarbeidet prosjekteringsgrunnlag i form av utredninger og beregninger
- utarbeidet byggteknisk og systemteknisk kravspesifikasjon
- arbeidet for å finne frem til konseptuelle, byggtekniske og systemtekniske løsninger i overensstemmelse med kravspesifikasjon og prosjektets målsettinger

I tillegg har SINTEF:

- deltatt på oppstartsseminar i Skien med byggherre, entreprenør og prosjekteringsgruppe
- avholdt seminar for håndverkere og formenn på byggeplass
- i noen grad fungert som støttespiller for byggeleder med hensyn til kvalitetssikring

## 4 Kravspesifikasjon

Med utgangspunkt i forprosjekt ble det gjennomført beregninger for å komme frem til en kravspesifikasjon i samsvar med energimålsetningen i *Mæla smartbygg*-prosjektet.

Kravspesifikasjonen ble diskutert og etablert som grunnlag for prosjekteringen i et eget møte med prosjekteringsgruppen 10.12.2004, se Tabell 1 under.

Tabell 1 Kravspesifikasjon utformet med hensyn til energimålsetningene for Mæla smartbygg

Tiltak/område	SPEK	Aktuelle løsninger og aktuell teknologi
Yttervegg, alt. 1 Yttervegg, alt. 2	$U < 0.13 \text{ W/m}^2\text{K}$ $U < 0.28 \text{ W/m}^2\text{K}$	Alt. 1. Bindingsverksvegg med til sammen 300 mm isolasjon. (Vindusfelt og fasader av aluminium anbefales ikke!) Alt. 2. 200 mm ISOFLEX transparent isolasjon Effektiv U-verdi kan bli lavere på grunn av solabsorpsjon.
Yttertak	$U < 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$	For eksempel oppforet tak med 450-500 mm isolasjon
Gulv på grunn	$U < 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$	Gulv på grunn med 250–300 mm isolasjon (EPS)
Vegger under grunnen	$U < 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$	Betongvegger mot grunnen med 250-300 mm isolasjon (EPS), eventuelt kombinert med innvendig isolering
Vinduer	$U < 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$ Ikke kaldras	Trelags koblet rute (4-12-4-38), 2 lav E-belegg, krypton-gass, rustfri stål-spacer, ekstra tykk koblet trekarm. I rom for stillesittende arbeid skal vindushøyde begrenses slik at ikke genererende kaldras oppstår selv uten oppvarming.
Dører	$U < 0.85 \text{ W/m}^2\text{K}$	Godt isolerte dører med ekstra isolering og glassdører med superisolert glass og rustfri stålspacer
Kuldebroer	$\psi < 0.01 \text{ W/mK}$	Alle betong- og stålkonstruksjoner må ha minimum 100 mm isolasjonsbrudd, helst mer. Ingen gjennomgående eller utkragede bygningsdeler i stål, aluminium eller betong. Vindusfelt og fasader av aluminium anbefales ikke!
Lufttetthet	$n_{50} < 0.6 \text{ oms/h}$	Dobbel vindtetning gjennomført der mulig, rullprodukt på vegg, bunnfyllingslist + fugemasse og klemt "papp" rundt vinduer og dører, meget nøye tetting rundt tekniske gjennomføringer, prosjekterte og KS løsninger overgang mur/tre. KS av håndverksmessig utførelse.
Ventilasjonsanlegg	Luft: $9/2 \text{ m}^3/\text{hm}^2$ $\eta > 83 \%$ , $\text{SFP} < 1.5 \text{ kW/m}^3/\text{S}$	Høyeffektivt roterende gjenvinner, noe overdimensjonert aggregat med lite systemtap (trykk), korte føringsveier(kanaler) med lite trykktap. Behovsstyrt ventilasjon etter tilstedeværelsesstyring og tidsstyring.
Belysning	$Q_{\text{lys}} < 7 \text{ kWh/m}^2$	Energieffektiv belysning (T5-rør) med minimum tilstedeværelsesstyring, eventuelt dagslysstyring
Oppvarming, alt. 1 Oppvarming alt. 2	$Q_{\text{oppv}} < 15 \text{ kWh/m}^2$ $Q_{\text{oppv}} < 20 \text{ kWh/m}^2$	Kan dekkes av små radiatorer i hvert rom. Anbefales ikke å bruke vannbåret gulvvarme, bortsett fra i våtrom og eventuelt garderobe.
Energiforsyning	Fornybar energi som dekker deler av termisk behov	Biopellets eller varmepumpeløsning som dekker det meste av tappevannsforbruket og deler av oppvarmingsbehovet. Unngå oljekjel, har en negativ miljøprofil!

## 5 Utvikling av varme- og ventilasjonskonsept

Med utgangspunkt i forprosjektet har de konseptuelle løsningene for varme og ventilasjon blitt modifisert.

### 5.1 Generelt

#### Ventilasjonskonsept

Generelt er det planlagt behovsstyring for all ventilasjon, og det er benyttet fortrenningsventilasjon for alle rom som egner seg for dette. Den mekaniske ventilasjonen er dimensjonert med hensyn til luftkvalitet, mens termisk komfort er sikret ved hjelp av passive tiltak som naturlig ventilasjon, solavskjerming og utnyttelse av termisk masse i tak, vegger og gulv. Når det gjelder den totale kostnaden for et ventilasjonsanlegg, utgjør gjerne kostnaden relatert til kanalsystemet mer enn 50 % av totalen. I tillegg medfører lange kanalstrekk høyere trykkfall i kanalnettet og større fare for uønsket oppvarming/nedkjøling av ventilasjonsluften. Dette medfører igjen høyere energibruk i driftsfasen. På grunn av dette ble det i smartbygg-delen av prosjektet fokusert på å redusere behovet for ventilasjonskanaler, og legge til rette for effektiv ventilasjon og bruk av ventilasjonsaggregater med høyeffektiv varmegjenvinning.

Ønsket om å bruke gjennomskinnelig isolasjonsmateriale type Moniflex i en stor del av ytterveggene gjør at lokalene blir mer utsatt for solvarme, noe som gir en ekstra utfordring i forhold til termisk komfort på varme dager. Mangelfull erfaring med- og data for denne typen veggkonstruksjon gjorde det også vanskelig å beregne temperaturutviklingen i lokalene med Moniflex i ytterveggene. Det ble gjort en rekke simuleringer for å finne frem til løsninger som gav akseptabel termisk komfort. Resultatene indikerte at gjennom å kombinere utvendig solavskjerming med styrt naturlig ventilasjon ville det være mulig å oppnå akseptabel termisk komfort til tross for omfattende bruk av gjennomskinnelig isolasjon.

#### Oppvarming

Etter å ha utredet forskjellige alternative oppvarmingsløsninger for skolen anbefalte prosjekteringsgruppen en løsning der grunnlasten dekkes av jordvarme ved hjelp av varmepumper, og spisslastdekning med gass eller olje. Gass har neglisjerbare partikkelutslipp og betydelig lavere utslipp av CO<sub>2</sub> enn olje, og dessuten fordeler med hensyn til vedlikehold (mindre problemer med soting). SINTEF anbefalte derfor en løsning med gass som spisslastdekning. Av økonomiske årsaker ble det likevel valgt en løsning med oljebrenner.

### 5.2 Kjellerplan

#### Ventilasjon

Kjellerplanet består av flerbrukshallens nedre del, garderobeanlegg og diverse tekniske rom. Forprosjektet tok utgangspunkt i at et sentralt aggregat plassert i teknisk rom skulle forsyne hele bygget med ventilasjonsluft. Etter hvert som ventilasjonskonseptet for 1. etasje og 2. etasje ble utviklet (se beskrivelse i de neste avsnitt), ble det funnet mer hensiktsmessig at det sentrale aggregatet i kjeller kun skulle betjene flerbrukshall, garderobeanlegg samt de rommene i 1. etasje som lå nærmest teknisk rom der aggregatet var plassert. Dette for å minimalisere behov for ventilasjonskanaler.

Dette medførte betydelig reduksjon i dimensjonerende luftmengder for aggregatet. Kravet om temperaturvirkningsgrad > 83 % medførte likevel problemer med å få plass til aggregatet på grunn

av den nødvendige dimensjonen på den roterende varmegjenvinneren. Dette problemet ble løst ved å erstatte veggen mellom korridor og teknisk rom i kjeller med en port-løsning, slik at korridorarealet kunne benyttes til å betjene aggregatet.

Ventilasjonsløsningen for kjellerplanet ble forøvrig planlagt med fokus på å minske behovet for ventilasjonskanaler, samt sikre seg mot trekkproblematikk i forbindelse med fortrenningsventilasjon i flerbrukshallen.

På grunn av at det ble planlagt benyttet gjennomskinnelig isolasjon type Moniflex i en stor del av ytterveggene i flerbrukshallen, ble det satt spørsmålsteget ved temperaturutviklingen på varme dager.

Simuleringer viste at gjennom å legge til rette for naturlig ventilasjon med gjennomtrekk ville termisk komfort bli akseptabel. Både NØ, NV og SV-fasaden ble derfor utstyrt med motorstyrte vindu nær taket. Ved å styre vinduene etter innetemperatur slik at vinduene åpnes når innetemperaturen når et visst nivå, og åpningsarealet økes gradvis med innetemperaturen, begrenses problemet med at det blir for varmt i hallen.

I tillegg er det lagt til rette for at døren i hallens nordvestre del kan åpnes ved behov. Når dette gjøres vil luft normalt strømme inn gjennom døren og fortrenge varm luft ut gjennom de motorstyrte vinduene oppunder tak, slik at luften blir skiftet ut effektivt.

### **Oppvarming**

Flerbrukshallen blir varmet opp ved hjelp av strålingskonvektorer i tak. Ellers er det gulvvarme i dusj og garderober.

## **5.3 Plan 1**

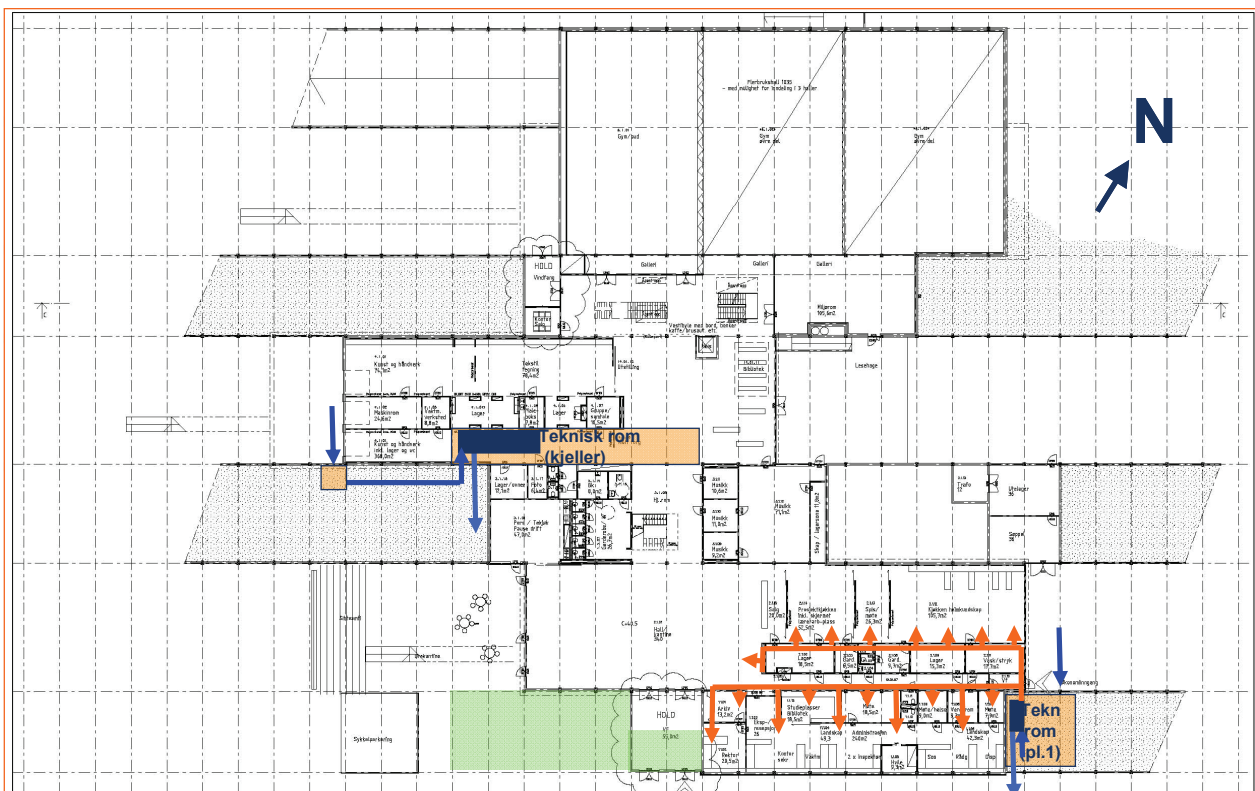
### **Ventilasjon**

Den opprinnelige ventilasjonsløsningen for 1. etasje var basert på mekanisk ventilasjon fra det sentrale aggregatet plassert i kjeller. Den lange avstanden mellom aggregat og mange av rommene aggregatet var ment å betjene ville imidlertid medført et omfattende behov for lange ventilasjonskanaler. Samtidig var det problemer med å få plass til et aggregat med tilstrekkelig ytelse i henhold til kravspesifikasjonen.

En løsning med lokale aggregater plassert i himling i tilknytning til de forskjellige rom ble vurdert. En kom imidlertid til at en bedre løsning ville være å etablere et eget teknisk rom i 1. etasje i tilknytning til kontorfløy/heimkunnskapsavdeling på grunn av stort ventilasjonsbehov i disse sonene og at de ligger langt unna det sentrale aggregatet i kjeller.

Etter å ha vurdert en rekke alternative plasseringer kom en frem til at den mest hensiktsmessige løsningen med hensyn til luftinntak og avkast, behov for ventilasjonskanaler, energieffektivitet og økonomi var å bygge et eget teknisk rom utenfor kontorfløyens yttervegg mot øst, se Figur 1. Her ble det planlagt installert et større ventilasjonsaggregat for betjening av heimkunnskapsavdeling, administrasjonsfløy i 1. etasje samt østre del av kantine slik de oransje pilene i Figur 1 viser.

Dette gav mulighet til å redusere lengden på ventilasjonskanaler drastisk ettersom korridoren mellom heimkunnskapsfløy og administrasjonsfløy hadde god takhøyde og følgelig plass til ventilasjonskanalene. Ved benyttelse av ventiler for bakkantinnblåsning inn i kontorene via kanaler gjennom veggen som skiller korridor og administrasjonsfløy ville dette dessuten redusert antall synlige kanaler i administrasjonsfløyen til et minimum.



Figur 1 Plassering av teknisk rom og luftinntak/avkast i plan 0 (kjeller) og 1. etasje i forhold til planløsningen for 1. etasje av Mæla skole. Grønt felt illustrerer netting for vekst av planter i flukt med taket av kantine. Plantene vil bidra til solavskjerming, og gjør at en unngår utvendige persiener. De oransje pilene viser konseptuell løsning for tilluftssystemet fra aggregatet i teknisk rom i 1. etasje. Kantinens sørøstre del tenkes ventilert ved hjelp av dette aggregatet, mens den nordvestre delen tenkes ventilert via ventilasjonsaggregatet i kjeller.

I detaljprosjekteringen ble det, av grunner SINTEF ikke kjenner til, likevel valgt å legge kanalene fra teknisk rom til administrasjonsfløy via heimkunnskapsavdelingen.

De øvrige delene av 1. etasje (bibliotek, håndverksavdeling, musikkrom, nordlig del av kantine, toaletter etc.) ligger nær det sentrale aggregatet i kjeller, og ble derfor planlagt betjent av dette aggregatet.

SINTEF konkluderte med at det ikke ville være nødvendig med ettervarmebatteri for det nye aggregatet i 1. etasje på grunn av den høye temperaturvirkningsgraden for varmegjenvinneren. Dette innebærer en viss risiko for at tilluftstemperaturen i ekstremt kalde perioder blir lavere enn ønskelig, men risikoen for trekkproblematikk kan reduseres/elimineres ved å styre viftedraget etter tilluftstemperaturen slik at en reduserer lufthastigheten noe på de aller kaldeste dagene. Dette medfører noe redusert luftskifte på ekstremt kalde dager, men samtidig vil det bidra til noe høyere luftfuktighet inne, noe som påvirker innneklimaet i positiv retning.

Dette tekniske rommet kunne derfor konstrueres som et uoppvarmet, uisolert rom i betong utenfor ytterveggen av kontorfløyen. Ved å ta tilluften direkte inn i rommet før den suges inn i aggregatet utnyttes også den termiske massen i rommet til passiv oppvarming i ekstremt kalde perioder, og passiv kjøling på varme sommerdager.

I detaljprosjekteringsfasen ble det likevel besluttet å installere ettervarmebatteri for aggregatet.

I heimkunnskapsavdelingen er komfyrene utstyrt med avtrekksløsning direkte ut i friluft som skal benyttes i forbindelse med matlaging.

Før det ble besluttet å bygge et nytt teknisk rom øst for administrasjonsfløyen, ble en løsning med teknisk rom nord for heimkunnskapsfløyen vurdert. Dette ble tenkt kombinert med kulvert under heimkunnskapsfløyen for passiv klimatisering av tilluften (passiv kjøling sommerstid og oppvarming vinterstid gjennom varmeveksling med kulvert-veggene).

Simuleringer for de delene av 1. etasje som vender mot sør (kantine og kontorfløy) viste at det ikke var nødvendig med spesielle ventilasjonstiltak for å sikre akseptabel termisk komfort på varme dager. Sammen med kostnads- og risikovurderinger gjorde dette løsningen uaktuell.

Simuleringsresultatene for 1. etasje viste at det var mulig å oppnå god termisk komfort selv med luftmengder dimensjonert med hensyn til luftkvalitet. Dette til tross for at det benyttes spesielt lave luftmengder som følge av fortrenningsventilasjon i heimkunnskapsavdeling og kantine (mer effektiv ventilasjon).

### **Oppvarming**

1. etasje vil bli oppvarmet ved hjelp av konvektorer med varme fra varmpumper og oljekjel i teknisk rom i kjeller. Ettersom en i detaljprosjekteringen valgte å utstyre ventilasjonsaggregatet i 1. etasje med ettervarmebatteri, ble det også planlagt en egen varmesløyfe ut til dette.

## **5.4 Plan 2**

### **Ventilasjon**

Dimensjonerende ventilasjonsluftmengde for hver av undervisningsfløyene i 2. etasje ble med utgangspunkt i veiledningen til byggforskriften (TEK) beregnet til 1790 l/s (6444 m<sup>3</sup>/h) forutsatt bruk av lavemitterende materialer. På grunn av god takhøyde lå imidlertid forholdene godt til rette for bruk av fortrenningsventilasjon. På grunn av den bedre ventilasjonseffektiviteten ved bruk av fortrenningsventilasjon ble det konkludert med at tilsvarende luftkvalitet kan oppnås med reduserte luftmengder. Beregninger viste at luftmengdene derfor kunne reduseres fra 1790 l/s (6444 m<sup>3</sup>/h) til 1000 l/s (3600 m<sup>3</sup>/h) for hver undervisningsfløy [1]. Fortrenningsventilasjon gjorde i tillegg at horisontale ventilasjonskanaler i fløyene kunne unngås helt, noe som var gunstig med hensyn til estetikk, trykkfall i kanalnettet og kostnader. Fortrenningsventilasjon ble derfor valgt som ventilasjonsprinsipp for undervisningsfløyene i 2. etasje

I lys av dette ble det gjort vurderinger av om den mekaniske ventilasjonen av undervisningsfløyene burde besørges av et sentralt aggregat, flere sentrale aggregater i nærheten av fløyene eller lokale aggregater i selve undervisningsfløyene. Det ble konkludert med at en løsning med aggregatene plassert i fløyene var mest fordelaktig på grunn av:

- at aggregatene kunne integreres i tilknytning til toalettseksjoner i fløyene uten å redusere nyttig areal i fløyene nevneverdig. Løsningen gjør derfor at en unngår behov for egne tekniske rom.
- at en unngår plass- og kostnadskreven ventilasjonskanaler (gjennom dekker og skillevegger) mellom teknisk(e) rom og undervisningsfløyene
- enkel styring ettersom hvert aggregat har eget styringssystem, og derfor kan styres etter behov uavhengig av driften til de andre aggregatene

En første beregningsmodell for en typisk undervisningsfløy ble laget med beregningsverktøyet ESP-r, og energibruk og komfort analysert ved hjelp av dynamiske simuleringer. Beregningene viste at den lokale løsningen med fortrenningsventilasjon samt behovsstyring av ventilasjon og lys basert på tilstedeværelsessensorer ville redusere energibehovet til oppvarming, ventilasjon og belysning med 46 % i forhold til en tradisjonell mekanisk løsning uten behovsstyring [1].

Selv om disse beregningene forutsatte en standard bindingsverksvegg med mineralull (og ikke gjennomskinnelig isolasjon) viste simuleringsresultatene at det var nødvendig med tiltak for å bedre termisk komfort i varme perioder.

Målsetningen om å unngå mekanisk kjøling pekte i retning av en løsning med økte luftmengder for å bli kvitt overskuddsvarme og skape behagelig luftbevegelse i lokalene. Imidlertid er det problematisk å benytte fortreningsventilasjon til dette formål på grunn av trekkproblematikken. Simuleringsresultatene indikerte at det i alle tilfelle vil bli ubehagelig varmt i lokalene på varme dager dersom en kun benytter mekanisk ventilasjon uten kjøling.

#### **Tiltak for bedring av termisk komfort med standard bindingsverksvegg**

De innledende beregningene indikerte imidlertid at åpning av vinduer i nordfasaden og sørfasaden samtidig for å skape gjennomtrekk i lokalene var et svært effektivt kjøletiltak [1]. Videre utredning av denne strategien viste at dette kunne la seg gjennomføre ved hjelp av automatisk styring av høyt plasserte dagslysvinduer. For å utrede hvor stor vindusåpning (lysåpning) som er nødvendig for å skape akseptable termiske forhold ble det gjort mer detaljerte simuleringer [2]. Forutsatt standard bindingsverksvegg med opak isolasjon indikerte resultatene at 1,5 m<sup>2</sup> lysåpning i nordfasaden og sørfasaden, samt 0,5 m<sup>2</sup> i østfasaden og vestfasaden vil gi tilstrekkelig lufting til å holde den operative romtemperaturen under 26 °C bortsett fra noen timer på de aller varmeste dagene.

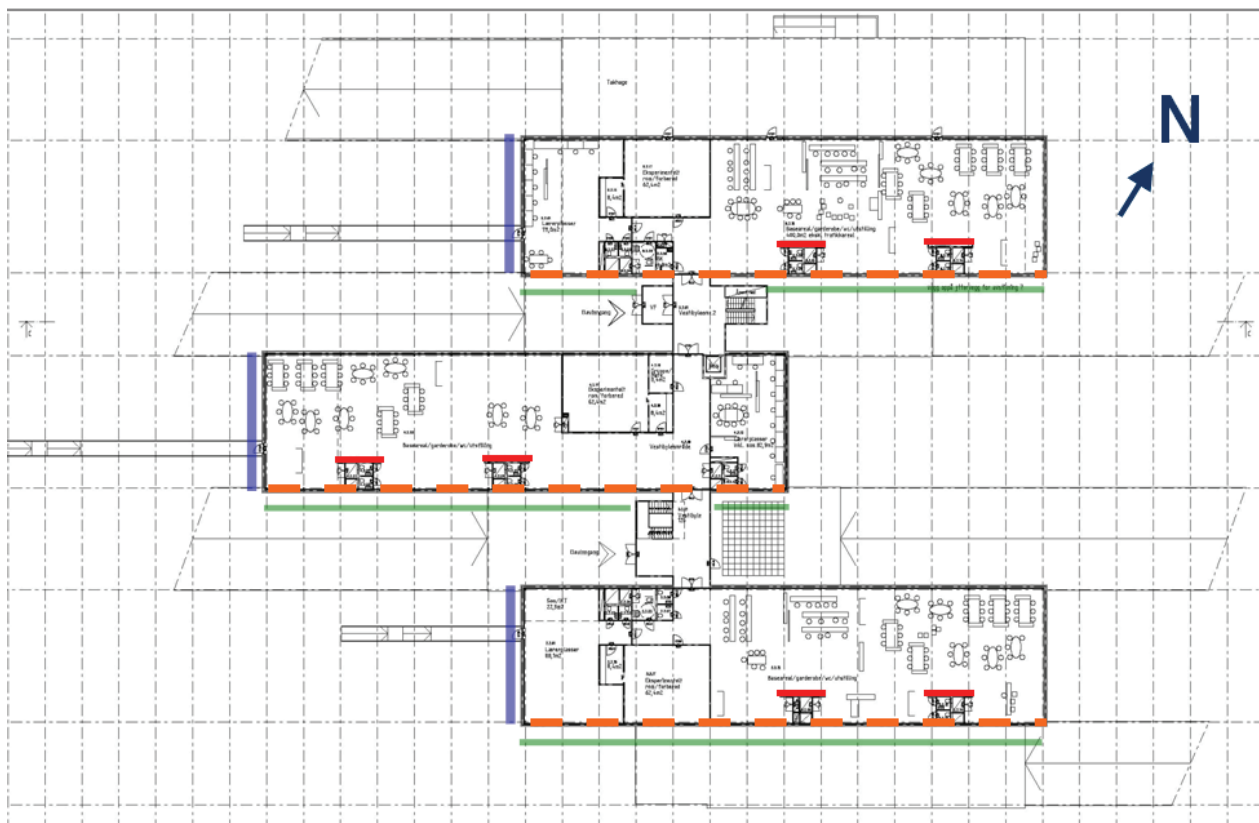
Styrt vinduslufting er fortsatt uvanlig i Norge, og det finnes ikke norske leverandører med spesialisering og erfaring på dette. Windowmaster i Danmark har imidlertid mange års erfaring med utvikling og leveranse av denne typen løsninger og kan vise til en lang liste med referanseprosjekter. Prosjekteringsgruppen valgte derfor å besøke firmaet den 23.2.2005 for å diskutere mulige løsningsalternativer og selv ta aktuelle komponenter i øyesyn.

Etter møtet konkluderte prosjekteringsgruppen med at naturlig ventilasjon basert på Windomasters komponenter og styringssystem kunne være en god løsning for å sikre akseptabel termisk komfort på Mæla skole.

#### **Tiltak for bedring av termisk komfort med gjennomskinnelig isolasjon**

I etterkant uttrykte imidlertid arkitekten et ønske om å benytte gjennomskinnelig isolasjon, type Moniflex, i veggene. Det ble også funnet gjennomskinnelig dampsperre, samt egnede polykarbonat-plater for veggens innside og utside, og en 2 x 1 m modell av den komplette vegg ble bygget for uttesting i dagslyslaboratoriet ved NTNU. Testene viste at konstruksjonen hadde relativt gode egenskaper med hensyn til innslipp av dagslys (ca. 15 % lystransmisjon) uten å skape problemer med blinding.

En stor utfordring med benyttelse av gjennomskinnelig isolasjon er imidlertid det økte solvarmetilskuddet inn gjennom konstruksjonen på solrike dager. Dette tilskuddet kommer i tillegg til solvarmen inn gjennom vinduene. For å vurdere ventilasjonsløsningen i forhold til andre aktuelle tiltak for å sikre akseptabel termisk komfort på varme, solrike dager var det nødvendig med mer detaljerte analyser av undervisningsfløyene.



Figur 2 Supplerende tiltak til naturlig ventilasjon for passiv kjøling av undervisningsfløyene i 2. etasje av Mæla skole: Utvendig solavskjerming av sørvestfasadene (blått), avskjerming av sørfasaden i form av planter/duk (grønt), persiener i kobletramme i vinduene i sørøstfasaden (oransje) og tilluftsdon i betong for utnyttelse av termisk masse ved hjelp av nattkjøling (rødt)

Materialeegenskapene til det gjennomskinnelige isolasjonsmaterialet Moniflex, med tilhørende gjennomskinnelig dampsperre og indre og ytre kledning med polykarbonat-plater ble derfor lagt inn i modellen.

Ellers ble følgende ventilasjonstekniske forutsetninger lagt til grunn for alle simuleringer med naturlig ventilasjon:

- Høyt plasserte vinduer for kryssløfting åpner dagtid når temperaturen i rommet overstiger  $21^{\circ}\text{C}$ . Åpningsarealet økes lineært med romtemperaturen til maks åpning ved  $24^{\circ}\text{C}$  (maks  $2,4\text{ m}^2$  i nordvest- og sørøstfasadene, og  $0,8\text{ m}^2$  i sørvest- og nordøstfasadene).
- Vinduene for kryssløfting åpner om natten når temperaturen i rommet overstiger  $19^{\circ}\text{C}$ . Åpningsarealet økes lineært med romtemperaturen til maks åpning ved  $21^{\circ}\text{C}$ .
- Så lenge romtemperaturen er under  $22^{\circ}\text{C}$ , kjøres aggregatene dagtid med nominell luftmengde for å sikre luftkvalitet ( $1200\text{ m}^3/\text{h}$  per aggregat). Ved  $22^{\circ}\text{C}$  stoppes imidlertid tilluftsviftene, mens pådraget på avtrekksviftene økes til  $1600\text{ m}^3/\text{h}$  per aggregat.

Det ble så simulert hvor mange timer den operative (opplevde) temperaturen oversteg  $26^{\circ}\text{C}$  i løpet av brukstiden mellom 08:00 og 16:00.

#### Alternativ 1

Fløy nord med lett gulv (tregulv). Konservativ antagelse for vindtrykkskoeffisienter i sør- og vestfasaden (på grunn av skjerming). Manuelle luftevinduer holdes stengt. Ingen solavskjerming  
Resultat: 98 timer over  $26^{\circ}\text{C}$

#### Alternativ 2

Som alternativ 1 med åpning av manuelle luftevinduer når utetemperaturen overstiger  $18^{\circ}\text{C}$ .  
Åpningsarealet økes lineært med utetemperaturen til maks åpning ved  $21^{\circ}\text{C}$   
Resultat: 60 timer over  $26^{\circ}\text{C}$ .



#### *Alternativ 3*

Som alternativ 1 med ekstern solavskjerming av vestfasaden

Resultat: 89 timer over 26 °C

#### *Alternativ 4*

Som alternativ 3 med mer optimistiske vindtrykkskoeffisienter for sørfasaden

Resultat: 84 timer over 26 °C

#### *Alternativ 5*

Midtre/søndre fløy, det vil si som alternativ 4 med betonggulv (hulldekke-elementer)

Resultat: 66 timer over 26 °C

#### *Alternativ 6*

Som alternativ 5 med persienner i koblet ramme i vinduene i sørfasaden (det vil si også med utvendig avskjerming av sørvestfasaden)

Resultat: 49 timer over 26 °C

#### *Alternativ 7*

Som alternativ 6, men for nordre fløy (lett gulv)

Resultat: 58 timer over 26 °C

#### *Alternativ 8*

Som alternativ 7, men 20 % avskjerming av hele sørfasaden istedenfor persienner (det vil si også med utvendig avskjerming i vest)

Resultat: 61 timer over 26 °C

Følgende konklusjoner ble trukket ut fra beregningsresultatene:

- Styrt vinduslufting er en forutsetning for akseptabel termisk komfort i undervisningsfløyene i 2. etasje av Mæla skole.
- Det anbefales utvendig solavskjerming av sørvestfasadene (avmerket i blått på Figur 2)
- For de øvrige sørøst- og sørvestfasader er styrte persienner i koblet ramme et tiltak som vil bedre termisk komfort betydelig.
- Avskjerming av sørfasaden i form av planter/duk vil også bidra til å redusere solbelastningen, men dekningsgrad av bladverk og hvordan en eventuell duk påvirker vindusluftingen er usikkerhetsfaktorer med hensyn til hvordan disse tiltak påvirker termisk komfort.

Resultatene og konklusjonene ble presentert i prosjektgruppemøte 5.4.2005.

På tross av tiltakene indikerte simuleringene at den opplevde romtemperaturen ville ligge på grensen av det akseptable på varme dager. I simuleringene er imidlertid den operative temperaturen beregnet som funksjon av lufttemperatur og midlere strålingstemperatur. I realiteten vil den naturlige ventilasjonen bidra til en kjølede effekt pga. økt luftbevegelse i rommet, og dermed redusere antall timer med overtemperatur.

I tillegg ble det besluttet at tilluftsdonene for den mekaniske fortrenningsventilasjonen skulle utføres i betong. Dette gir mulighet for utnyttelse av termisk masse til passiv kjøling. Betongen i tilluftsdonene kan effektivt nedkjøles ved hjelp av mekanisk ventilasjon natten i forveien, slik at overflatetemperaturen på betongen går ned. Utover dagen vil betongen ta opp overskuddsvarme dels via ventilasjonsluft, og dels via termisk strålingsutveksling mot undervisningsfløyene. Forøvrig introduserte utførelsen i betong anledning til å tilføre elementet spennende arkitektoniske kvaliteter, samt praktiske fordeler med hensyn til tett utførelse og lydisolasjon.

### Oppvarming

Siden det transparente isolasjonsmaterialet Moniflex ikke har samme isolasjonsegenskaper som tradisjonell mineralull, var det nødvendig å oppdimensjonere kapasiteten til oppvarmingssystemet for undervisningsfløyene. Konvektorer ble planlagt plassert langs gulvet inntil nordveggen i fløyene.

Egenskapene i forhold til innslipp av dagslys i kombinasjon med lysstyring vil medføre redusert energibruk til elektrisk belysning. Som følge av lav isolasjonstykkelse (20 cm) og høyere konduktivitet ( $\lambda$ -verdi) vil likevel energibehovet øke betydelig for de delene av skolen der veggisolasjonen hovedsakelig består av Moniflex. Energimålsetningen ble derfor økt fra 60 til 90 kWh/m<sup>2</sup> der det ble planlagt benyttet denne typen isolasjon.

## 6 Styring og valg av settpunkt

De tekniske løsningene som er valgt for Mæla skole innebærer at styring og valg av settpunkt for varme og ventilasjon vil skille seg noe fra det som ellers er vanlig. Dette avsnittet inneholder noen innspill rundt styring av ventilasjonsoppvarming samt naturlig ventilasjon vs. romoppvarming.

### 6.1 Styring – tillufts- og romtemperatur

Til tross for at alle ventilasjonsaggregater er utstyrt med høyeffektive varmegjennvinnere ble det også installert ettervarmebatteri for de fleste av disse. Det er imidlertid vanskelig å styre pådraget på ettervarmebatteri tilknyttet høyeffektive varmegjennvinnere. Dette vil kunne medføre at tilluften i perioder blir overoppvarmet slik at en får kortslutningsventilasjon (ineffektiv ventilasjon) og bruker unødig energi til oppvarming av ventilasjonsluft.

Det anbefales derfor at en i utgangspunktet ikke benytter ettervarmebatteri i aggregatene, men heller legger inn styring av viftepådraget slik at dette reduseres med tilluftstemperaturen. Dette kan for eksempel implementeres på følgende måte: dersom tilluftstemperaturen er over 18 °C benyttes nominell luftmengde (dersom det er behov for ventilasjon). Når tilluftstemperaturen faller under 17 °C reduseres viftepådraget lineært med tilluftstemperaturen slik at viftene stoppes dersom tilluftstemperaturen blir lavere enn 10 °C (betyr i så tilfelle at varmegjennvinneren ikke fungerer som den skal).

I ekstremt kalde perioder kan romtemperaturen med fordel økes en til to grader over settpunkt. Dette vil også bidra til å øke tilluftstemperaturen (via varmegjennvinneren).

### 6.2 Styring – naturlig ventilasjon vs. romoppvarming

En annen driftsteknisk utfordring er styringen av naturlig ventilasjon. Dersom naturlig ventilasjon benyttes i fyringssesongen kan dette medføre betydelig økt varmeforbruk. Det bør derfor være et betydelig sprang fra settpunktet da romoppvarmingen skrur av til settpunktet da en begynner å åpne vinduene. I utgangspunktet anbefales et sprang på minst 2 °C (helst mer). Dette innebærer at dersom romoppvarmingen skrur helt av ved 21 °C, bør ikke vinduene begynne å åpne før temperaturen når minst 23 °C. Åpningsarealet bør imidlertid økes raskt dersom temperaturen fortsetter å stige slik at en har full åpning når innnetemperaturen er for eksempel 25,5 °C.

## 7 Omprosjektering

Av branntekniske årsaker ble det etter hvert fremsatt krav om at løsningene med gjennomskinnelig isolasjon måtte omprosjekteres. Ettersom denne beslutningen ble tatt lenge etter byggestart innebar dette også en stor grad av ombygging.

Det som generelt kan sies om energiytelse ved bruk av Moniflex versus mineralull er at Moniflex har høyere konduktivitet. Dette bidrar til høyere transmisjonsvarmetap enn bruk av tradisjonell mineralull dersom isolasjonstykkelsen er den samme. Moniflex vil imidlertid gi større solvarmetilskudd vinterstid. Dette vil i kalde, solrike perioder kompensere noe for den høyere konduktiviteten, men øker samtidig risikoen for at det blir for varmt inne i varme perioder med mye sol. Moniflex vil også øke innslipet av dagslys, og vil derfor kunne bidra til noe lavere strømforbruk til belysning.

Et annet viktig moment i forhold til energiytelse er lufttettheten til klimaskjermen. Kravet om lekkasjetall på mindre enn 0,6 luftskifter ved 50 Pascals trykkdifferanse mellom inne og ute forutsetter gode løsninger og nøyaktig utførelse. En første trykktest på representative deler av bygget resulterte i et lekkasjetall på 0,9 luftskifter. Etter dette skal det være gjennomført tiltak for redusere luftlekkasjene, men SINTEF har ikke mottatt dokumentasjon på effekten av disse tiltakene.

Selv om omprosjekteringen vil kunne ha store konsekvenser både med hensyn til energi og innemiljø har den ikke vært gjennomført som en del av Smartbygg-prosjektet. Hvordan omprosjekteringen og den resulterende ombyggingen vil påvirke byggets energibehov, termisk komfort og dagslysforhold er derfor ikke analysert i detalj. På forespørsel fra arkitekt er det likevel gjort en energimessig vurdering av å benytte glass i fasadene i flerbrukshallen som et alternativ til gjennomskinnelig isolasjon [3]. Konklusjonen av disse beregningene var at dette ville medføre en økning i energibehov som ikke var i tråd med energimålsetningen. Det ble til slutt valgt en mer konvensjonell fasadeløsning med mineralullisolasjon, og dette vil være gunstig med hensyn til oppvarmingsbehovet for hallen.

## 8 Konklusjoner

Mæla skole vil kunne bli et av landets mest energieffektive undervisningsbygg. Dersom en skal være sikker på å nå målsetningen om at behovet for levert energi ikke skal overstige 80 kWh/m<sup>2</sup> bør følgende forutsetninger være oppfylt:

1. Kravspesifikasjonen gitt av Tabell 1, se side 9, blir tilfredsstillt.
2. Optimal drift av varme- og ventilasjonsteknisk utstyr.

Faktisk energiforbruk avhenger imidlertid også av hvordan bygget brukes, og påvirkes således av faktorer som det er vanskelig å ha kontroll på i prosjekteringsfasen. Dersom det reelle forbruket skal komme ned mot beregnet energibehov kreves det bevisste brukere som ikke bidrar til sløsing av energi. Videre må styringen av varme og ventilasjon fungere optimalt, og settpunktene for oppvarming, ventilasjon må settes riktig. I tillegg er en avhengig av driftspersonell med god innsikt i hvordan en slik bygning fungerer og at driftsansvarlig evner å drifte den på en tilnærmet optimal måte. Dersom bygget/anlegget brukes mer enn det som er vanlig for denne typen bygg vil også dette bidra til at det blir vanskelig å komme ned mot 80 kWh/m<sup>2</sup> reelt forbruk.

I utformingen av de konseptuelle varme- og ventilasjonstekniske løsningene er det tatt utgangspunkt i energimålsetningen for prosjektet og kravspesifikasjonen gjengitt i Tabell 1. Samtidig er det lagt stor vekt på å komme frem til alternativer som også bidrar positivt i forhold til arkitektur og innemiljø.

Generelt er behovet for ventilasjonskanaler redusert til et minimum, og den mekaniske ventilasjonen er dimensjonert med hensyn til luftkvalitet. Termisk komfort er sikret ved hjelp av passive tiltak som naturlig ventilasjon, solavskjerming og utnyttelse av termisk masse i tak, vegger og gulv. Forøvrig er det planlagt behovsstyring for all ventilasjon, og fortrengningsventilasjon for alle rom som egner seg for dette. Dette bidrar totalt sett til god kvalitet på inneluften med minimal bruk av mekanisk ventilasjon, og følgelig minimal bruk av energi.

Valget av vindu og vegger med gjennomskinnelig isolasjon innebar noe økt risiko for at det ville kunne bli for varmt i undervisningsfløyene i 2. etasje i varme, solrike perioder. Ettersom disse lokalene på grunn av skoleferien normalt ikke vil være i bruk sommerstid, ble likevel tiltakene i form av solavskjerming, naturlig ventilasjon og nattkjøling (utlufting av overskuddsvarme om natten) vurdert som tilstrekkelige til å sikre akseptabel termisk komfort gjennom skoleåret.

Av branntekniske årsaker har løsningene med gjennomskinnelig isolasjon blitt omprosjektert i etterkant. Dette har konsekvenser både i forhold til energi og innemiljø, men det er ikke gjennomført noen detaljerte analyser av disse endringene av SINTEF i dette prosjektet.

## 9 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] Wachenfeldt, B.J. (Okt. 2004). *Mæla Ungdomsskole - Romklimatiske vurderinger*, SINTEF rapport STF22 A04515, ISBN 82-14-03419-1
- [3] Bjørn J. Wachenfeldt (September 2007). *Fasadeløsning for flerbrukshall ved Mæla skole – konsekvenser med hensyn til energibehov*, Notat, SINTEF Byggforsk.

**SINTEF** er Skandinavias største forskningskonsern. Vår visjon er «Teknologi for et bedre samfunn». Vi skal bidra til økt verdiskapning, økt livskvalitet og en bærekraftig utvikling. SINTEF selger forskningsbasert kunnskap og tilhørende tjenester basert på dyp innsikt i teknologi, naturvitenskap, medisin og samfunnsvitenskap.

**SINTEF** Byggforsk er det tredje største byggforskningsinstituttet i Europa. Vi har rom både for store forskningssatsinger og for tett oppfølging av de mange små bedriftene. Vårt mål er bedre produktivitet og økt kvalitet i det bygde miljø.

**SINTEF** Byggforsk er Norges ledende formidler av forskningsbasert kunnskap til byggenæringen. Våre publikasjoner inneholder tilrettelagte erfaringer og resultater fra praksis og forskning. Vi utgir Byggforskserien, Byggebransjens våtromsnorm, håndbøker, rapporter, faktabøker og beregnings- og planleggingsverktøy.