

Bjørn-Roar Krog, Ernst Petter Axelsen og  
Per Gundersen

# Vannbårne lavtemperatursys- temer kombinert med ventila- sjon i bygninger

Prosjektrapport nr 357 - 2003  
Bjørn-Roar Krog, Ernst Petter Axelsen og Per Gundersen  
Vannbårne lavtemperatursystemer kombinert med ventilasjon  
i bygninger

Emneord: Varmeanlegg, vannbåren lavtemperaturvarme, gulv-  
varme, takvarme, komfort, ventilasjon, laboratorieforsøk

ISSN 0801-6461  
ISBN 82-536-0814-4

100 eks. trykt av  
S.E. Thoresen as  
Innmat:100 g Kymultra  
Omslag: 200 g Cyclus

© Copyright Norges byggforskningsinstitutt 2003

Materialet i denne publikasjonen er omfattet av åndsverkslovens bestem-  
melser. Uten særskilt avtale med Norges byggforskningsinstitutt er enhver  
eksemplarframstilling og tilgjengeliggjøring bare tillatt i den utstrekning  
det er hjemlet i lov eller tillatt gjennom avtale med Kopinor, interesseor-  
gan 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 123 Blindern  
0314 OSLO  
Tlf.: 22 96 55 55  
Faks: 22 69 94 38 og 22 96 55 08

# Forord

Rapporten presenterer resultater fra forskningsprosjekt ved NBI knyttet til vannbåren lavtemperatur varmeanlegg i bygninger. Prosjektet finansieres av midler fra Strategisk instituttprogram (SIP) og heter *Miljøriktig energibruk (2000-2004)*.

Vi ønsker å takke siv. ing. Gaute Hagen og siv. ing. Bjørn-Roar Krog som utførte sin diplomoppgave ved NBI våren 2003. Deres innsats i forbindelse med ombygging av varmelaboratoriet og erfaring underveis har vært et viktig bidrag.

Av aktive samarbeidspartnere rettes en takk til Probata AS, Wirsbo og Hunton Fiber AS.

Siv. ing. Per Gundersen har bistått med god faglig rettleiding og har vært en viktig diskusjonspartner.

Dr. ing. Ernst Petter Axelsen har vært prosjektleder for delprosjekt varmeanlegg i bygninger (SIP).

Ønsker også og rette en takk til øvrige ved NBI for hjelp til gjennomføring av forsøkene.

Oslo, desember 2003

Bjørn-Roar Krog

Ernst Petter Axelsen  
Prosjektleder

Per Gundersen

Jørn T. Brunsell  
Forskningssjef

# Sammendrag

Det oppfordres i dag å ta i bruk vannbåren varme til oppvarming av bygninger. Fremtidens varmeanlegg bør kunne utnytte ulike energikilder, være energieffektive og gi god komfort med lavest mulig lufttemperatur.

Formålet med denne rapporten er å skaffe seg bedre kunnskap om lavtemperatur varmeanlegg ved laboratoriemålinger. Vannbåren gulv- og takvarme skal sammenlignes med fokus på effektavgivelse og komfort, samt ventilasjonens innvirkning på disse parameterne. Denne rapporten skal i tillegg dokumentere varmelaboratoriet ved NBI og gi innspill til videre arbeider – FoU.

Bruk av lave vanntemperaturer til oppvarmingsformål forutsetter beskjedent varmebehov og varmeanlegg med store heteflater.

Forsøkene viser at den vertikale temperaturfordelingen i varmelaboratoriet med og uten ventilasjon for tak- og gulvvarme tilfredstiller komfortkravene. Kravet til maksimal asymmetrisk stråling er også oppfylt for tak- og gulvvarmeanlegget. Dette gjelder med og uten ventilasjon.

Den tilførte effekten fra varmeanleggene øker ved å benytte ventilasjon fordi konveksjonen bedres. Effektavgivelsen øker mest for takvarmeanlegget, noe som er positivt for utnyttelse av denne type heteflate. Effektavgivelsen øker naturlig nok fra heteflatene når dekningsprosenten med varmfordelingsplater av aluminium er økes fra 50 til 80 %.

Forsøkene viser god målenøyaktighet og er gjennomført ved stasjonære temperaturforhold. For beregning av energibalansen er typiske avvik for varmelaboratoriet  $\pm 8$  %, og det utgjør i størrelsesorden  $\pm 30$  W. Dette effektavviket er relativt lite, slik at måleresultatene anses for å være tilfredsstillende.

De foreløpige resultatene har avdekket mange områder ved vannbåren lavtemperatur oppvarmingssystemer det vil være interessant å studere nærmere. Forslag til videre arbeider presenteres i denne rapporten.

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	3
Sammendrag.....	4
Innholdsfortegnelse.....	5
<b>1. – Introduksjon .....</b>	<b>6</b>
1.1 – Bakgrunn .....	6
1.2 – Formål .....	6
1.3 – Tidligere arbeider .....	6
1.4 – Rapportens oppbygging.....	7
<b>2. – Teori .....</b>	<b>8</b>
2.1 – Varmetransport.....	8
2.2 – Termisk komfort.....	11
2.3 – Komfortligningen.....	12
2.4 – Lokal termisk diskomfort.....	13
2.5 – Vertikal temperaturfordeling.....	15
2.6 – Krav til termisk komfort.....	16
2.7 – Vannbasert oppvarming .....	17
<b>3. – Varmelaboratoriets oppbygging .....</b>	<b>18</b>
3.1 – Konstruksjon .....	19
3.2 – Gulvvarmeanlegget .....	22
3.3 – Takvarmeanlegget .....	23
3.4 – Ventilasjonsanlegget .....	24
<b>4. – Beregninger.....</b>	<b>26</b>
4.1 – Energibalansen for varmelaboratoriet .....	26
4.2 – Varmegjennomgangskoeffisienter .....	28
4.3 – Strålingsutveksling .....	30
4.4 – Arkimedestallet .....	31
<b>5. – Målepunkter .....</b>	<b>32</b>
5.1 – Før ombygging.....	32
5.2 – Etter ombygging.....	33
<b>6. – Instrumentering.....</b>	<b>34</b>
<b>7. – Innledende forsøk.....</b>	<b>36</b>
7.1 – Forsøksoppsett.....	36
7.2 – Resultater med diskusjon .....	37
7.3 – Prosedyrer og stabilitet.....	41
<b>8. – Konklusjon.....</b>	<b>43</b>
<b>9. – Forslag til videre arbeid.....</b>	<b>44</b>
<b>Appendiks A – Beregninger .....</b>	<b>45</b>
<b>Appendiks B – Målepunkter .....</b>	<b>48</b>
<b>Appendiks C – Kalibrering .....</b>	<b>50</b>
<b>Referanseliste.....</b>	<b>53</b>

# 1. – Introduksjon

## 1.1 – Bakgrunn

Det oppfordres i dag å ta i bruk vannbåren varme til oppvarming av bygninger. Fremtidens varmeanlegg bør kunne utnytte ulike energikilder, være energieffektive og gi god komfort med lavest mulig lufttemperatur. Størst fleksibilitet og effektivitet oppnås når man i tillegg til å velge mellom forskjellige energikilder og energibærere, også har mulighet for energilagring og har varmeanlegg som kan utnytte meget lave vanntemperaturer (25-35 °C).

Installering av vannbårene gulvvarmeanlegg i eksisterende boliger har vist seg å være kostbart for forbrukeren. Det er derfor viktig å utvikle nye systemer som også kan benytte vegger og tak som oppvarmingsflater. Dette vil trolig redusere installeringskostnadene på grunn av høyere grad av prefabrikering. Vannbasert tak- og veggvarmesystemer er til nå ikke tilstrekkelig utviklet og det er ikke et kommersielt produkt på markedet. Innledende studier ved NBI har vist at kombinasjonen av vannbåren takvarme og ventilasjon kan forbedre varmeavgivelsen fra takflaten.

## 1.2 – Formål

Formålet med denne rapporten er å skaffe seg bedre kunnskap om lavtemperatur varmeanlegg ved laboratoriemålinger. Vannbåren gulv- og takvarme skal sammenlignes med fokus på effektavgivelse og komfort, samt ventilasjonens innvirkning på disse parameterne. Denne rapporten skal i tillegg dokumentere varmelaboratoriet ved NBI. Rapporten skal senere ligge til grunn for nye forsøkkoppsett i fremtiden ved å henviser til teori, beregninger og oppbygging av laboratoriet.

## 1.3 – Tidligere arbeider

Kunnskapsoversikten til Persson (2000) om lavtemperatur varmesystemer gir god kjennskap til hva som er utført av forsøk og arbeider innenfor fagområdet [1]. På komfortsiden er arbeidene til Fanger og Olesen m. fl. (1975), (1977), (1979) og (1980) av stor betydning. Deres arbeider har blant annet tatt for seg termiske komfortkrav for tak- og gulvvarme, diskomfort mhp. vertikale temperaturdifferanser og krav til termisk komfort ved bruk av forskjellige oppvarmingsmetoder [2-6]. Arbeidene til Johansson m. fl. (1984), (1994) og (2000) tar også for seg komfort, men han har i tillegg sett på varmeavgivelse fra tak- og gulvvarmesystemer [7-9].

Lebrun (1979) har utført komfortundersøkelser med mennesker som indikatorer [10]. Resultatene viser at opplevelsen av komfort stemmer godt overens med arbeidene til Fanger. For velisolerte hus ble konklusjonen at strålevarme fra tak- og gulvvarme er like komfortabelt som andre oppvarmingssystemer.

Gundersens arbeider (2000), (2002) og (2003) ved NBI med vannbåren lavtemperaturvarme ligger til grunn for denne rapporten, og videreføres i forsøkene som er utført i varmelaboratoriet [11-14]. Videre bygger også denne rapporten på arbeider fra diplomoppgaven til Hagen og Krog (2003) [15].

## **1.4 – Rapportens oppbygging**

Rapporten er bygget opp slik at første hovedkapittel gir en kort teoretisk introduksjon til varmetransport og termisk komfort. Videre gis det også en beskrivelse av vannbaserte oppvarmingssystemer. Oppbyggingen av varmelaboratoriet med tak-, gulv- og ventilasjonsanlegget blir beskrevet i kapittel 3, mens kapittel 4 tar for seg beregninger i forbindelse med energibalansen til varmelaboratoriet. Kapittel 5 og 6 omhandler henholdsvis målepunktene til temperaturmålingen og benyttet instrumentering til forsøkene. I kapittel 7 presenteres resultatene fra innledende forsøk. Konklusjonen blir presentert i kapittel 8, mens forslag til videre arbeider blir diskutert i kapittel 9.

## 2. –Teori

### 2.1 –Varmetransport

I et rom finnes det en kontinuerlig varmeutveksling mellom luften og de ulike overflatene. Flatene kan for eksempel være vegger, mennesker, heteflater eller møbler. I tillegg vil ventilasjon ha innvirkning på varmeutvekslingen. De ulike flatene i rommet utveksler varme seg i mellom gjennom stråling og konveksjon. De kan også oppta varme fra solinnstråling gjennom et vindu. Varme ledes til eller fra flater gjennom tak, vegger, gulv og vinduer som grenser til andre rom eller uteluft. Ved temperatursvingninger i rommet eller utendørs, opptas eller frigjøres varme avhengig av materialenes varmekapasitet.

Varmetransport er ofte en sammensatt prosess. Det skilles mellom de prinsipielt forskjellige transportmekanismene ledning, konveksjon og stråling.

#### *Ledning*

Varmeledning i et fast homogent legeme innebærer transport av varmeenergi fra et høyere til et lavere temperaturnivå. Varmeledning kan også forekomme i absolutt stillestående gasser og væsker.

Sammenhengen mellom varmestrømmen,  $q_l$ , og temperaturgradienten beskrives av Fouriers lov:

$$q_l = -\lambda \left( \vec{i} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \vec{j} \cdot \frac{\partial T}{\partial y} + \vec{k} \cdot \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.1)$$

$$\lambda \quad = \text{varmekonduktivitet} \quad [\text{W/mK}]$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} \quad = \text{temperaturgradient i x-retning} \quad [\text{K/m}]$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} \quad = \text{temperaturgradient i y-retning} \quad [\text{K/m}]$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} \quad = \text{temperaturgradient i z-retning} \quad [\text{K/m}]$$

Forenkles ligning 2.1 til å gjelde endimensjonal varmeledning blir den:

$$q_l = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.2)$$



### Konveksjon

Varmeoverføring mellom et fast legeme og et fluid og mellom fluider kalles konveksjon. Det er vanlig å skille mellom fri og tvungen konveksjon. Ved fri konveksjon er ofte strømmingen forårsaket av temperaturforskjeller, mens tvungen konveksjon er forårsaket av ytre krefter som for eksempel vind, mekanisk ventilasjon o.l.

Konveksjonens størrelse beskrives ofte ved hjelp av varmeovergangskoeffisient,  $\alpha_k$ , og den er å finne i Newtons lov om kjøling:

$$q = \alpha_k \cdot (T_0 - T_1) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.3)$$

$\alpha_k$	= varmeovergangskoeffisient	$[\text{W/m}^2\text{K}]$
$T_0$	= overflatetemperatur fast legeme	$[\text{K}]$
$T_1$	= fluidets temperatur	$[\text{K}]$

### Stråling

Alle materialer med en temperatur over det absolutte nullpunkt emitterer varmestråling. Avgitt stråling,  $q_s$ , fra et svart legeme uttrykkes ved hjelp av Stefan-Boltzmanns lov:

$$q_s = \sigma_s \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.4)$$

$\sigma_s$	= $5,7 \cdot 10^{-8}$	$[\text{W/m}^2\text{K}^4]$
$T$	= stråleflatens temperatur	$[\text{K}]$

Avgitt stråling fra et legeme som ikke er svart, beskrives ved hjelp av dens emissivitet,  $\varepsilon$ :

$$q_s = \varepsilon \cdot \sigma_s \cdot T^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.5)$$

Ved langbølget stråling mellom ulike overflater i et rom gis nettostrålingen fra en flate  $A_1$  til flate  $A_2$  av:

$$Q_{12} = \varepsilon_{12} \cdot F_{12} \cdot A_1 \cdot \sigma_s \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W}] \quad (2.6)$$

$\varepsilon_{12}$	= resulterende emittans	$[-]$
$F_{12}$	= vinkelfaktor	$[-]$
$A_1, A_2$	= flatenes areal	$[\text{m}^2]$
$T_1, T_2$	= flatenes temperatur	$[\text{K}]$

Vinkelfaktorer beskriver det geometriske forholdet mellom flatene og kan beregnes ut fra formler og tabeller.

Ofte formulerer man varmestrømmen ved stråling på samme måte som ved konveksjon gjennom å innføre en varmeovergangskoeffisient,  $\alpha_s$ , for stråling:

$$q_s = \alpha_s \cdot (T_1 - T_2) \quad [\text{W/m}^2] \quad (2.7)$$

der

$$\alpha_s = \frac{\epsilon_{12} \cdot F_{12} \cdot \sigma_s}{T_1 - T_2} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (2.8)$$

## 2.2 – Termisk komfort

Termisk komfort er en subjektiv følelse eller sinnstilstand. Hvordan mennesket opplever det termiske inneklimaet avhenger hovedsakelig av varmeutvekslingen mellom kroppen og omgivelsene. Varmeutvekslingen påvirkes av fysisk aktivitet, bekledding og omliggende klima. Det termiske klimaet kan beskrives ved hjelp av luftens temperatur, hastighet og fuktighet samt strålingsutvekslingen med omliggende flater.

Termisk komfort innebærer et termisk nøytralt klima der mennesket som helhet befinner seg i termisk likevekt. Personen ønsker det verken kaldere eller varmere. Varmeproduksjonen i kroppen er like stor som varmeavgivelsen fra kroppen og kroppstemperaturen er konstant. Termisk komfort innebærer også at uønsket oppvarming eller nedkjøling av en begrenset del av kroppen kan skape ubehag.

De grunnleggende begrepene for å beskrive det termiske inneklimaet er lufttemperatur, strålingstemperatur, lufthastighet og luftfuktighet.

### *Lufttemperatur*

Lufttemperaturen beskriver temperaturnivået i et rom. Den er også det viktigste målet for termisk inneklima.

### *Vertikal temperaturgradient*

Vertikal temperaturgradient er et mål på hvor raskt lufttemperaturen endrer seg ved ulike høyder over gulvet. Forskjeller i temperatur mellom ulike kroppsdelene kan oppleves som ubehagelig.

### *Plan strålingstemperatur*

Plan strålingstemperatur anvendes for å bestemme strålingsutvekslingen for en liten plan overflate (f. eks. hudparti) som vender mot en viss retning. Strålingsutvekslingen avhenger av overflatetemperaturen og emissiviteten hos de omliggende flatene.

### *Strålingstemperaturasymmetri*

Strålingstemperaturasymmetri er differansen mellom plan strålingstemperatur for to motstående retninger.

### *Operativ temperatur*

Operativ temperatur beskriver den kombinerte innvirkningen av lufttemperatur og strålingstemperatur på menneskets varmebalanse. I mange tilfeller kan operativ temperatur,  $t_{op}$ , beregnes som det aritmetiske middelet av gjennomsnittlig strålingstemperatur og lufttemperatur. Dette gjelder for lufthastigheter mindre enn 0,2 m/s eller når forskjellen mellom middelstrålingstemperaturen og lufttemperaturen er mindre enn 4°C.

$$t_{op} = \frac{(t_a + t_r)}{2} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.9)$$

$t_{op}$	= operativ temperatur	[°C]
$t_a$	= lufttemperatur	[°C]
$t_r$	= gjennomsnittlig strålingstemperatur	[°C]

### *Lufthastighet*

Høy lufthastighet kan gi en uønsket, lokal kjøling av kroppen, noe vi opplever som trekk. Det er først og fremst naken hud som er følsom for trekk. Trekkplager er derfor normalt konsentrert til ansikt, nakke, hender og nedre del av bena.

### *Luftfuktighet*

Under normale forhold har variasjoner i luftens fuktighet innenfor variasjonsområdet 20-60 % liten innflytelse på inneklimaet. I varme omgivelser vil fuktigheten derimot spille en betydelig rolle.

## 2.3 – Komfortligningen

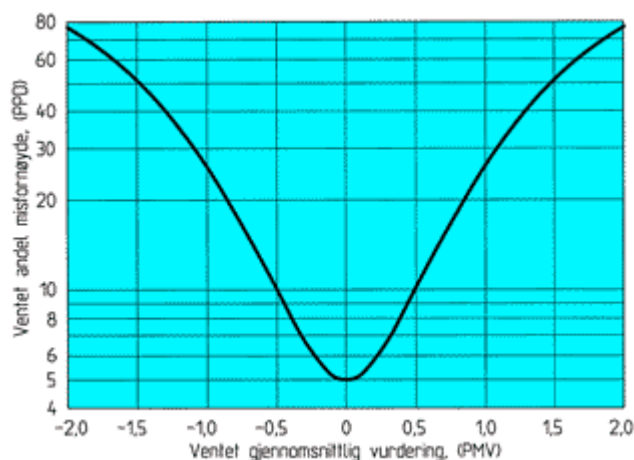
Komfortligningen sier at kroppens varmeproduksjon pga. aktivitetsnivå balanseres av bekledding, lufttemperatur, strålingstemperatur, luftfuktighet og lufthastighet [16].

Arbeidet til P. O. Fanger viser sammenhengen mellom gjennomsnittsvurdering av inneklimaet (PMV) og andel misfornøyde (PPD) [16]. PMV betyr "Predicted Mean Vote" og uttrykker hvordan mennesker føler det termiske klimaet etter følgende skala:

+3	hett
+2	varmt
+1	noe varmt
0	nøytralt
-1	noe kjølig
-2	kjølig
-3	kaldt

PPD betyr "Predicted Percentage of Dissatisfied". PPD-indeksen forutsier den prosentvise andelen av en gruppe personer som vil være misfornøyde med et gitt termisk inneklima og med gitt påkledning og aktivitet.

Figur 2.1 viser andel misfornøyde avhengig av inneklimaet. Minst 5 % vil til enhver tid synes at det er for varmt eller for kaldt, selv om alle har lik aktivitet, bekledding og klima. P. O. Fanger har påvist at det ikke er noen signifikant forskjell mellom grupper, uansett alder og kjønn.



Figur 2.1: Sammenheng mellom ventet gjennomsnittlig vurdering (PMV) og ventet andel misfornøyde (PPD) [16]

### *Aktivitetsnivå*

Menneskekroppen produserer energi gjennom stoffskifteprosessen. Stoffskiftet innebærer at næringsstoffer som fett, proteiner og karbohydrater forbrennes sammen med oksygen. Energiomsetningen varierer med den fysiske aktiviteten. Varmeproduksjonen er angitt som watt pr. m<sup>2</sup> kroppsoverflate, eller i den relative enheten met. 1 met = 58 W/m<sup>2</sup> og dette tilsvarer energiomsetningen for en stillesittende, avslappet person. Energiomsetningen for lett, stillesittende arbeid er 1,2 met, men kan stige til over 10 met ved utøvelse av idrett.

### *Bekledning*

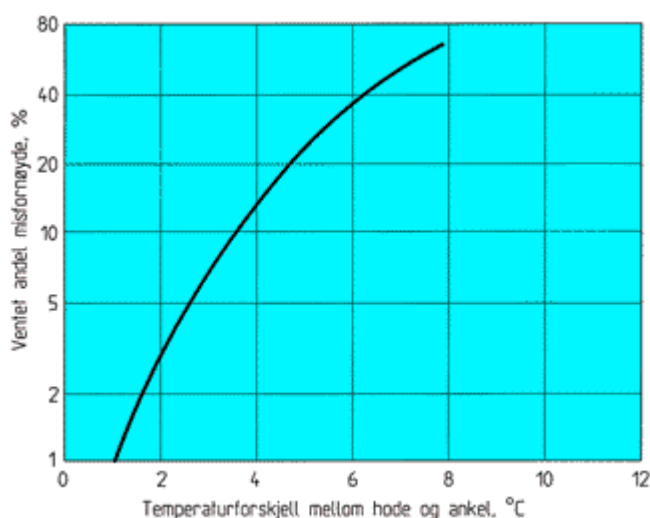
Dersom det termiske inneklimaet i et rom skal kunne vurderes, er det viktig å kjenne bekledningen til menneskene som oppholder seg der. Det er primært bekledningens isolering som er av betydning. Isoleringen angis i enheten clo. En typisk innendørs sommerbekledning tilsvarer 0,5 clo, mens en typisk innendørs vinterbekledning tilsvarer 1,0 clo.

## **2.4 – Lokal termisk diskomfort**

I uensartede termiske omgivelser kan det oppstå lokalt ubehag på grunn av uønsket oppvarming eller avkjøling av en bestemt del av kroppen. Ubeklagen kan oppstå ved stor forskjell i lufttemperatur mellom hode og føtter, eller for stor strålingsasymmetri. Det er først og fremst mennesker med stillesittende arbeid som er følsomme for lokale påvirkninger. Ved høyere aktivitet er mennesker vesentlig mindre påvirket. Bekledningen til en person kan også være med på å beskytte mot lokale påvirkninger.

### *Vertikal lufttemperaturforskjell*

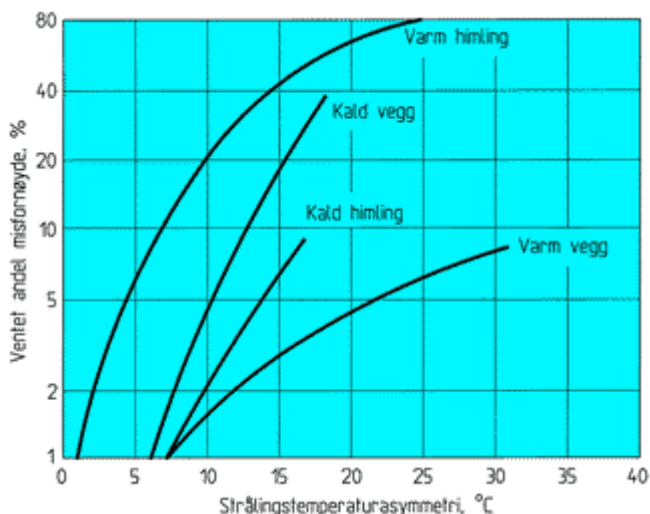
Dersom lufttemperaturforskjellen mellom hode og ankelhøyde blir for stor, kan det forventes at personer opplever lokalt ubehag. Figur 2.2 viser antall stillesittende mennesker i prosent som forventes å oppleve lokalt ubehag som funksjon av lufttemperaturforskjellen mellom hode og ankelhøyde. Hvis det aksepteres 5 % misfornøyde, tilsvarer dette en temperaturforskjell mellom hode og ankelhøyde på 3°C.



Figur 2.2: Prosent misfornøyde som funksjon av forskjellen mellom lufttemperaturene i hode- og ankelhøyde [16]

### Asymmetrisk stråling

Asymmetrisk stråling oppleves nær varme eller kalde flater som vinduer, oppvarmede tak o.l. Dersom mennesker utsettes for asymmetrisk stråling, kan det medføre lokalt ubehag. Figur 2.3 viser antall utilfredse mennesker i prosent når de utsettes for asymmetrisk stråling fra varmt/kaldt tak og varm/kald vegg. Hvis det aksepteres 5 % misfornøyde, tilsvarer dette en grense på 5°C strålingstemperatursymmetri mellom personer og varme himlinger. For kalde veggflater er denne grensen 10°C, se figur 2.3.

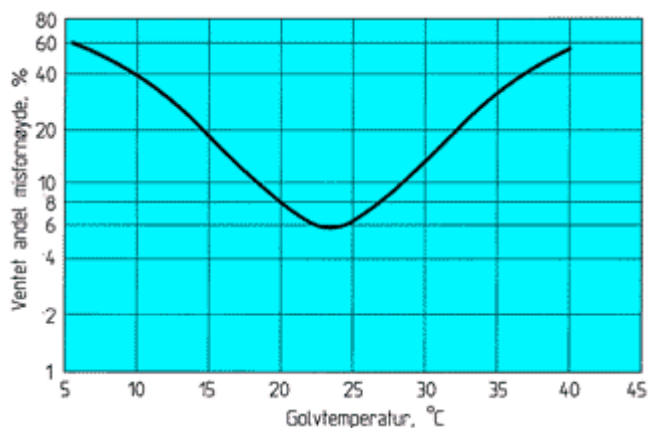


Figur 2.3: Prosent misfornøyde som funksjon av strålingstemperatursymmetrien [16]

### Gulvtemperatur

Varme eller kalde gulv kan føre til at føttene føles for kalde eller for varme. Varmutvekslingen mellom føtter og gulv er avhengig av gulvtemperatur, gulvmateriale og fottøy. Med normalt innendørs fottøy betyr gulvmaterialet lite, og overflatetemperaturen vil være avgjørende for komforten. Gulvmaterialet spiller imidlertid stor rolle der folk går barføtt.

Figur 2.4 viser sammenhengen mellom andel misfornøyde som funksjon av gulvtemperaturen når det benyttes lett innendørs fottøy.



Figur 2.4: Prosent misfornøyde som funksjon av gulvtemperatur for mennesker med lett innendørs fottøy [16]

### Lufthastighet

Høy lufthastighet kan gi en uønsket, lokal kjøling av kroppen, noe vi opplever som trekk. Det er først og fremst naken hud som er følsom for trekk. Trekkplager er derfor normalt konsentrert til ansikt, nakke, hender og nedre del av bena.

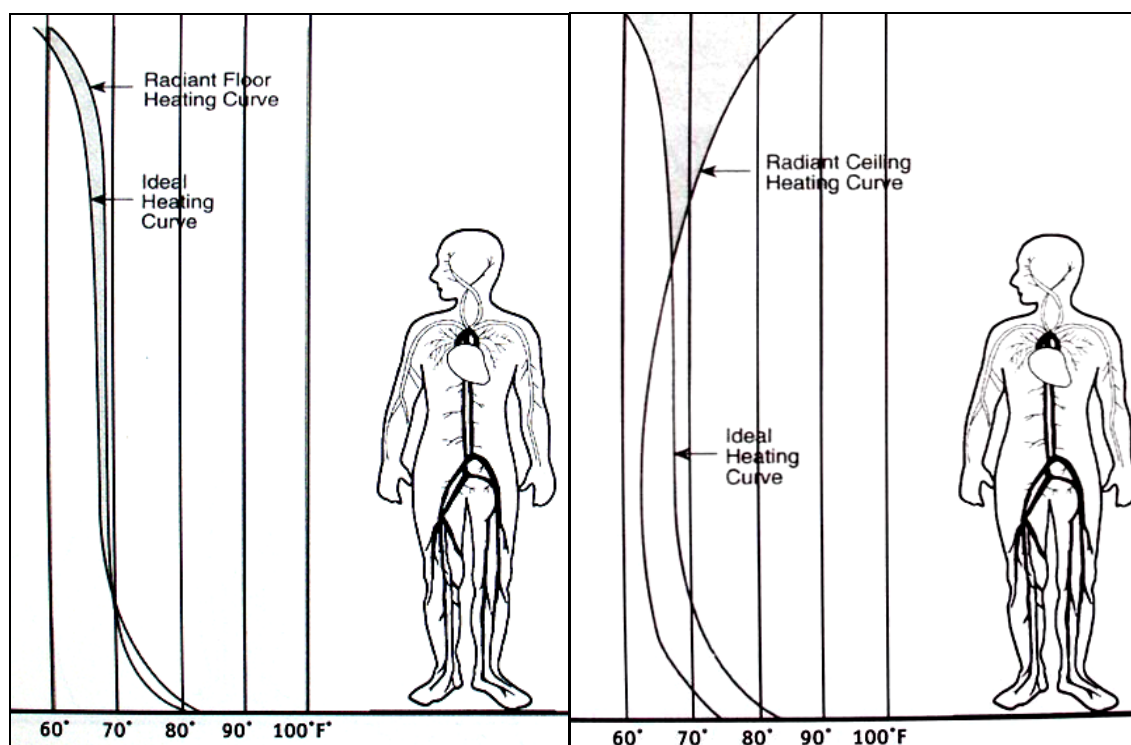
### Oppholdssone

For å bedømme det termiske inn klimaet, er det viktig å fastslå hvor komfortbetingelsene skal oppfylles. Oppholdssonen begrenses horisontalt av gulvet og et plan 1,8 m over gulvet. Vertikalt begrenses sonen av loddrette plan, parallelt med rommets vegger, i en avstand av 0,6 m fra disse.

## 2.5 – Vertikal temperaturfordeling

Når det er noe varmere ved føttene enn ved hodet, blir temperaturfordelingen god. Gulvvarme gir en tilnærmet ideell temperaturfordeling. Bruk av gulvvarme vil gi en god temperaturfølelse selv ved en lavere lufttemperatur i rommet. Med takvarme som oppvarmingssystem blir det varmere ved hodet enn ved føttene. Dette bryter med den ideelle temperaturfordelingen. Innledende forsøk ved NBI viser imidlertid at kombinasjonen vannbåren lavtemperatur takvarme og ventilasjon kan gi temperaturfordeling tilnærmet den ideelle kurven, se kapittel 7.2.

Figur 2.5 viser temperaturfordeling i et rom hvor gulv- og takvarme er benyttet uten mekanisk ventilasjon. Den ideelle temperaturfordelingskurven er også tegnet inn for sammenlikning. Figuren viser at gulvvarme ligger nærmest den ideelle kurven [17].



Figur 2.5: Vertikal temperaturfordeling for gulv- og takvarme uten mekanisk ventilasjon [17]

## 2.6 – Krav til termisk komfort

Det er utarbeidet en rekke krav til termisk komfort. Tabell 2.1 gjengir kravene til Arbeidstilsynets veiledning 444, NS-EN ISO 7730 og Plan- og bygningsloven 1997. NBIs anbefalinger er ikke tatt med i tabellen under, da de er i overensstemmelse med NS-EN ISO 7730.

Tabell 2.1: Krav til termisk komfort

Parametere	NS-EN ISO 7730	Arbeidstilsynets veiledning 444	Plan- og bygningsloven 1997
Operativ temperatur vinterforhold	22 ± 2 °C <sup>1)</sup>	≤ 22 °C	21 – 22 °C Min. 20 °C
Operativ temperatur sommerforhold	24,5 ± 1,5 °C <sup>2)</sup>	≤ 22 °C	23 – 24 °C Maks. 26 °C
Min. golvtemperatur vinter- og sommerforhold	19 °C		
Maks. golvtemperatur vinter- og sommerforhold	26 °C		
Vertikal temperaturgradient	< 3 °C <sup>3)</sup>	3 – 4 °C <sup>4)</sup>	3 °C <sup>4)</sup>
Lufthastighet	< 0,15 m/s	< 0,15 m/s	
Strålingsasymmetri vindu og vertikale flater <sup>5)</sup>	< 10 °C		
Strålingsasymmetri tak <sup>5)</sup>	< 5 °C		
Relativ luftfuktighet vinter		≤ 35 – 40 %	
Overflatetemperatur gulv	Mellom 19 og 26 °C		

<sup>1)</sup> Vinterforhold: 1,2 met og 1 clo

<sup>2)</sup> Sommerforhold: 1,2 met og 0,5 clo

<sup>3)</sup> Gjelder mellom 0,1 m og 1,1 m

<sup>4)</sup> Gjelder mellom hode og føtter

<sup>5)</sup> I forhold til en liten, horisontal flate 0,6 m over gulv



## 2.7 – Vannbasert oppvarming

Et vannbasert oppvarmingssystem består av en energisentral, et distribusjonsnett og en eller flere heteflater for varmeavgivelse. Vannbårne varmeanlegg kan være gulvvarme-, radiator- eller konvektorsystemer. Det finnes også systemer som benytter hele eller deler av vegg og tak som heteflate. Felles for vannbårne varmeanlegg er at de baserer seg på varme avgitt ved stråling og konveksjon.

Effektbehovet til oppvarming av boliger er blant annet avhengig av varmeisolering og tetthet i konstruksjonen, klimaforhold og varmegjenvinning av ventilasjonsluften. Effektbehovet kan dekket av energikilder som olje, gass, biobrensel, solenergi, vind og elektrisk kraft.

### *Lavtemperatursystemer*

Tradisjonelle lavtemperatur varmeanlegg opererer i området 25-45 °C med en senkning av vanntemperaturen på 5 °C over heteflaten. Nyere forskning viser at det er fordelaktig å senke turtemperaturen ned til 25-35 °C, samt at temperaturdifferansen mellom tur og retur ikke bør overstige 1-2 °C. En viktig forutsetning for å kunne senke vanntemperaturen er at bygningen er godt isolert.

For å kunne utnytte lavtemperatur energikilder til oppvarmingsformål, er følgende parametere av stor betydning:

- Lavt varmebehov
- Størst mulig heteflate
- God varmeovergang mellom varmerør og heteflate

God varmeoverføring fra vann til heteflate er avgjørende for å kunne utnytte lave vanntemperaturer. Viktige parametere er rørdiameter, røravstand og materialvalget i oppbygningen av heteflaten. Riktig utforming av varmfordelingsplater er i denne sammenheng særlig viktig.

Det stilles ikke samme krav til materialegenskaper, som for eksempel stivhet eller bæreevne, for takkonstruksjoner som for gulv. Derfor kan det benyttes materialer med redusert sjikttykkelse i taket, slik at varmemotstanden mellom rørene og overflaten blir lavere enn for gulvvarmesystemer.

Det finnes vannbårne varmeanlegg med ulike oppvarmingskarakteristikk. Man kan ha lette dynamiske gulv- og veggvarmeanlegg med liten tidskonstant for oppvarming, og mer varmetrege gulvvarmeanlegg med stor varmekapasitet og lang tidskonstant. Effektiv temperaturregulering i rom med hurtig skiftende varmebehov krever at varmeanlegget ikke er for varmetrege. Med hensyn til temperaturreguleringsevnen, bør lavtemperatursystemer installeres i lette konstruksjoner.

Heteflater bør fortrinnsvis plasseres på innvendige flater som ikke også skal fungere som klimaskjerm. Ved plassering på klimaskjerm, krever dette ekstra isolering for å unngå et tilleggsvarmetap. Tilleggsvarmetapet vil bestå av økende transmisjonstap, da temperaturdifferansen over bygningsdelen vil bli større.

Det kan ofte være problematisk å få lavtemperatursystemene til å dekke hele oppvarmingsbehovet. I slike tilfeller vil det være fornuftig å la lavtemperatursystemet dekke grunnbehovet for energi og supplere med andre varmekilder til å dekke det resterende behovet, som f.eks. radiatorer.

Lav turtemperatur og liten temperaturdifferanse mellom tur og retur er energimessig meget gunstig, fordi man kan benytte energi av lavere kvalitet. Virkningsgraden for en eventuell varmepumpe forbedres, samt at varmetapet reduseres dersom varmeanlegget er plassert på klimaskjerm.

### 3. – Varmelaboratoriets oppbygging

Forsøkene er utført i varmelaboratoriet til Norges byggforskningsinstitutt i Oslo. Laboratoriet tillater testing av varmekapasitet for radiatorer og konvektorer etter NS-EN 442-2. Klimarommets innvendige mål er 4x4x3 m. Alle vegg-, tak- og gulvflater har innebygde vannpaneler, som gjør det mulig å simulere utendørs temperaturforhold ved nedkjøling. Dette gir kontrollerbare forhold.

Figur 3.1 viser varmelaboratoriet med klimarom og deler av varme- og kjøleanlegget ved NBI.



*Figur 3.1: Varmelaboratoriet ved NBI*

### 3.1 – Konstruksjon

Konstruksjonen er bygget inne i klimarommet.

#### Gulv

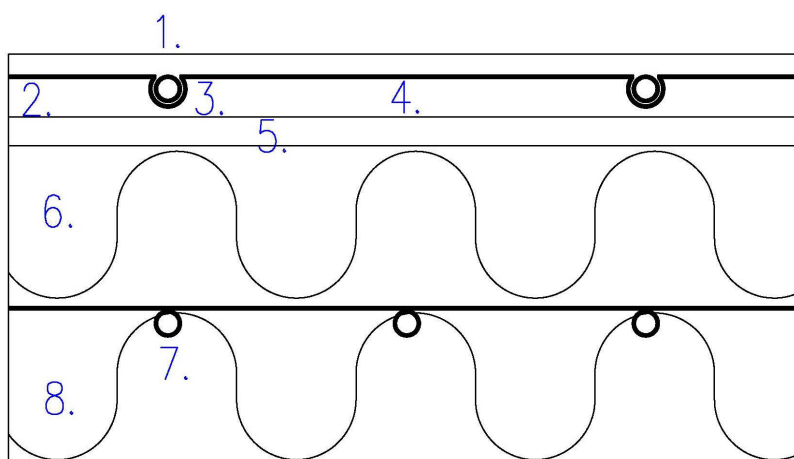
Gulvet i varmelaboratoriet er bygget opp slik det fremgår av tabell 3.1 og figur 3.2. Tabell 3.1 viser også endringene i gulvkonstruksjonen før og etter ombyggingen.

Tabell 3.1: Gulvkonstruksjonens oppbygning før og etter ombygging

Sjikt nr.	Materiale/komponent	Før ombygging Tykkelse [mm]	Etter ombygging Tykkelse [mm]
1	Parkett	13	13
2	Varmefordelingsplate	0,5	0,5
3	PEX-rør	17x2	20x2
4	Hunton Silencio Thermo	24	36
5	Sponplate	18	18
6	Mineralull	200	200
7	Kjølerør med fordelingsplate		
8	Polyuretan	100	100

Varmefordelingsplatene består av aluminium og er utført med omega-profil. Den prosentvise dekingen med fordelingsplater av gulvarealet er henholdsvis 50 % og 80 % før og etter ombygging. Hunton Silencio Thermo er en porøs trefiberplate sammenlimt med vannglass av 2 eller flere 12 mm plater. Platenes densitet er ca. 250 kg/m<sup>3</sup>. Gulvvarmerørene er av type PEX med diffusjonssperre på utvendig røroverflate. Utvendig rørdiameter før og etter ombygging er henholdsvis 17 og 20 mm. Veggtykkelsen på rørene er 2 mm, dvs. at innvendig diameter er 13 og 16 mm.

Figur 3.2 viser gulvkonstruksjonen etter ombygging. Selve gulvkonstruksjonen består av lag 1 til 6, mens utendørs temperaturforhold simuleres i sjiktet mellom lag 6 og 8.



Figur 3.2: Gulvkonstruksjonens lagvise oppbygging

## Tak

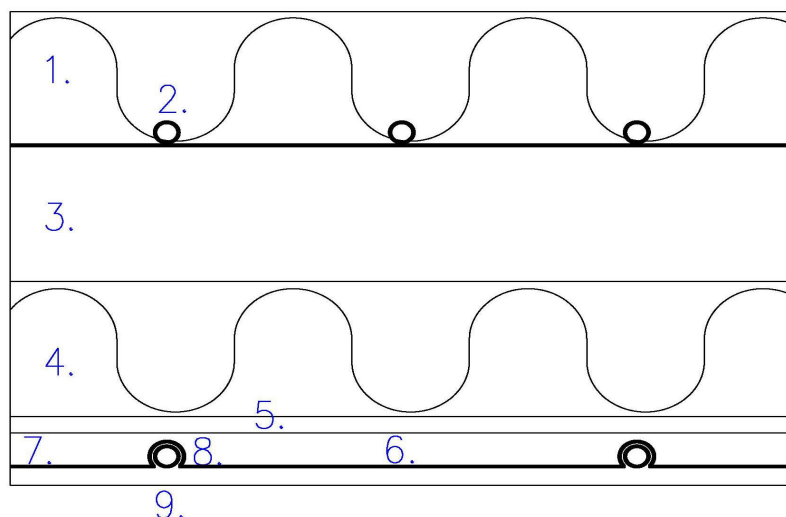
Taket i varmelaboratoriet er bygget opp slik det fremgår av tabell 3.2 og figur 3.3. Tabell 3.2 viser også endringene i takkonstruksjonen før og etter ombyggingen.

Tabell 3.2: Takkonstruksjonens oppbygning før og etter ombygging

Sjikt nr.	Materiale/komponent	Før ombygging Tykkelse [mm]	Etter ombygging Tykkelse [mm]
1	Polyuretan	100	100
2	Kjølerør med fordelingsplate		
3	Hulrom	100	100
4	Mineralull	200	200
5	Kryssfinerplate	12	12
6	Hunton Silencio Thermo	24	36
7	Varmefordelingsplate av aluminium	0,5	0,5
8	PEX-rør	17x2	20x2
9	Gipsplate	13	13

Varmefordelingsplatene består av aluminium og er utført med omega-profil. Den prosentvise dekingen med fordelingsplater av gulvarealet er henholdsvis 50 % og 80 % før og etter ombygging. Hunton Silencio Thermo er en porøs trefiberplate sammenlimt med vannglass av 2 eller flere 12 mm plater. Platenes densitet er ca. 250 kg/m<sup>3</sup>. Takvarmerørene er av type PEX med diffusjonssperre på utvendig røroverflate. Utvendig rørdiameter før og etter ombygging er henholdsvis 17 og 20 mm. Veggykkelsen på rørene er 2 mm, dvs. at innvendig diameter er 13 og 16 mm.

Figur 3.3 viser takkonstruksjonen etter ombygging. Selve takkonstruksjonen består av lag 3 til 9, mens utendørs temperaturforhold simuleres i sjiktet mellom lag 1 og 3.



Figur 3.3: Takkonstruksjonens lagvise oppbygging

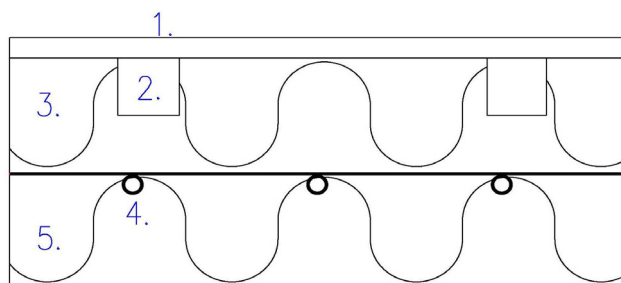
### Vegger

Veggene i varmelaboratoriet er bygget opp slik det fremgår av tabell 3.3 og figur 3.4. Av tabell 3.3 fremgår det at det ikke ble foretatt noen ombygging av veggkonstruksjonen. Veggene er ikke overflatebehandlet.

Tabell 3.3: Veggkonstruksjonens oppbygning før og etter ombygging

Sjikt nr.	Materiale/komponent	Før og etter ombygging Tykkelse [mm]
1	Kryssfiner	12
2	Stenderverk	
3	Mineralull	200
4	Kjølerør med fordelingsplate	
5	Polyuretan	100

Figur 3.4 viser veggkonstruksjonen. Selve takkonstruksjonen består av lag 3 til 9, mens utendørs temperaturforhold simuleres i sjiktet mellom lag 1 og 3.



Figur 3.4: Veggkonstruksjonens lagvise oppbygging

### Dør

Det er benyttet en standard ytterdør. Døren inklusiv dørkarm har U-verdi lik 1. Mellom døren og døren i kjølekappen er det laget til en isolasjonsmatte for å hindre unødig varmetap.

### Vindu

På vegg som vender mot nord, er det plassert en kjøleflate som kan simulere en vindusflate med ulike overflatetemperaturer.

### Mål

Tabell 3.4 viser arealer på alle overflater.

Tabell 3.4: Innvendige overflatearealer

Flate	Areal [m <sup>2</sup> ]
Vegg nord inkl. vindu	6,3
Vegg sør	8,3
Vegg øst	8,3
Vegg vest	8,3
Tak	13,0
Gulv	13,0
Dør inkl. karm	2,0
Vindu	1,0

Takhøyden i varmelaboratoriet er 2,3 m. Med en grunnflate på 13 m<sup>2</sup> gir dette et romvolum på 30 m<sup>3</sup>.

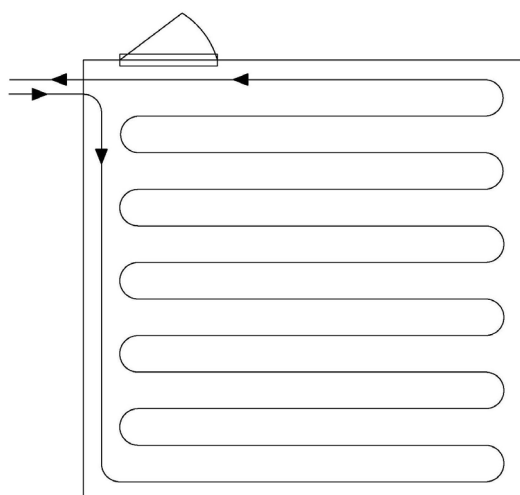
## 3.2 – Gulvvarmeanlegget

Tabell 3.5 gir en oversikt over viktige parametere i oppbygningen av gulvvarmeanlegget. Tabellen viser også endringer i anlegget før og etter ombygging.

Tabell 3.5: Beskrivelse av gulvvarmeanlegget

	Benevning	Før ombygging	Etter ombygging
Utvendig diameter	[mm]	17	20
Innvendig diameter	[mm]	13	16
Senteravstand c/c	[mm]	300	300
Lengde rørsøyfe	[m]	53	53
Heteflateareal	[m <sup>2</sup> ]	13	13
Varmefordelingsplate	[%] av heteflate	50	80

Figur 3.5 viser leggemønster for gulvvarmesløyfen før og etter ombygging. Retningen på vannstrømningen er også tegnet inn.



Figur 3.5: Leggemønster gulvvarmesløyfe før og etter ombygging



Figur 3.6: Varmefordelingsplater gulv før (t.v) og etter (t.h) ombygging

Bildene i figur 3.6 viser varmfeddelingsplatene med varmerør. Varmefeddelingsplatene før og etter ombygging dekker henholdsvis 50 % og 80 % av gulvarealet.

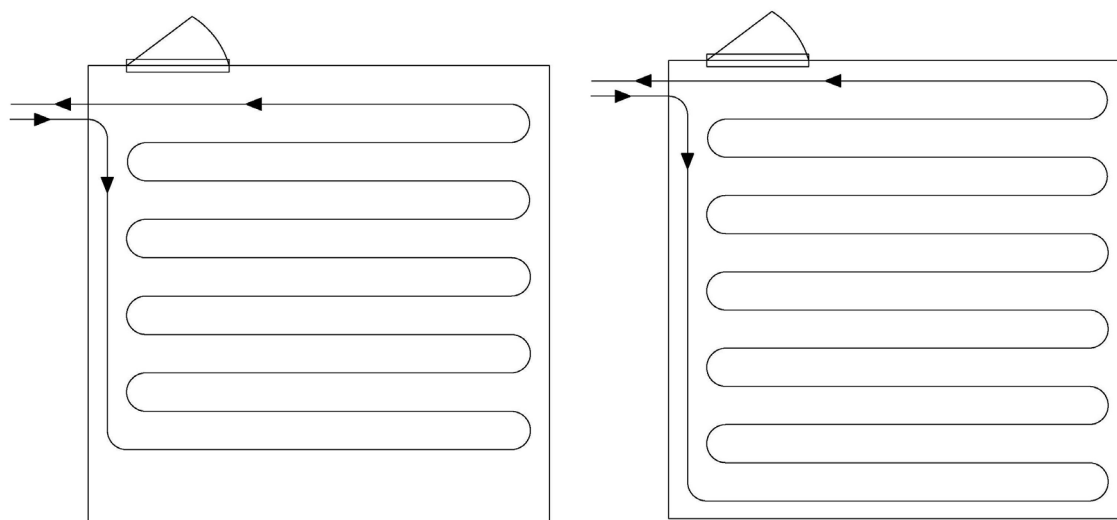
### 3.3 – Takvarmeanlegget

Tabell 3.6 gir en oversikt over viktige parametere i oppbygningen av takvarmeanlegget. Tabellen viser også endringer i anlegget før og etter ombygging.

Tabell 3.6: Beskrivelse av takvarmeanlegget

	Benevning	Før ombygging	Etter ombygging
Utvendig diameter	[mm]	17	20
Innvendig diameter	[mm]	13	16
Senteravstand c/c	[mm]	300	300
Lengde rørsøyfe	[m]	45	53
Heteflateareal	[m <sup>2</sup> ]	11,2	13
Varmefordelingsplate	[%] av heteflate	50	80

Figur 3.7 viser leggemønstre for takvarmesløyfen før og etter ombygging. Retningen på vannstrømningen er også tegnet inn. Ombyggingen av takvarmesløyfen gjør det lettere å kunne sammenligne avgitt effekt fra tak- og gulvarmeanlegget fordi arealene blir like. Varmefordelingen i rommet vil også bli jevnere etter ombygging.



Figur 3.7: Leggemønstre takvarmesløyfe før (t.v) og etter (t.h) ombygging

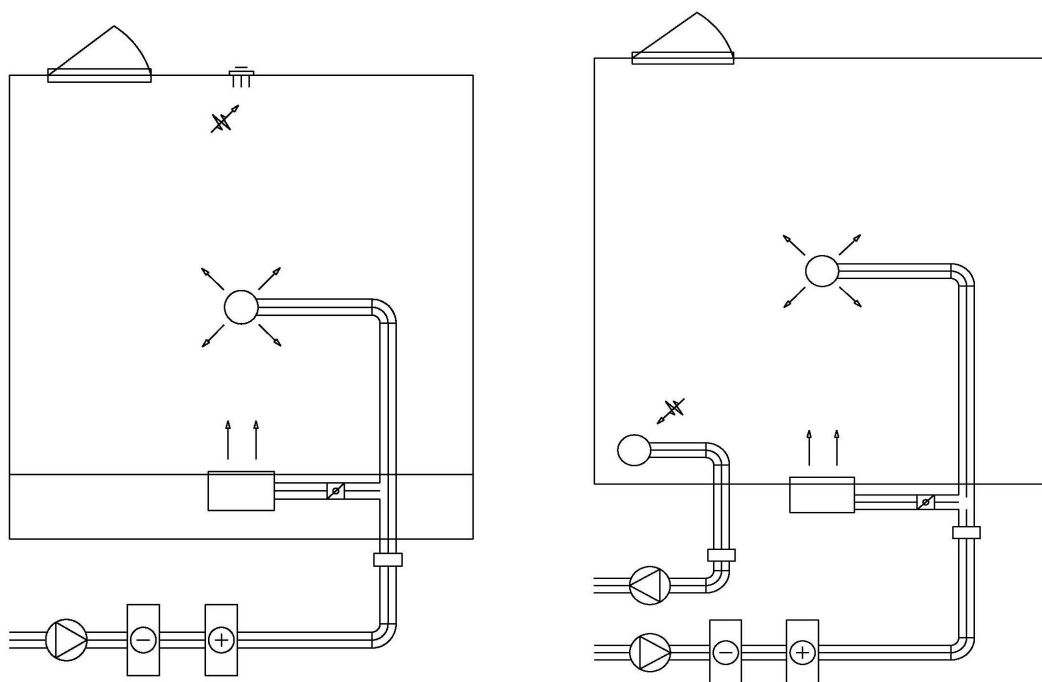


Figur 3.8: Varmefordelingsplater tak før (t.v) og etter (t.h) ombygging

Bildene i figur 3.8 viser varmfeddelingsplatene med varmerør. Varmefeddelingsplatene før og etter ombygging dekker henholdsvis 50 % og 80 % av takarealet.

### 3.4 – Ventilasjonsanlegget

Figur 3.9 viser hovedforskjellene til ventilasjonsanlegget før og etter ombygging, samt plassering av tillufts- og avtrekksventiler. Etter ombygging har både tilluftssiden og avtrekksiden vifte, dvs. balansert mekanisk ventilasjon. Før ombyggingen fungerte avtrekksventilen som en overstrømningsventil. Anlegget er bygget slik at tilluftsventilene, som er plassert i bakkant og i senter, kan benyttes vekselvis for ulike driftsforhold. Tilluftstemperaturen reguleres ved hjelp av et kjøle- og varmebatteri.



Figur 3.9: Ventilasjonsanlegget før (t.v.) og etter (t.h.) ombygging

Bildene i figur 3.10 viser tilluftsventilene levert av Auranor. Ventilene som er plassert i bakkant av rommet er av type TLK-2k med sideanslutning og løvfront med kort kastelengde. Ventilene er plassert i vegg oppunder taket og har dimensjon 125 mm. Tilluftsventilen som er plassert i senter av rommet er av type TLG uten plenumskammer. Spredetallerkenen er lydempet og har rillebolter for regulering av spaltehøyden i 3 trinn. Ventilene har dimensjon 125 mm.



Figur 3.10: Tilluftsventil type TLK-2k (t.v.) og TLG (t.h)

Luften blir tilført rommet ved såkalt omrøringsventilasjon. Omrøringsventilasjon vil si konsentrert lufttilførsel, med relativt stor hastighet i forhold til anbefalt hastighet i rommets oppholdssone. Ved omrøringsventilasjon tilføres luften først i en sone utenfor oppholdssonen, som reduserer hastighet og temperaturdifferanser til et komfortabelt nivå før luften strømmer inn i oppholdssonen.



I tilluftsventilen, som er plassert i senter av rommet, tilføres luften gjennom en sirkelformet spalteåpning. Dette gir en radiell klebende stråle langs takflaten. Bakkantventilen gir en klebende luftstråle som vokser kontinuerlig i bredden i innblåsningsretningen.

Før ombygging var avtrekket plassert nede ved gulv uten egen vifte. Avtrekksventilen etter ombygging er plassert i tak. Den er levert av Flexit (art.nr 09705) og har dimensjon 125 mm. Avtrekksventilens plassering har i praksis liten innvirkning på strømningsbildet i rommet når tilluften ikke er varmere enn romluften. Ved plassering av avtrekksventilen er det tatt hensyn til at det ikke kan oppstå en kortslutning, dvs. at luften trekkes ut før den har blandet seg med romluften.

## 4. – Beregninger

### 4.1 – Energibalansen for varmelaboratoriet

$$Q_1 = Q_2 + Q_3 + Q_4 = Q_5 + Q_6 \quad [\text{W}] \quad (4.1)$$

$Q_1$	= tilført effekt til energikilden (tak- eller gulvvarme)	[W]
$Q_2$	= tilført effekt fra tak- eller gulvvarme ved stråling	[W]
$Q_3$	= tilført effekt fra tak- eller gulvvarme ved konveksjon	[W]
$Q_4$	= transmisjonstap gjennom tak- eller gulvkonstruksjon	[W]
$Q_5$	= ventilasjonsvarmetap	[W]
$Q_6$	= summen av transmisjonstap	[W]

Det sees bort i fra infiltrasjonstap ved beregning av energibalansen ettersom varmelaboratoriet er omgitt av stillestående luft i kontrollerte omgivelser.

Appendiks A inneholder forklaringer til beregningene av temperaturdifferansene etter ombygging i formel 4.2-4.7 iht. målepunktene i figur 5.3 og 5.4.

#### *Tilført effekt*

$$Q_1 = \dot{q} \cdot c_p \cdot \Delta t_1 \quad [\text{W}] \quad (4.2)$$

$\dot{q}$	= massestrøm vann	[kg/s]
$c_p$	= spesifikk varmekapasitet	[J/kgK]
$\Delta t_1$	= temperaturdifferanse innløp og utløp	[K]

#### *Stråling*

$$Q_2 = \sum (\varepsilon \cdot \sigma \cdot F \cdot A_i \cdot (T_{t,g}^4 - T_i^4)) \quad [\text{W}] \quad (4.3)$$

$\varepsilon$	= emissivitet	[-]
$\sigma$	= $5,67 \cdot 10^{-8}$ (Stefan-Boltzmanns konstant)	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$F$	= vinkelfaktor	[-]
$A_i$	= heteflatens areal	[m <sup>2</sup> ]
$T_t$	= temperatur heteflate tak	[K]
$T_g$	= temperatur heteflate gulv	[K]
$T_i$	= temperatur på omgivende flater	[K]
$i$	= tak, gulv, vegg nord, vegg sør, vegg øst og vegg vest	

### Konveksjon

$$Q_3 = \alpha_k \cdot A_2 \cdot \Delta t_2 \quad [\text{W}] \quad (4.4)$$

$\alpha_k$  = konvektivt varmeovergangstall [W/m<sup>2</sup>K]  
 $A_2$  = heteflatens areal [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta t_2$  = temperaturdifferanse heteflate og operativ temperatur [K]

### Transmisjonstap tak/gulv

$$Q_4 = U \cdot A_3 \cdot \Delta t_3 \quad [\text{W}] \quad (4.5)$$

$U$  = varmegjennomgangskoeffisient [W/m<sup>2</sup>K]  
 $A_3$  = areal heteflate [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta t_3$  = temperaturdifferansen over tak- eller gulvkonstruksjonen [K]

### Ventilasjonsvarmetap

$$Q_5 = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta t_4 \quad [\text{W}] \quad (4.6)$$

$\dot{m}$  = luftmengde [kg/s]  
 $c_p$  = spesifikk varmekapasitet [J/kgK]  
 $\Delta t_4$  = temperaturdifferanse tilluft og avtrekk [K]

### Summen av transmisjonstap

$$Q_6 = \sum (U \cdot A_4 \cdot \Delta t_5) \quad [\text{W}] \quad (4.7)$$

$U$  = varmegjennomgangskoeffisient [W/m<sup>2</sup>K]  
 $A_4$  = areal flate [m<sup>2</sup>]  
 $\Delta t_5$  = temperaturdifferansen over bygningsdelen [K]

## 4.2 – Varmegjennomgangskoeffisienter

Varmegjennomgangskoeffisienten (U-verdi) er beregnet etter summasjonsmetoden med tillegg for utførelse iht. NS 3031, se ligning 4.8.

$$U = \frac{1}{\sum R} + \Delta U_a \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (4.8)$$

der

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad [\text{m}^2\text{K/W}] \quad (4.9)$$

$U$	= varmegjennomgangskoeffisient	$[\text{W/m}^2\text{K}]$
$\sum R$	= summen av varmemotstander	$[\text{m}^2\text{K/W}]$
$\Delta U_a$	= tillegg for utførelse 0,015 W/m <sup>2</sup> K	
$d$	= materialsjiktets tykkelse	$[\text{m}]$
$\lambda$	= varmekonduktivitet	$[\text{W/mK}]$

Ved transmisjonsberegningene benyttes målte overflatetemperaturer. Det er derfor sett bort fra den konvektive varmeovergangsmotstanden ved beregning av U-verdier.

### Gulv

Varmemotstanden for de ulike materialsjiktene i gulvkonstruksjonen før og etter ombygging er angitt i tabell 4.1.

Tabell 4.1: Varmemotstand for gulvkonstruksjonen

Materiale	$d_{\text{før}}$ [mm]	$d_{\text{etter}}$ [mm]	$\lambda$ [W/mK]	$R_{\text{før}}$ [m <sup>2</sup> K/W]	$R_{\text{etter}}$ [m <sup>2</sup> K/W]	Kommentar
Parkett Eik	13	13	0,14	0,09	0,09	NS 3031
Hunton Silencio Thermo	24	36	0,05	0,48	0,72	NBI 471.010
Sponplate	18	18	0,12	0,15	0,15	NS 3031
Mineralull	200	200	0,036	5,56	5,56	NS 3031

U-verdien for gulvkonstruksjonen uten parkett er beregnet til 0,18 W/m<sup>2</sup>K før ombygging. Denne verdien anvendes ved beregning av tapet fra gulvet,  $Q_4$ , og transmisjonstapet gjennom gulvkonstruksjonen ved benyttelse av gulvvarme,  $Q_6$ .

U-verdien for gulvkonstruksjonen uten parkett er beregnet til 0,17 W/m<sup>2</sup>K etter ombygging. Denne verdien anvendes ved beregning av tapet fra gulvet,  $Q_4$ , og transmisjonstapet gjennom gulvkonstruksjonen ved benyttelse av gulvvarme,  $Q_6$ .

U-verdien for gulvkonstruksjonen med parkett er beregnet til 0,17 W/m<sup>2</sup>K før og etter ombygging. Denne verdien anvendes ved beregning av transmisjonstapet gjennom gulvkonstruksjonen ved benyttelse av takvarme,  $Q_6$ .

### Tak

Varmemotstanden for de ulike materialsjiktene i takkonstruksjonen før og etter ombygging er angitt i tabell 4.2.

Tabell 4.2: Varmemotstand for takkonstruksjonen

Materiale	d <sub>før</sub> [mm]	d <sub>etter</sub> [mm]	λ [W/mK]	R <sub>før</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>etter</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	Kommentar
Gipsplate	13	13		0,06	0,06	NS 3031
Hunton Silencio Thermo	24	36	0,05	0,48	0,72	NBI 471.010
Kryssfiner	12	12		0,08	0,08	NS 3031
Mineralull	200	200	0,036	5,56	5,56	NS 3031
Hulrom	200	200		0,18	0,18	NS-EN ISO 6946

U-verdien for takkonstruksjonen uten gipsplate er beregnet til 0,17 W/m<sup>2</sup>K før og etter ombygging. Denne verdien anvendes ved beregning av tapet fra taket, Q<sub>4</sub>, og transmisjonstapet gjennom takkonstruksjonen ved benyttelse av takvarme, Q<sub>6</sub>.

U-verdien for takkonstruksjonen med gipsplate er beregnet til 0,17 W/m<sup>2</sup>K før og etter ombygging. Denne verdien anvendes ved beregning av transmisjonstapet gjennom takkonstruksjonen ved benyttelse av gulvvarme, Q<sub>6</sub>.

### Vegger

Varmemotstanden for de ulike materialsjiktene i veggkonstruksjonen før og etter ombygging er angitt i tabell 4.3.

Tabell 4.3: Varmemotstand for veggkonstruksjonen

Materiale	d <sub>før</sub> [mm]	d <sub>etter</sub> [mm]	λ [W/mK]	R <sub>før</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>etter</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	Kommentar
Kryssfiner	12	12		0,08	0,08	NS 3031
Mineralull	200	200	0,036	5,56	5,56	NS 3031

U-verdien for veggkonstruksjonene uten stenderverk er beregnet til 0,19 W/m<sup>2</sup>K før og etter ombygging. Beregninger med stenderverk gir en økning på 2 % av U-verdien i forhold til tabell 4.3. Ved beregninger er det derfor sett bort fra stenderverkene. Stenderne utgjør ingen kuldebro, da det er isolert mellom stenderverket og kjøleflatene, se figur 3.4.

### Dør

Varmemotstanden for de ulike materialsjiktene i dørkonstruksjonen før og etter ombygging er angitt i tabell 4.4.

Tabell 4.4: Varmemotstand for dørkonstruksjonen

Materiale	d <sub>før</sub> [mm]	d <sub>etter</sub> [mm]	λ [W/mK]	R <sub>før</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	R <sub>etter</sub> [m <sup>2</sup> K/W]	Kommentar
Dør				1,00	1,00	Leverandør
Mineralull	100	100	0,036	2,78	2,78	NS 3031

U-verdien for døren samt isolering er beregnet til 0,28 W/m<sup>2</sup>K før og etter ombygging.

## 4.3 – Strålingsutveksling

### *Vinkelfaktorer*

Vinkelfaktor angir den delen av strålingen fra en flate som treffer en annen flate direkte. Ved beregning av vinkelfaktor er det tatt utgangspunkt i diagrammer fra boken *Introduction to Thermodynamics and Heat Transfer* [18].

Vinkelfaktorene er:

- tak-gulv og gulv-tak = 0,34
- tak-veggflater = 0,165
- gulv-veggflater = 0,165

Summen av vinkelfaktorene tilfredsstiller de fysikalske betingelsene.

### *Emissivitet*

De ulike flatenes emissivitet er i henhold til tabell i *ThermaCAM PM695 Operator's Manual* [19]. Tabell 4.5 viser emissivitetsverdiene for overflatematerialer i varmelaboratoriet benyttet til varmeberegninger.

*Tabell 4.5: Emissivitetsverdier for ulike materialer benyttet i beregninger*

Flate	Materiale	Emissivitet
Vegger	Ubehandlet kryssfiner	0,85
Tak	Gipsplater	0,85
Gulv	Parkett	0,85

## 4.4 – Arkimedestallet

Ved horisontal innblåsning av ikke-isoterm tilluft kommer strålen til å påvirkes av en opp- eller nedadrettet kraft avhengig av om tilluften er over- eller undertemperert i forhold til romluften. Årsaken til dette er at tilluften har en tetthetsforskjell i forhold til omgivende luft, som gir opphav til en gravitasjonskraft som påvirker strålen. Er gravitasjonskraften stor i forhold til treghetskraften, bøyes strålen av. Forholdet mellom gravitasjons- og treghetskraft kalles for Arkimedestallet og betegnes med  $Ar$  [20].

Arkimedestallet kan beregnes ved tilluftsåpningen,  $Ar_0$ , og i strålen i avstand  $x$  fra tilluftsåpningen,  $Ar_x$ . I forsøkene er  $Ar_0$  beregnet. Denne verdien er beregnet for å gi en karakteristikk av ventilasjonsluften som tilføres rommet.

$$Ar_0 = \frac{g \cdot \Delta T_o \cdot l}{T_r \cdot v_o^2} \quad [-] \quad (4.10)$$

der

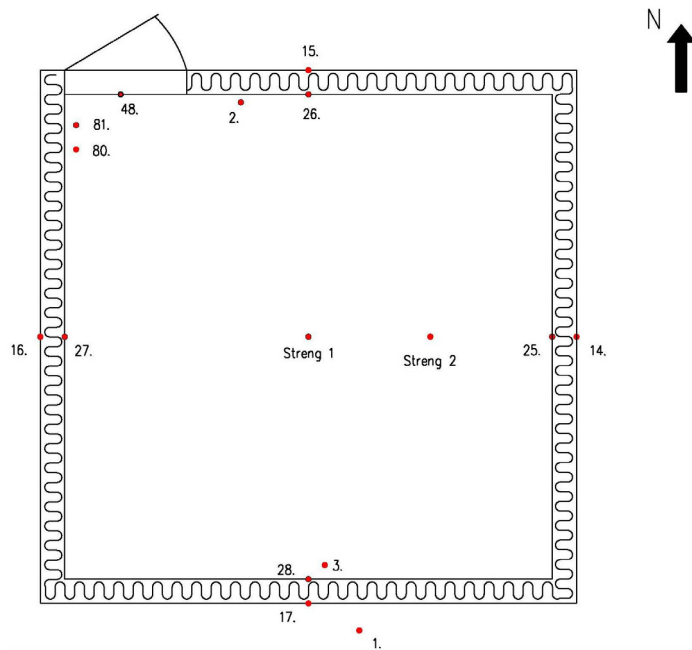
$$l = \sqrt{A_{eff}} = \sqrt{\frac{q_o}{v_o}} \quad [m] \quad (4.11)$$

$g$	= tyngdens akselerasjon	[m/s <sup>2</sup> ]
$\Delta T_o$	= temperaturdifferansen mellom tilluft og romluft	[K]
$l$	= ventiltverrsnitt	[m]
$T_r$	= romtemperatur	[K]
$v_o$	= effektiv utløpshastighet	[m/s]
$A_{eff}$	= effektivt ventilareal	[m <sup>2</sup> ]
$q_o$	= luftmengde gjennom ventilen	[m <sup>3</sup> /s]

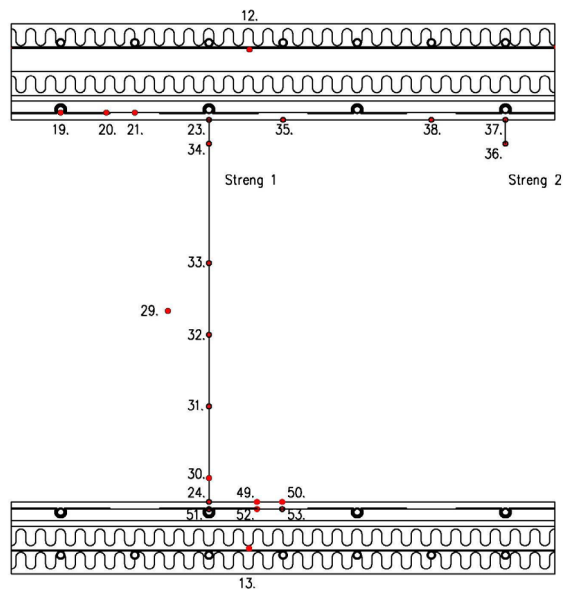
## 5. – Målepunkter

### 5.1 – Før ombygging

Målepunktene angir plassering av temperaturfølere i varmelaboratoriet ved tak- og gulvvarmemålingene før ombygging.



Figur 5.1: Målepunkter før ombygging (plan)



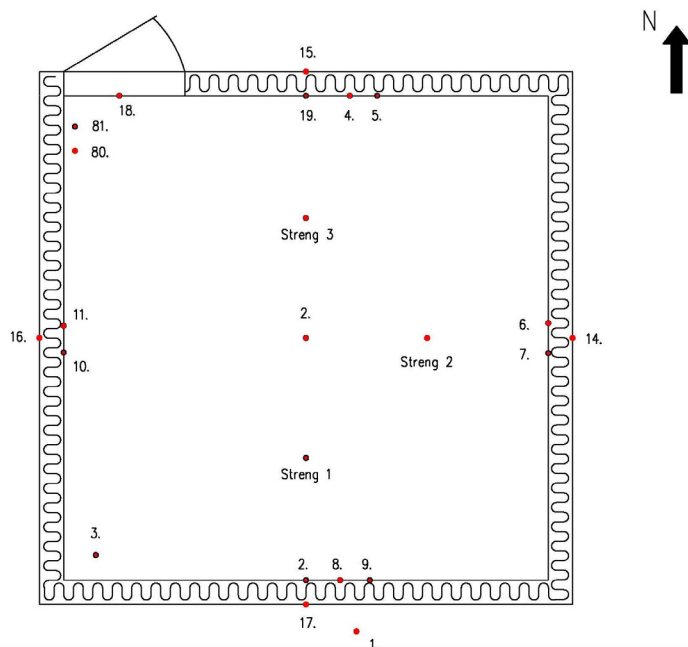
Figur 5.2: Målepunkter før ombygging (snitt)

Figur 5.1 og 5.2 viser plassering av målepunkter for temperaturmålinger før ombygging. For navn og nærmere forklaring til målepunktene henvises det til appendiks B.

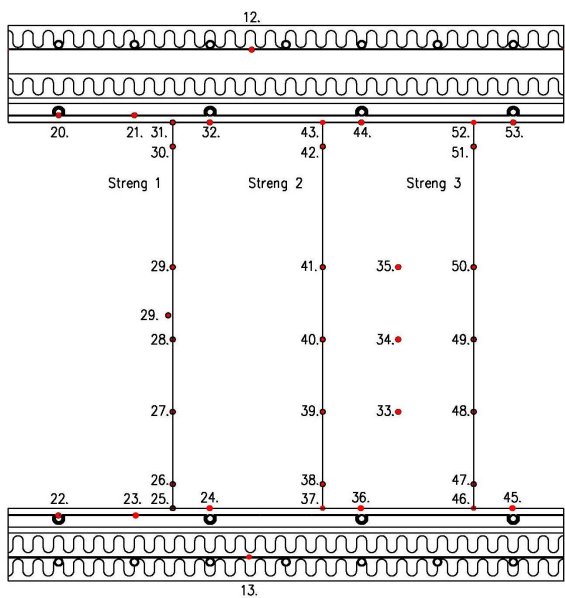


## 5.2 – Etter ombygging

Målepunktene angir plassering av temperaturfølere i varmelaboratoriet ved tak- og gulvvarmemålingene etter ombygging.



Figur 5.3: Målepunkter etter ombygging (plan)



Figur 5.4: Målepunkter etter ombygging (snitt)

Figur 5.3 og 5.4 viser plassering av målepunkter for temperaturmålinger etter ombygging. For navn og nærmere forklaring til målepunktene henvises det til appendiks B.

## 6. – Instrumentering

### *Termoelementer*

Det er benyttet termoelementer av type T til måling av overflatetemperaturer og lufttemperaturer i varmelaboratoriet. Termoelementene er produsert av Thermo Electric og har typebetegnelse P-26-TT. De tilhører nøyaktighetsklasse 1 etter IEC 584-2. Termoelementene opererer innenfor temperaturområdet fra  $-40$  til  $125^{\circ}\text{C}$ .

Elementene som måler romluftstemperatur er beskyttet mot varmestråling ved hjelp av en sylinder av aluminium, se appendiks C for kalibrering.

### *Pt100-elementer*

Det er benyttet 6 mm Pt100-elementer montert i beskyttelseslomme. Den registrer temperaturen i væskestrømmen til varme- og kjølekursene og er levert av Teck Instrument AS. Pt100-elementetene tilhører toleranseklasse A etter IEC 751, og opererer innenfor temperaturområdet  $-30$  til  $50^{\circ}\text{C}$ .

### *Globetermometere*

Globetermometerne beregner gjennomsnittlig strålingstemperatur, og diameteren på globetermometerne er 15 cm. Før og etter ombygging er det benyttet henholdsvis en og tre stk.

### *Datalogger*

Loggeren er av type 3054A ADA Control System fra Hewlett Packard. Styringsprogrammet er skrevet i Basic. Dataloggeren registrer temperaturer, vannmengde, effektavgivelsen til oppvarmingsobjektet, samt tillufts- og avtrekksmengde til ventilasjonsanlegget. Loggeintervallet er tre minutter.

### *Hastighetsfølere*

Til måling av lufthastigheter brukes SwemaAir 300. SwemaAir 300 er et universalinstrument for måling av lufthastigheter, luftmengde, luftfuktighet, temperaturer, trykk og  $\text{CO}_2$ . Til instrumentet kobles en giver. Kalibreringen er gjennomført av fabrikant og til instrumentet medfølger et kalibreringsbevis. Loggeintervallet er tre minutter.

### *Vannmengdemåler*

Volumstrømsmåleren registrerer væskestrømmen ut på tak- og gulvvarmeanlegget. Den er levert av Baily, Fisher & Porter modell 10DE2312B, se appendiks C for kalibrering.

### Luftmengdemålere

Til luftmengdemålingene benyttes to trykceller fra Druckaufnehmer type PU 1. De måler trykkdifferansen over måleblendene plassert i tillufts- og avtrekkskanal. Måleblendene er av type Baas  $\phi 160/2$ . Luftmengden beregnes ut fra følgende ligning:

$$q = k \cdot \Delta p^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (6.1)$$

$q$	= luftmengde	$[\text{m}^3/\text{h}]$
$k$	= justeringsfaktor	$[-]$
$\Delta p$	= trykkdifferanse	$[\text{Pa}]$
$n$	= justeringsfaktor	$[-]$

Kalibrering av måleblendene ble utført september 2000 ved NBIs kalibreringslaboratorium. Faktorene  $k$  og  $n$  ble henholdsvis 44,8 og 0,494 ved en lufttemperatur på 20°C. Det korrigeres for avvik fra kalibreringstemperatur, se ligning 6.2.

$$q = k^* \cdot \left( \frac{\Delta p}{\rho} \right)^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (6.2)$$

der

$$k^* = k \cdot \rho^n \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (6.3)$$

$\rho$	= luftens tetthet	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
--------	-------------------	--------------------------

## 7. – Innledende forsøk

### 7.1 – Forsøksoppsett

Tabell 7.1 gir en oversikt over innstilte verdier fra innledende forsøk i varmelaboratoriet før og etter ombygging. Tabellen viser blant annet utendørstemperatur, vannmengde på varmesløyvene og ventilasjonsluftmengde. Utendørstemperaturen er lik for alle kjøleflater, dvs. at både tak, gulv og vegger har samme temperatur.

Tabell 7.1: Parametere for innledende forsøk før og etter ombygging

Forsøk nummer		Før ombygging				Etter ombygging			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Heteflate		Tak	Tak	Gulv	Gulv	Tak	Tak	Gulv	Gulv
Utetemperatur	[°C]	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5	+5
Turtemperatur	[°C]	30	30	30	30	30	30	30	30
Vannmengde	[kg/s]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Luftmengde	[m <sup>3</sup> /h]	-	30	-	30	-	30	-	30
Luftskifte	[h <sup>-1</sup> ]	0	1	0	1	0	1	0	1
Tilluftstemperatur	[°C]	-	18	-	18	-	18	-	18

#### Valg av forhåndsinnstilte verdier

Vannbåren lavtemperaturvarme opererer med turtemperaturer i området 25-35°C. Til forsøkene er det valgt en turtemperatur på 30°C. Denne vanntemperaturen vil gi tilstrekkelig tilført effekt for å opprettholde en romtemperatur i varmelaboratoriet på ca. 22°C ved en utetemperatur på 5°C.

Tilluftstemperaturen bør være 1-2°C lavere enn romluftens temperatur. Tilluftstemperaturen bør ikke være for kald, da kald luft kan falle for raskt ned i oppholdssonen å forårsake trekkproblemer. Ut fra en temperatur i romluften på ca. 22°C er tilluftstemperaturen valgt til 18°C. Dette tilsvarer en temperaturdifferanse på tilnærmet 4°C, noe som er i henhold til vanlig praksis ved dimensjonering av ventilasjonsanlegg. Den valgte temperaturen vil ikke gi problemer mht. trekk.

For boliger med mekanisk ventilasjon er det vanlig med et luftskifte på 1 h<sup>-1</sup>. Varmelaboratoriet har et romvolum på 30 m<sup>3</sup> og dimensjonerende luftmengden blir dermed 30 m<sup>3</sup>/h.

Volumstrømmen gjennom rørene er begrenset av hastighet og trykkfall. Trykkfall og hastighet bør ikke overstige henholdsvis 200 Pa/m og 0,5 m/s [21]. I forsøkene er volumstrøm valgt til 0,050 kg/s, for å oppfylle kravene til trykkfall og hastighet.

## 7.2 – Resultater med diskusjon

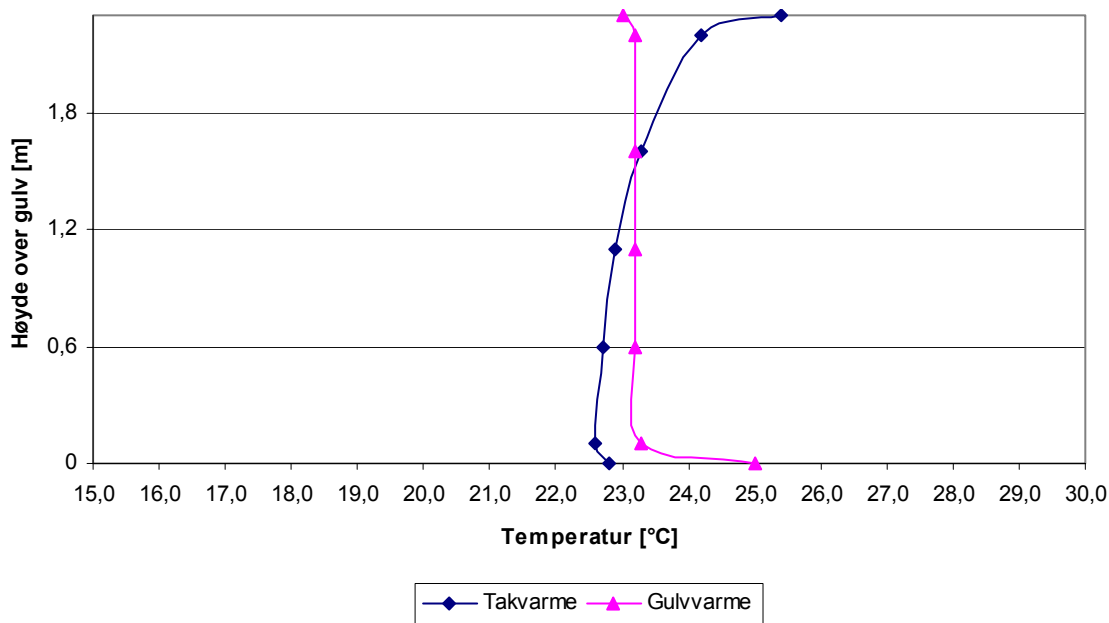
Tabell 7.2 viser måleresultater fra innledende forsøk. Tabellen viser tilført effekt, operativ temperatur og overflatetemperaturen for heteflatene før og etter ombygging.

Den tilførte effekten øker ved benyttelse av ventilasjon. Effekten øker også før og etter ombygging med samme forsøksoppsett. Resultatene viser at den operative temperaturen synker når det benyttes ventilasjon i forsøkene. Dette er på grunn av at tilluftstemperaturen er underkjølt (ikke-isoterm) i forhold til romluften.

Tabell 7.2: Måleresultater for innledende forsøk før og etter ombygging

Forsøk nummer		Før ombygging				Etter ombygging			
		1	2	3	4	5	6	7	8
Heteflate		Tak	Tak	Gulv	Gulv	Tak	Tak	Gulv	Gulv
Tilført effekt, $Q_1$	[W/m <sup>2</sup> ]	17,3	19,2	15,5	17,0	18,2	20,6	18,2	20,0
Operativ temp.	[°C]	21,0	20,5	21,7	20,9	23,0	22,3	23,1	22,1
Heteflatetemp.	[°C]	23,3	22,9	23,1	22,4	25,5	24,9	24,9	24,1

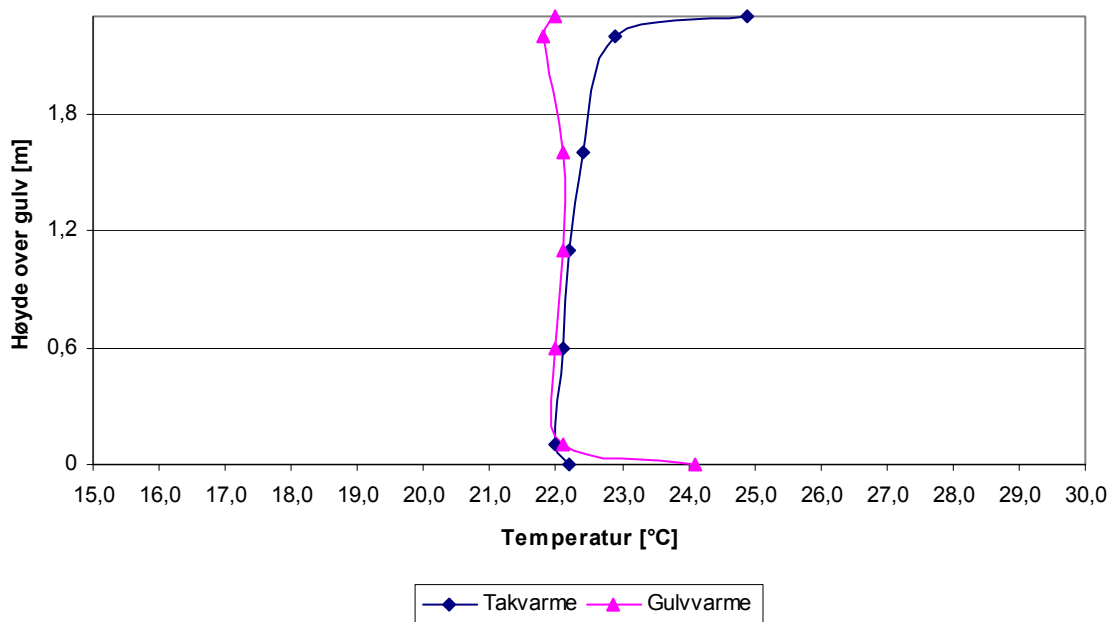
Figur 7.1 viser vertikal temperaturfordeling for gulv- og takvarme uten ventilasjon, forsøk nummer 5 og 7 iht. tabell 7.2. Det nederste og øverste punktet i figuren viser henholdsvis overflate-temperatur på gulv og tak. Takhøyden er 2,3 m. Dette gjelder også for figur 7.2.



Figur 7.1: Vertikal temperaturfordeling for tak- og gulvvarme uten ventilasjon

Temperaturkurven for gulvvarme viser at temperaturen er tilnærmet lik uavhengig av høyde over gulv, mens temperaturkurven for takvarme er stigende med økende høyde over gulv. For gulvvarme er temperaturen på gulvoverflaten høyere enn gjennomsnittlig romluftstemperatur, mens den gjennomsnittlig romluftstemperatur for takvarme er noe høyere enn gulvtemperaturen.

Figur 7.2 viser vertikal temperaturfordeling for gulv- og takvarme med ventilasjon, forsøk nummer 6 og 8 iht. tabell 7.2.



Figur 7.2: Vertikal temperaturfordeling for tak- og gulvvarme med ventilasjon ( $1\ h^{-1}$ )

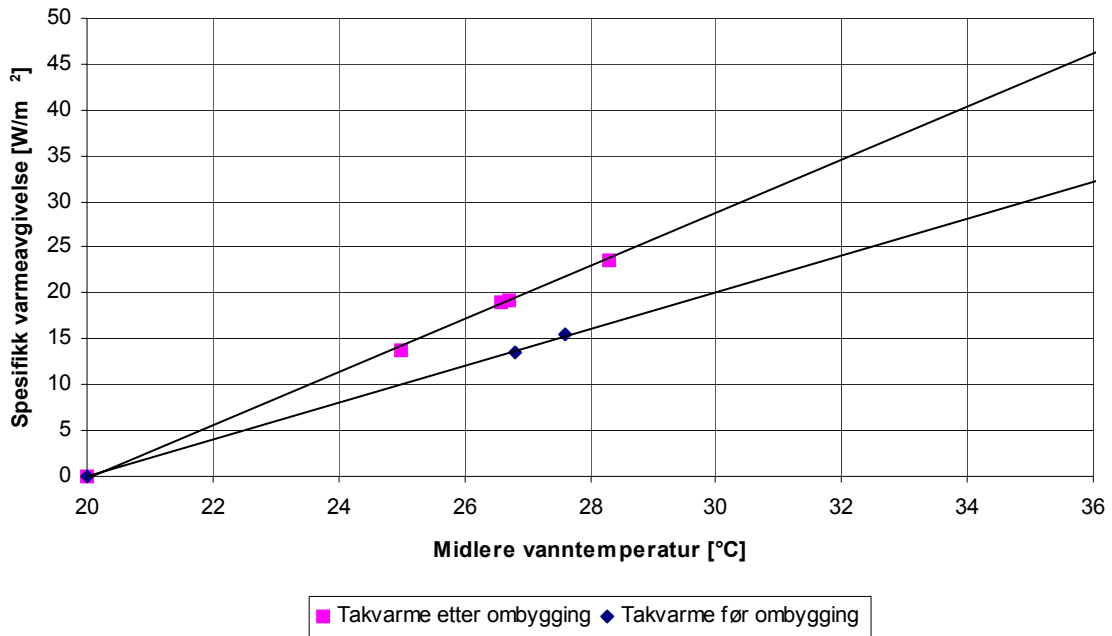
Temperaturkurvene for tak- og gulvvarme viser at temperaturen er tilnærmet lik uavhengig av høyde over gulv. For gulvvarme er temperaturen på gulvoverflaten høyere enn gjennomsnittlig romluftstemperatur, mens den gjennomsnittlig romluftstemperatur for takvarme er tilnærmet lik overflatetemperaturen.

Innledende forsøk viser at kravet til maksimal vertikal temperaturforskjell er tilfredsstilt for tak- og gulvvarme med og uten ventilasjon. Temperaturforskjellen mellom hode og føtter overstiger ikke  $3^{\circ}\text{C}$ , dvs. at antall misfornøyde er under 5 % iht. figur 2.2.

Innledende forsøk viser også at kravet til maksimal asymmetrisk stråling er oppfylt for tak- og gulvvarme med og uten ventilasjon. Strålingsasymmetrien mellom personer og varm himling overstiger ikke  $5^{\circ}\text{C}$ , dvs. at antall misfornøyde er under 5 % iht. figur 2.3.

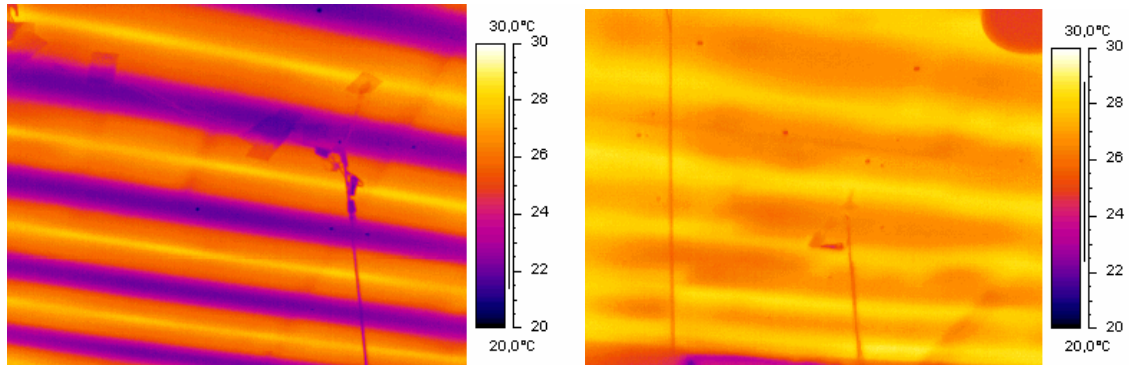
Figur 7.1 og 7.2 viser at den vertikale temperaturgradientkurven for takvarme blir rettere med ventilasjon, dvs. bedre omrøring av romluften slik at temperaturen blir mer homogen. Med ventilasjon tilnærmer kurven seg den ideelle temperaturfordelingskurven, se figur 2.5. Dette er komfortmessig gunstig. Den vertikale temperaturgradientkurven for gulvvarme blir tilnærmet lik både med og uten ventilasjon.

Figur 7.3 viser spesifikk varmeavgivelse som funksjon av midlere vanntemperatur for takvarmeanlegget før og etter ombygging ved en romtemperatur på 20°C. Det er ikke benyttet ventilasjon. Figuren viser at den spesifikke varmeavgivelsen øker etter ombyggingen. Dette skyldes i første rekke at dekningsprosenten med varmefordelingsplater av aluminium er henholdsvis 50 % og 80 % før og etter ombygging, se kapittel 3.3.

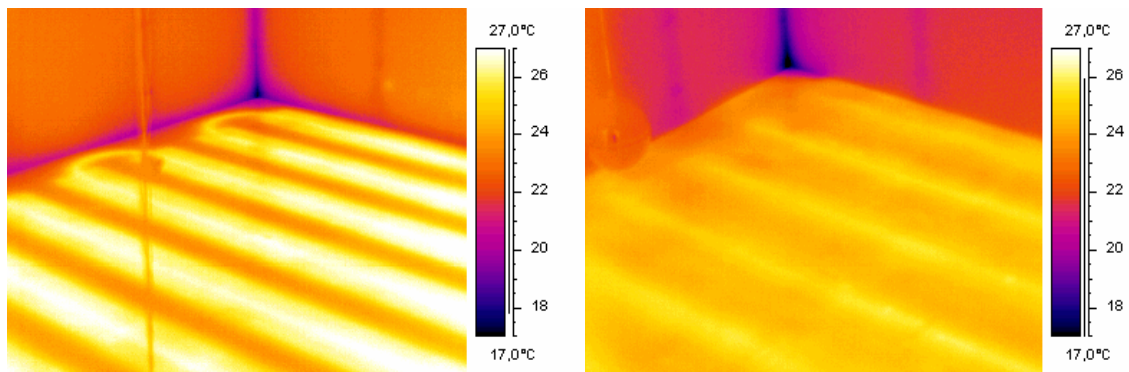


Figur 7.3: Spesifikk varmeavgivelse for takvarmeanlegget ved en romtemperatur på 20°C før og etter ombygging

Bildene i figur 7.4 og 7.5 er tatt med et termograferingskamera. De viser henholdsvis temperaturfordelingen over tak- og gulvflaten før og etter ombygging ved drift av varmeanleggene. Bildene illustrerer at temperaturfordelingen over flaten bedres etter ombyggingen. Overflatetemperaturen på parketten og gipsplatene er naturlig nok høyest over plasseringene av røroverflaten og varmfordelingsplatene.



Figur 7.4: Temperaturfordelingen over takflaten før (t.v.) og etter (t.h) ombygging



Figur 7.5: Temperaturfordelingen over gulvflaten før (t.v.) og etter (t.h) ombygging



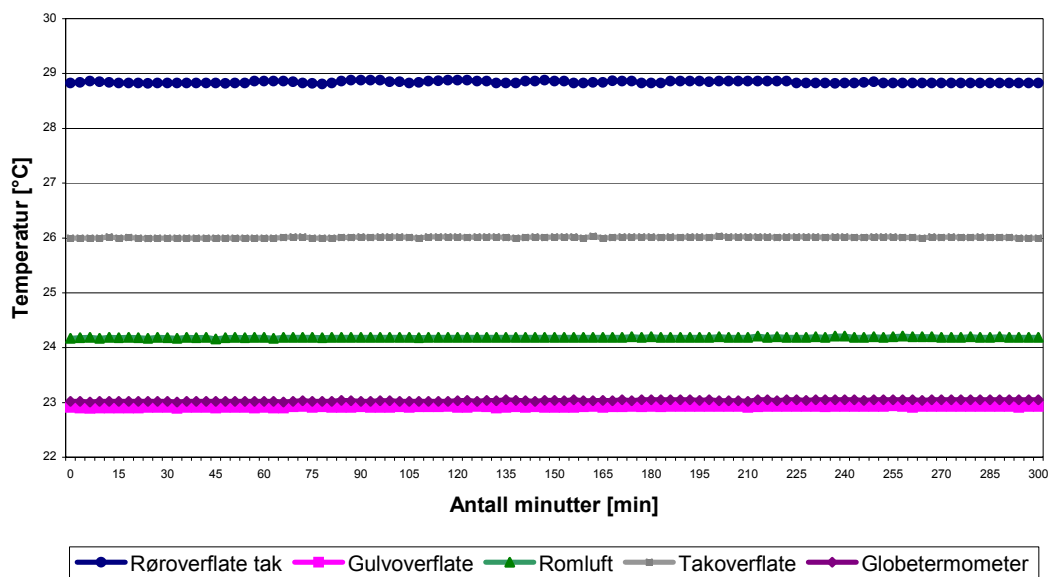
### 7.3 – Prosedyrer og stabilitet

Dette kapittelet omtaler repeterbarhet og usikkerhet i forsøkene.

#### *Stasjonære temperaturforhold*

I beregningene er det gjennomsnittstemperaturene over de to siste timene som benyttes. Forutsetningen er at temperaturforholdene i varmelaboratoriet er stasjonære. Det har vist seg at det tar ca. et døgn før stasjonære forhold er oppnådd. Ved store endringer av parametere i forsøksoppsettene kan dette ta noe lengre tid.

Figur 7.6 viser stasjonære temperaturforhold over fem timer for forsøk nummer 5 iht. tabell 7.1. Målepunktene viser temperaturer for romluft, takoverflate, gulvoverflate, røroverflate i tak og globetermometer.



Figur 7.6: Stasjonære temperaturforhold over fem timer for forsøk nr. 5

#### *Målenøyaktighet*

Til kontroll av temperaturmålingene er det foretatt en sammenligning av tilført effekt ( $Q_1$ ) og summen av ventilasjonstapet ( $Q_5$ ) og transmisjonstapet ( $Q_6$ ), se ligning 4.1. Typiske avvik i beregningen av energibalansen for varmelaboratoriet før og etter ombygging viser seg å være  $\pm 8\%$ . Dette utgjør i størrelsesorden  $\pm 30$  W. Dette er en relativt liten verdi, så resultatene anses for å være tilfredsstillende. I dette avviket ligger også usikkerheten i beregning av eksakte U-verdier inne.

Termoelementene har etter kalibrering et avvik på  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  ved  $20^\circ\text{C}$ , dvs. et avvik på  $0,25\%$ . Se appendiks C for kalibreringsdata.

### *Varmeanleggenes virkningsgrader*

Tak- og gulvvarmeanleggets virkningsgrad,  $\eta$ , beregnes etter NS-EN 832, se ligning 7.1.

$$\eta_h = \frac{Q_h + Q_w}{Q_h + Q_t + Q_w} \quad [-] \quad (7.1)$$

$\eta$	= varmeanleggets virkningsgrad	[-]
$Q_h$	= varmebehovet til romoppvarming	[W]
$Q_w$	= varmebehovet til varmtvannsoppvarming	[W]
$Q_t$	= det samlede varmetapet forårsaket av varmeanlegget	[W]

Det er sett bort fra varmebehovet til varmtvannsoppvarming,  $Q_w$ , ved beregning av virkningsgraden for varmeanleggene i varmelaboratoriet.

Virkningsgraden for både tak- og gulvvarmeanlegget er beregnet til 96 %.

## 8. – Konklusjon

Innledende forsøk viser at den vertikale temperaturfordelingen med og uten ventilasjon for gulvvarme, stemmer godt overens med den ideelle temperaturfordelingskurven [17]. For takvarme er temperaturfordelingskurven ulik den ideelle kurven. Uten ventilasjon får vi en temperatursjiktning der temperaturen øker med høyden over gulvet. Med ventilasjon retter kurven seg opp og nærmer seg den ideelle kurven. Temperaturforskjellen mellom hode og ankelhøyde oversiger ikke 3°C ved bruk av verken tak- eller gulvvarme, slik at antall misfornøyde er under 5 % [16]. Dette gjelder både med og uten ventilasjon. Selv om temperaturgradientene for takvarme ikke er ”ideell”, tilfredsstillende de allikevel komfortkravet.

Kravet til maksimal asymmetrisk stråling er oppfylt for både tak- og gulvvarmeanlegget. Dette gjelder med og uten ventilasjon. Strålingsasymmetrien mellom personer og takvarmeanlegget overstiger ikke 3°C for noen av forsøkene, slik at antall misfornøyde er under 5 % [16].

Den operative temperaturen synker når det benyttes ventilasjon i forsøkene. Dette skyldes at tilført ventilasjonsluft er kaldere enn romluften. Med ventilasjon blir den operative temperaturen i rommet noe lavere ved bruk av gulvvarme enn for takvarme. Tilluften blir varmet opp mer effektivt med bruk av takvarme, fordi luften tilføres langs takoverflaten.

Den tilførte effekten fra varmeanleggene øker ved å benytte ventilasjon fordi konveksjonen bedres. Effektagivelsen øker mest for takvarmeanlegget, noe som er positivt for utnyttelse av denne type heteflate. Effektagivelsen øker også for varmeanleggene etter ombygging. Dette skyldes i første rekke at dekningsprosenten med varmfordelingsplater av aluminium er økt fra 50 til 80 %. Det er også fordelaktig at temperaturfordelingen over flaten blir jevnere med god dekning av fordelingsplater. Ombyggingen har derfor hatt en positiv virkning. Den termiske komforten mht. asymmetrisk stråling og temperaturgradientene i rommet er imidlertid lik før og etter ombygging.

Forsøksresultatene er basert på stasjonære temperaturforhold i varmelaboratoriet. Tiden det tar før stasjonære forhold er oppnådd er ca. et døgn. For beregning av energibalansen er typiske avvik for varmelaboratoriet  $\pm 8 \%$ , og det utgjør i størrelsesorden  $\pm 30 \text{ W}$ . Dette effektagviket er relativt lite, slik at måleresultatene anses for å være tilfredsstillende. Målenøyaktigheten er derfor god.

Varmelaboratoriet har ikke individuell regulering av kjøleflatene, slik at den simulerte utendørs-temperaturen blir lik på alle flater. Varmelaboratoriet har på dette området et forbedringspotensial. Dette vil bli vurdert endret i videre arbeider, slik at kjøleflatene kan reguleres individuelt. Ved simulering av temperatur i grunnen under rommet, vil dette være gunstig.

## 9. – Forslag til videre arbeid

De foreløpige resultatene har avdekket mange områder ved vannbåren lavtemperatur oppvarmingssystemer det vil være interessant å studere nærmere. Forslag til videre arbeider vil være å:

- studere ventilasjonens innvirkning på komfort i rommet og effektavgivelse fra tak- og gulvvarmeanlegget. De innledende forsøkene, som denne rapporten tar for seg, legger grunnlag for videre undersøkelser.
- benytte takvarmeanlegg som kjøletak under sommerforhold. I den forbindelse er det viktig å dokumentere innvirkning på komfort for brukeren, effektavgivelse og eventuelle kondenseringsproblemer, spesielt i sammenheng med ventilasjon.
- foreta laboratoriemålinger med vannbåren lavtemperatur veggvarme, for så å sammenligne med tak- og gulvvarme mht. komfort og effektavgivelse. Sammenhengen mellom avgitt effekt med og uten ventilasjon vil også være av interesse.
- studere innvirkningen av kaldras fra kalde flater (vindu) mht. komfort for både tak- og gulvvarme i kombinasjon med ventilasjon.
- undersøke fortrenningsventilasjonens innvirkning på vannbårne gulvvarmeanlegg mht. effektavgivelse, komfort og møblering.
- se på design og utforming av takvarmeanlegget slik at det kan installeres i både nye og eksisterende bygninger. Det er viktig å utforme anlegget slik at monteringstiden og kostnaden ved nybygg og rehabilitering er lav. Dersom byggetiden kan reduseres, er dette økonomisk fordelaktig.
- undersøke samspillet mellom møblering og ventilasjon mht. komfort. Tidligere arbeider påpeker at takvarme vil medføre lavere temperatur under bord og møbler [8]. Øvrige studier av takvarmesystemer er utført for umøblerte rom, men ingen studier er gjennomført med både ventilasjon og møblering [1].
- utvikle styrings- og reguleringsprinsipper for takvarmesystemer. Takvarmesystemene kan i utgangspunktet reguleres på samme måte som for gulvvarmesystemer. Dette er nødvendigvis ikke optimalt, og det er ikke funnet litteratur eller utført forskning på dette området [1]. Det vil også være av interesse å se på reguleringsprinsipper for kombinasjonen takvarme og ventilasjon. Temaer det vil være interessant å se på i denne forbindelse er:
  - Hvordan varierer effektavgivelsen (konvektiv avgivelse) fra takvarmeanlegget ved ulike ventilasjonsluftmengder?
  - Bør ventilasjonsluftmengden, og dermed avgitt effekt, styres etter personbelastningen, tid på døgnet eller andre parametre?
  - Hva er tregheten og responstiden til et slikt reguleringsystem?
  - Hva er sammenhengen mellom temperatur på takflate, romtemperatur og tilluftstemperatur, og hvilken innvirkning vil dette ha for reguleringen?

Laboratorieforsøkene er utført uten påvirkning av for eksempel vindkrefter, solinnstråling, menneskelig aktivitet eller kuldebroer. Det er derfor viktig å undersøke tak- og gulvvarmeanleggene mht. komfort og effektavgivelse under realistiske forhold, dvs. fullskalaforsøk.

# Appendiks A – Beregninger

Appendiks A inneholder forklaringer til beregningene av temperaturdifferansene etter ombygging i formel 4.2-4.7 iht. målepunktene i figur 5.3 og 5.4.

*Tilført effekt,  $Q_1$*

Temperaturdifferanse mellom tur og retur. Benyttes i ligning 4.2.

$$\Delta t_1 = t_{80} - t_{81} \quad (\text{A.1})$$

*Stråling,  $Q_2$*

Overflatetemperaturer. Benyttes i ligning 4.3.

$$T_{nord} = \frac{t_4 + t_5}{2} \quad (\text{Overflatetemperatur vegg nord}) \quad (\text{A.2})$$

$$T_{sør} = \frac{t_8 + t_9}{2} \quad (\text{Overflatetemperatur vegg sør}) \quad (\text{A.3})$$

$$T_{øst} = \frac{t_6 + t_7}{2} \quad (\text{Overflatetemperatur vegg øst}) \quad (\text{A.4})$$

$$T_{vest} = \frac{t_{10} + t_{11}}{2} \quad (\text{Overflatetemperatur vegg vest}) \quad (\text{A.5})$$

$$T_t = \frac{\left(\frac{t_{31} + t_{32}}{2}\right) + \left(\frac{t_{43} + t_{44}}{2}\right) + \left(\frac{t_{52} + t_{53}}{2}\right)}{3} \quad (\text{Overflatetemperatur tak}) \quad (\text{A.6})$$

$$T_g = \frac{\left(\frac{t_{24} + t_{25}}{2}\right) + \left(\frac{t_{37} + t_{38}}{2}\right) + \left(\frac{t_{45} + t_{46}}{2}\right)}{3} \quad (\text{Overflatetemperatur gulv}) \quad (\text{A.7})$$

### *Konveksjon, $Q_3$*

Temperaturdifferanse mellom heteflate og operativ temperatur. Benyttes i ligning 4.4.

Takvarme

$$\Delta t_2 = \left( \frac{\left( \frac{t_{31} + t_{32}}{2} \right) + \left( \frac{t_{43} + t_{44}}{2} \right) + \left( \frac{t_{52} + t_{53}}{2} \right)}{3} \right) - \left( \frac{\left( \frac{t_{33} + t_{39}}{2} \right) + \left( \frac{t_{34} + t_{40}}{2} \right) + \left( \frac{t_{35} + t_{41}}{2} \right)}{3} \right) \quad (\text{A.8})$$

Gulvvarme

$$\Delta t_2 = \left( \frac{\left( \frac{t_{33} + t_{39}}{2} \right) + \left( \frac{t_{34} + t_{40}}{2} \right) + \left( \frac{t_{35} + t_{41}}{2} \right)}{3} \right) - \left( \frac{\left( \frac{t_{33} + t_{39}}{2} \right) + \left( \frac{t_{34} + t_{40}}{2} \right) + \left( \frac{t_{35} + t_{41}}{2} \right)}{3} \right) \quad (\text{A.9})$$

### *Transmisjonstap tak/gulv, $Q_4$*

Temperaturdifferanse over tak- eller gulvkonstruksjonen. Transmisjonstapet beregnes over konstruksjonen fra varmekilden. Benyttes i ligning 4.5.

$$\Delta t_3 = \left( \frac{t_{20} + t_{21}}{2} \right) - t_{12} \quad (\text{Tak}) \quad (\text{A.10})$$

$$\Delta t_3 = \left( \frac{t_{22} + t_{23}}{2} \right) - t_{13} \quad (\text{Gulv}) \quad (\text{A.11})$$

### *Ventilasjonsvarmetap, $Q_5$*

Temperaturdifferanse mellom tilluft og avtrekk. Benyttes i ligning 4.6.

$$\Delta t_4 = t_2 - t_3 \quad (\text{A.12})$$

*Transmisjonstap, Q<sub>6</sub>*

Temperaturdifferanse over bygningsdelen. Benyttes i ligning 4.7.

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_4 + t_5}{2} \right) - t_{15} \quad (\text{Vegg nord}) \quad (\text{A.13})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_8 + t_9}{2} \right) - t_{17} \quad (\text{Vegg sør}) \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_6 + t_7}{2} \right) - t_{14} \quad (\text{Vegg øst}) \quad (\text{A.15})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_{10} + t_{11}}{2} \right) - t_{16} \quad (\text{Vegg vest}) \quad (\text{A.16})$$

$$\Delta t_5 = t_{18} - t_{15} \quad (\text{Dør}) \quad (\text{A.17})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{\left( \frac{t_{31} + t_{32}}{2} \right) + \left( \frac{t_{43} + t_{44}}{2} \right) + \left( \frac{t_{52} + t_{53}}{2} \right)}{3} \right) - t_{12} \quad (\text{Fra takoverflate})^1) \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_{20} + t_{21}}{2} \right) - t_{12} \quad (\text{Fra varmekilden tak})^2) \quad (\text{A.19})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{\left( \frac{t_{24} + t_{25}}{2} \right) + \left( \frac{t_{37} + t_{38}}{2} \right) + \left( \frac{t_{45} + t_{46}}{2} \right)}{3} \right) - t_{13} \quad (\text{Fra gulvoverflate})^3) \quad (\text{A.20})$$

$$\Delta t_5 = \left( \frac{t_{22} + t_{23}}{2} \right) - t_{13} \quad (\text{Fra varmekilden gulv})^4) \quad (\text{A.21})$$

<sup>1)</sup> transmisjonsberegning for taket ved benyttelse av gulvvarmeanlegget

<sup>2)</sup> transmisjonsberegning for taket ved benyttelse av takvarmeanlegget

<sup>3)</sup> transmisjonsberegning for gulvet ved benyttelse av takvarmeanlegget

<sup>4)</sup> transmisjonsberegning for gulvet ved benyttelse av gulvvarmeanlegget

## Appendiks B – Målepunkter

Tabell B.1 gir forklaring til målepunktene i figur 5.1.

*Tabell B.1: Målepunkter før ombygging (plan)*

Nr	Navn / Plassering	Nr	Navn / Plassering
1	Omgivelsestemperatur	25	Veggflate øst
2	Avtrekk	26	Veggflate nord
3	Tilluft	27	Veggflate vest
14	Kjøleflate vegg øst	28	Veggflate sør
15	Kjøleflate vegg nord	48	Overflate dør
16	Kjøleflate vegg vest	80	Varme tur
17	Kjøleflate vegg sør	81	Varme retur

Tabell B.2 gir forklaring til målepunktene i figur 5.2.

*Tabell B.2: Målepunkter før ombygging (snitt)*

Nr	Navn / Plassering	Nr	Navn / Plassering
12	Kjøleflate tak	33	Streng 1 romluft 1,6 m
13	Kjøleflate gulv	34	Streng 1 romluft 2,2 m
19	Røroverflate tak	35	Streng 1 takflate mellom fordelingsplate
20	Fordelingsplate tak	36	Streng 2 romluft 2,2 m
21	Mellom fordelingsplate tak	37	Streng 2 takflate rør
23	Streng 1 takflate rør	38	Streng 2 takflate mellom fordelingsplate
24	Streng 1 gulvflate rør	49	Streng 1 gulvflate fordelingsplate
29	Streng 1 globetermometer 1,1 m	50	Streng 1 gulvflate mellom fordelingsplate
30	Streng 1 romluft 0,1 m	51	Røroverflate gulv
31	Streng 1 romluft 0,6 m	52	Fordelingsplate gulv
32	Streng 1 romluft 1,1 m	53	Mellom fordelingsplate gulv

Tabell B.3 gir forklaring til målepunktene i figur 5.3.

*Tabell B.3: Målepunkter etter ombygging (plan)*

Nr	Navn / Plassering	Nr	Navn / Plassering
1	Omgivelsestemperatur	11	Veggflate vest nede
2	Tilluft	14	Kjøleflate vegg øst
3	Avtrekk	15	Kjøleflate vegg nord
4	Veggflate nord oppe	16	Kjøleflate vegg vest
5	Veggflate nord nede	17	Kjøleflate vegg sør
6	Veggflate øst oppe	18	Overflate dør
7	Veggflate øst nede	19	Overflate vindu
8	Veggflate sør oppe	80	Varme tur
9	Veggflate sør nede	81	Varme retur
10	Veggflate vest oppe		



Tabell B.4 gir forklaring til målepunktene i figur 5.4.

*Tabell B.4: Målepunkter etter ombygging (snitt)*

Nr	Navn / Plassering	Nr	Navn / Plassering
12	Kjøleflate tak	36	Streng 2 gulvflate rør
13	Kjøleflate gulv	37	Streng 2 gulvflate fordelingsplate
20	Røroverflate tak	38	Streng 2 romluft 0,1 m
21	Fordelingsplate tak	39	Streng 2 romluft 0,6 m
22	Røroverflate gulv	40	Streng 2 romluft 1,1 m
23	Fordelingsplate gulv	41	Streng 2 romluft 1,6 m
24	Streng 1 gulvflate rør	42	Streng 2 romluft 2,2 m
25	Streng 1 gulvflate fordelingsplate	43	Streng 2 takflate fordelingsplate
26	Streng 1 romluft 0,1 m	44	Streng 2 takflate rør
27	Streng 1 romluft 0,6 m	45	Streng 3 gulvflate rør
28	Streng 1 romluft 1,1 m	46	Streng 3 gulvflate fordelingsplate
29	Streng 1 romluft 1,6 m	47	Streng 3 romluft 0,1 m
30	Streng 1 romluft 2,2 m	48	Streng 3 romluft 0,6 m
31	Streng 1 takflate fordelingsplate	49	Streng 3 romluft 1,1 m
32	Streng 1 takflate rør	50	Streng 3 romluft 1,6 m
33	Streng 2 globetermometer 0,6 m	51	Streng 3 romluft 2,2 m
34	Streng 2 globetermometer 1,1 m	52	Streng 3 takflate fordelingsplate
35	Streng 2 globetermometer 1,6 m	53	Streng 3 takflate rør

## Appendiks C – Kalibrering

### *Kalibrering av termoelementer*

Kalibrering av termoelementer ble utført 20.05.03 (før ombygging) og 23.10.03 (etter ombygging). Hvert termoelement ble kalibrert opp mot en konstant temperaturholder innstilt på 20 °C. Avvik fra termoelement og logger fanges dermed opp og legges inn som korreksjon i loggeprogrammet. Tallene i kolonne for målepunkt henviser til figur 5.1-5.4.

*Tabell C.1: Kalibrering av termoelementer før ombygging. Utført 20.05.03*

Målepunkt	Referanseverdi [°C]	Avlest verdi [°C]	Avvik [°C]
1	20,00	20,02	+0,02
2	20,00	20,00	0,00
3	20,00	20,00	0,00
12	20,00	19,99	-0,01
13	20,00	19,98	-0,02
14	20,00	20,00	0,00
15	20,00	20,00	0,00
16	20,00	20,03	+0,03
17	20,00	19,97	-0,03
19	20,00	20,01	+0,01
20	20,00	20,01	+0,01
21	20,00	20,00	0,00
23	20,00	20,01	+0,01
24	20,00	20,01	+0,01
25	20,00	20,02	+0,02
26	20,00	20,03	+0,03
27	20,00	20,02	+0,02
28	20,00	20,05	+0,05
29	20,00	20,04	+0,04
30	20,00	20,05	+0,05
31	20,00	20,00	+0,00
32	20,00	20,03	+0,03
33	20,00	20,01	+0,01
34	20,00	20,01	+0,01
35	20,00	20,01	+0,01
36	20,00	20,04	+0,04
37	20,00	20,02	+0,02
38	20,00	20,01	+0,01
48	20,00	20,00	0,00
49	20,00	20,00	0,00
50	20,00	20,01	+0,01
51	20,00	20,01	+0,01
52	20,00	20,02	+0,02
53	20,00	20,02	+0,02

Tabell C.2: Kalibrering av termoelementer etter ombygging. Utført 23.10.03

Målepunkt	Referanseverdi [°C]	Avlest verdi [°C]	Avvik [°C]
1	20,00	20,04	+0,04
2	20,00	20,04	+0,04
3	20,00	20,04	+0,04
4	20,00	20,03	+0,03
5	20,00	20,00	0,00
6	20,00	20,01	+0,01
7	20,00	19,99	-0,01
8	20,00	20,02	+0,02
9	20,00	19,98	-0,02
10	20,00	20,03	+0,03
11	20,00	20,00	0,00
12	20,00	19,98	-0,02
13	20,00	20,00	0,00
14	20,00	20,01	+0,01
15	20,00	19,99	-0,01
16	20,00	20,01	+0,01
17	20,00	20,01	+0,01
18	20,00	19,98	-0,02
19	20,00	19,99	-0,01
20	20,00	19,98	-0,02
21	20,00	20,03	+0,03
22	20,00	20,00	0,00
23	20,00	20,00	0,00
24	20,00	20,00	0,00
25	20,00	19,99	-0,01
26	20,00	20,01	+0,01
27	20,00	20,02	+0,02
28	20,00	20,00	0,00
29	20,00	20,03	+0,03
30	20,00	20,04	+0,04
31	20,00	20,05	+0,05
32	20,00	20,05	+0,05
33	20,00	19,98	-0,02
34	20,00	19,99	-0,01
35	20,00	20,02	+0,02
36	20,00	20,00	0,00
37	20,00	20,00	0,00
38	20,00	20,02	+0,02
39	20,00	20,02	+0,02
40	20,00	20,02	+0,02
41	20,00	20,00	0,00
42	20,00	20,00	0,00
43	20,00	20,02	+0,02
44	20,00	20,00	0,00
45	20,00	20,00	0,00
46	20,00	20,00	0,00
47	20,00	19,98	-0,02
48	20,00	20,00	0,00
49	20,00	20,03	+0,03
50	20,00	19,99	-0,01
51	20,00	20,00	0,00
52	20,00	20,01	+0,01
53	20,00	20,03	+0,03
54	20,00	20,03	+0,03

### Kalibrering av vannmengdemåler

Kalibrering av vannmengdemåler ble utført 13.01.03. Vanntemperaturen som ble benyttet under kalibreringen var 20°C og det ble foretatt kalibrering med sju ulike vannmengder. Hver kalibrering er et gjennomsnitt av 16 målinger. Korreksjonsfaktoren som er lagt inn i loggeprogrammet er gjennomsnittet av korreksjonene i tabell C.3, dvs. 0,0010 l/s.

Tabell C.3: Kalibrering av vannmengdemåler ved 20°C. Utført 13.01.03

Måling nr.	Vannmengdemåler [l/s]	Veietankmåling [l/s]	Avvik [%]	Korreksjon [l/s]
1	0,1493	0,1503	-0,67	0,0010
2	0,1265	0,1279	-1,09	0,0014
3	0,1097	0,1108	-0,99	0,0011
4	0,0910	0,0921	-1,19	0,0011
5	0,0658	0,0666	-1,20	0,0008
6	0,0574	0,0583	-1,54	0,0009
7	0,0439	0,0446	-1,57	0,0007
Gjennomsnitt				0,0010

### Kalibrering av trykkceller til luftmengdemålinger

Kalibrering av trykkceller ble utført 21.11.03. Det ble foretatt kalibrering ved sju ulike trykkforhold. Korreksjonsfaktoren for hver av trykkcellene basert på avvikene er lagt inn i loggeprogrammet.

Tabell C.4: Kalibrering av trykkceller til luftmengdemålinger. Utført 21.11.03

Måling nr.	$\Delta p$ kalibrator [Pa]	Målt $\Delta p$ tilluft [Pa]	Avvik $\Delta p$ tilluft [%]	Målt $\Delta p$ avtrekk [Pa]	Avvik $\Delta p$ avtrekk [%]
1	10	10,14	+1,40	10,20	+2,00
2	20	19,94	-0,30	20,19	+0,95
3	30	29,74	-0,87	30,18	+0,60
4	40	39,55	-1,13	40,17	+0,43
5	50	49,35	-1,30	50,16	+0,32
6	60	59,15	-1,42	60,15	+0,25
7	70	68,95	-1,50	70,14	+0,20

## Referanseliste

- [1] Persson, T.; *Lågtemperaturvarmesystem – En kunnskapsöversikt*, Solar Energy Research Center, 2000
- [2] Olesen, B.W.; *Termiske komfortkrav til gulv*, Laboratoriet for Varme- og Klimateknik, Danmarks tekniske Højskole, 1975
- [3] Olesen, B.W.; *Thermal comfort requirements for floor occupied by people*, ASHRAE 83, s. 41-57, 1977
- [4] Olesen, B.W., Schøler, M. og Fanger, P.O.; *Discomfort caused by vertical air temperature differences*, Danish Building Research Institute, 1979
- [5] Olesen, B.W., Mortensen, E., Thorshauge, J. og Berg-Munch, B.; *Thermal comfort in a room heated by different methods*, ASHRAE 86, s. 34-48, 1980
- [6] Fanger, P.O., Bánhidi, L., Olesen, B.W. og Langkilde, G.; *Comfort limits for heated ceilings*, ASHRAE 86, s. 141-156, 1980
- [7] Johansson, C., Pettersson, B.; *Takvärme – energiförbrukning och inomhusklimat*, Byggeforskningsrådet, R12:1984
- [8] Johansson, C.; *Energiförluster i småhus vid givna kriterier för termisk komfort*, Sveriges Provnings- og Forskningsinstitut, SP Rapport 1994:12
- [9] Johansson, C.; *Värmeavgivning från golvvärmesystem*, Sveriges Provnings- og Forskningsinstitut, SP Rapport 2000:09
- [10] Lebrun, J.J., Marret, D.J.; *Thermal comfort and energy consumption in winter conditions – continuation of the experimental study*, ASHRAE 79, vol 85
- [11] Gundersen, P.; *Energifleksible varmeanlegg - Energieffektiv vannbåren lavtemperaturvarme*, Byggeforsk, Prosjektrapport 270 – 2000
- [12] Gundersen, P.; *Energifleksible, lavtemperatur varmeanlegg*, Byggeforsk, Prosjektrapport 317 - 2002
- [13] Gundersen, P.; *Lavtemperatur i varmeanlegg - Takvarme i ny og eksisterende bebyggelse*, Byggeforsk, Prosjektrapport 337 - 2002
- [14] Gundersen, P.; *Gulv på grunnen*, Byggeforsk, Prosjektrapport – 2003
- [15] Hagen, G., Krog, B.R.; *Komfortvurdering av vannbåren gulv- og takvarme som oppvarmingssystem*, Hovedoppgave HiN, 2003
- [16] Hansen, H.E., Kjerulf-Jensen, P. og Stampe, O.B.; *Danvak – Varme- og klimateknikk, Grundbog, 2. utgave*, 1997
- [17] Woodson, R. Dodge; *Radiant Floor Heating*, McGraw-Hill, 1999
- [18] Cengel, Y.A.; *Introduction To Thermodynamics And Heat Transfer*, McGraw-Hill, 1997

- [19] *ThermaCAM PM695 Operator's Manual* – Publ. No. 1557454 – Ed. A
- [20] Skåret, E.; *Ventilasjonsteknisk håndbok*, Byggforsk, Håndbok 48, 2000
- [21] *Prenøk-håndboken*. Skarland Press

