

PSO ELFOR j.nr. 335-20

Komfortforhold og lastudjævning ved energieffektiv køling med termoaktive konstruktioner

Fase 2: Analyse og praktiske forsøg

Oktober 2005



PSO ELFOR j.nr. 335-20

Komfortforhold og lastudjævning ved energieffektiv køling med termoaktive konstruktioner

Fase 2: Analyse og praktiske forsøg -
Slutrapport

Oktober 2005

Dokument nr. \58719A -01
Revision nr. 01
Udgivelsesdato 11.10.2005

Udarbejdet RMH
Kontrolleret KHL/ASE
Godkendt RMH

Indholdsfortegnelse

1	Indledning	3
2	Formål	6
3	Resumé	7
4	Termoaktive konstruktioners ydelse	11
4.1	Forsøgsopstilling	12
4.2	Forsøg	14
4.3	Stationære forsøg	14
4.4	Dynamiske forsøg	17
4.5	Forsøg med akustikloft	19
4.6	Diskussion og konklusion	22
4.7	Opvarmning med termoaktive konstruktioner	22
5	Komfortforhold	25
5.1	Komfortforhold ved temperaturglidning	25
5.2	Overfladetemperaturer samt termografering	25
5.3	Styring og komfortforhold	28
6	Styringsstrategi og samspil med forsyning	29
6.1	Analyse af korttidsdynamik	29
6.2	Effektaftag fra kølesystem og lastudjævning	31
6.3	Økonomisk vurdering	38
6.4	Miljøeffekt, sparet CO ₂	40
7	Produktionsmæssige muligheder	41
7.1	Elementudformning	42
7.2	Alternativ udformning	43
7.3	Styrkeforhold	44
7.4	Valg af rørmateriale	45
7.5	Beskyttelse af og adgang til rør	45

7.6	Produktionsegnethed	48
7.7	Prisniveau for termoaktive dækelementer	49
8	Akustikforhold	50
8.1	Generelle forhold vedrørende god lyd i kontorer	50
8.2	Anvendt akustikløsning mock-up	54
9	Referencer	56

Bilagsfortegnelse

- Bilag 1 - Formidlingsaktiviteter
- Bilag 2 - Opbygning af forsøgsopstilling
- Bilag 3 - Akustik lovmæssige krav
- Bilag 4 - Styringsstrategier belyst ved TRNSYS-modeller
- Bilag 5 - Validering af programmet

1 Indledning

Resultatet af forundersøgelsen (fase 1) vedrørende anvendelsesmuligheder for kølesystemer baseret på termoaktive konstruktioner - i form af præfabrikerede betondæk - er lovende. Dette skyldes bl.a., at systemerne kan anvende højtemperatur køling (køling med en fremløbstemperatur på 16-20 C mod normalt 6-12 C), og dels at man har muligheden for at køle dynamisk, dvs. nedkøle konstruktionen om natten i stedet for om dagen, hvor behovet eksisterer.

Hermed kan man reducere det store energiforbrug, som i traditionelle kølesystemer bruges til at distribuere store mængder kold ventilationsluft. Termoaktive konstruktioner medfører således, at traditionelle kølekompressorer ofte helt kan undgås, og i stedet kan andre forsyningskilder anvendes, f.eks. frikøling, grundvandskøling osv.

Resultaterne af undersøgelserne fra det beskrevne projekt viser, at det er muligt at spare 75% eller mere af elforbruget til køling ved anvendelse af termoaktive konstruktioner og tilhørende alternativ køling. Samtidig kan elforbruget til mekanisk ventilation nedbringes med samme størrelsesorden. Endelig kan termoaktive konstruktioner anvendes til opvarmning, hvor der ligeledes er et potentiale for energibesparelser, fordi der med fordel kan anvendes lavtemperatursystemer (ca. 30 C eller lavere).

Da kølesystemer baseret på termoaktive konstruktioner tilmed kan udføres billigt, er perspektivet særdeles lovende. Dette skyldes, at anlægsprisen samlet set kan blive lavere på grund af de reducerede udgifter til køle- og varmeanlæg, og anlægsstørrelsen kan reduceres på grund af betonens lastudjævnende effekt. Herudover opnås samtidig store besparelser i driftsfasen.

I nærværende projekt er tre væsentlige forhold for anvendelse af termoaktive konstruktioner i Danmark blevet behandlet:

1. De termiske og komfortmæssige forhold i rummene er undersøgt under forskellige afkølingsstrategier. Der er foretaget en række praktiske undersøgelser og målinger, der understøtter de teoretiske resultater, som er opnået under en tidligere fase 1 af projektet "Termoaktive konstruktioner til hybrid opvarmning og køling af kontorhuse" (Ens. j.nr. 1213/01-0020).
2. Akustikregulering og påvirkning af ydelse og komfortforhold. Da loftsflader oftest benyttes til akustikregulering (i hvert fald i storrumskontorer), er

betydningen af akustikloft for eksempel lydabfler eller nedhængte flåder under termoaktive dæk blevet belyst.

3. Da systemerne skal kunne indpasses i det danske byggeri, har projektet undersøgt, hvordan de termoaktive konstruktioner ville kunne produceres som præfabrikerede betondæk. Herunder er produktionsmetoder vurderet og afprøvet, og udformning af elementer samt placering af rørslanger er analyseret og afprøvet med nogle første vejledende prøvestøbninger.

Nærværende rapport fokuserer primært på de 2 første punkter, idet vurderinger vedrørende mulig produktudvikling omkring betondækket er varetaget af Spæncom i andet regi for egne midler.

Projektet har gennemført en række aktiviteter, som har understøttet undersøgelserne, herunder de nævnte prøvestøbninger og vurderinger ved betonelementproducenten Spæncom, opbygning af og forsøgsmålinger med en fuldskala mock-up på DTU samt udvikling af programmel i form af en TRNSYS model.

Projektgruppen påtager sig ikke ansvar for den videre anvendelse af projektets resultater som helhed eller i uddrag.

Følgende har medvirket til udarbejdelse af projektet:

- Reto M. Hummelshøj, COWI (projektleder)
- Kirstine Hjorth Lorenzen, COWI
- Jørgen Vasehus Madsen, COWI
- Mogens G. Krighaar, COWI
- Jens Ole Hansen, COWI
- Trine Dalgaard Jensen, Teknologisk Institut
- Magne Hansen, Teknologisk Institut
- Peter Weitzmann, Danmarks Tekniske Universitet
- Henrik Tommerup, Danmarks Tekniske Universitet
- Sven Svendsen, Danmarks Tekniske Universitet
- Finn Passov, Spæncom A/S
- Jens Westh, Spæncom A/S
- Lars Reimer, Spæncom A/S

Henvendelse vedrørende projektet kan ske til:

Reto M. Hummelshøj
COWI A/S
Parallelsvej 2
2800 Kgs. Lyngby

E-mail: rmh@cowi.dk
www.cowi.dk

English Summary:

The project objective is to carry out initial tests and verification of thermo-active structures based on a mock-up with pre-fabricated concrete elements, which can be part of integrated energy concepts suitable for the Danish building tradition based on concrete elements. The project forms an important input to the decision basis concerning later stage continuation with full-scale test on a demonstration building and a monitoring programme.

The developed method utilises concrete's mass and ability to adjust room temperature by absorbing and releasing heat. The result of the development work is a system that is based on prefabricated concrete decks with embedded plastic pipes. Water for heating and/or cooling is circulated in the system with a water temperature a few degrees from the desired room temperature. This means that the system to a large extent is self-regulating, but at the same time it is the optimisation of the control strategy that is the key to the extensive energy savings.

The manufacturer of precast concrete elements, Spæncom A/S, has made a number of different test decks, which subsequently were tested under realistic conditions in a full-scale mock-up at Danish Technical University.

The thermal measurements show that the decks provide sufficient cooling effect, also when suspended acoustic ceilings are used. Thermal comfort can be maintained, and the system can integrate the heating and cooling in the same system.

Large Energy Savings

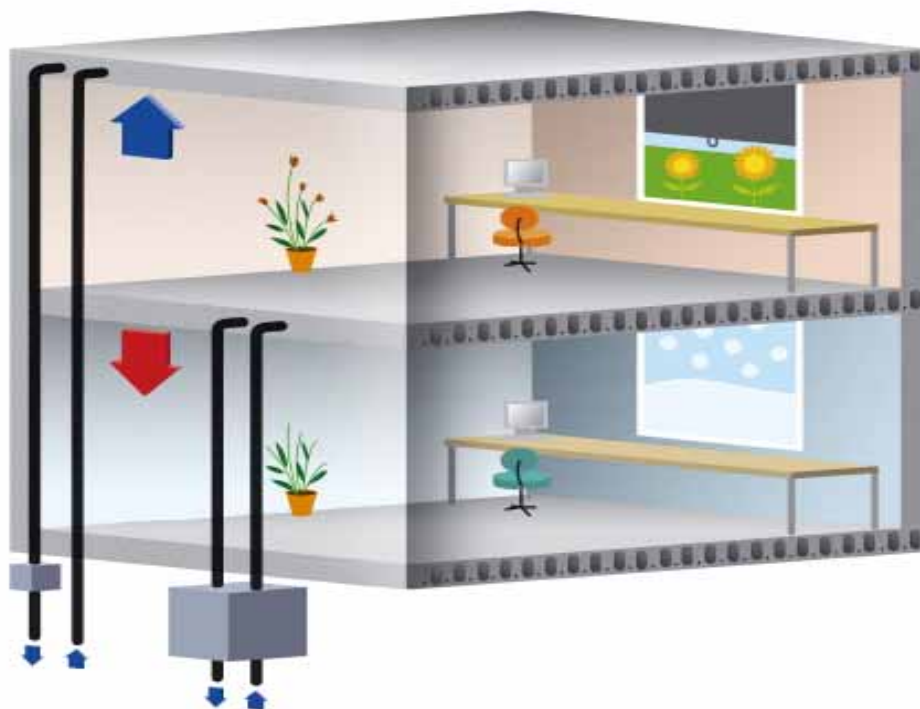
Further, the project demonstrates that it is possible to reduce the energy consumption for heating by up to 30 percent, and the energy consumption for cooling by up to 85 percent. In total, energy savings of 30-50 percent are realistic. This is among other things due to the fact that the system allows for better use of alternative supply sources. For example, the plant can operate as a low-temperature floor heating system during winter, based on heat driven heat pumps, whereas cool night air, soil tubes, ground water or sea water can be used for cooling during summer.

Finally, the project has demonstrated that the overall economy is very favourable. This is due to the fact that the capital cost can be lower due to the reduced costs of cooling and heating plants, and the size of the plant is reduced due to the peak load reducing effect of the concrete. Besides this, large savings are obtained in the operation phase.

2 Formål

Det er formålet med nærværende projekts fase 2, at udføre praktiske målinger, analyser og verifikation af termoaktive konstruktioners ydelse og virkemåde med opførelse af en fuldsalamodel. Dette sker i forlængelse af tidligere udførte teoretiske overvejelser gennemført som led i forprojektet "*Termoaktive konstruktioner til hybrid opvarmning og køling af kontorhuse*" (Ens. j.nr. 1213/01-0020).

I projektet undersøges endvidere forskellige styringsstrategier og deres indflydelse og relevans i forhold til komfort, spidslastudjævning, afbrydelighed og udglatning. Herunder vil det blive analyseret, hvordan konceptet kan indgå i integrerede intelligente energikoncepter under danske forhold.



Figur 2.1 Principskitse af termoaktive betonelementer [COWI 2005].

3 Resumé

Projektet baserer sig på forundersøgelsen "Termoaktive konstruktioner til hybrid opvarmning og køling af kontorhuse, fase 1" (j.nr.1213/01-0020), udført af COWI, TI og DTU, der på indledende plan vurderer mulighederne for brugen af termoaktive konstruktioner i Danmark. Projektet viste lovende resultater, som førte til igangsættelse af nærværende projekt. Her er konceptet undersøgt på baggrund af en mock-up og forsøgsopstilling samt sideløbende simuleringer og beregninger udført på basis af software programmerne TRNSYS og TASim. Endelig er produktionsmæssige forhold og muligheder blevet undersøgt i forbindelse med vejledende prøvestøbninger af præfabrikerede termoaktive beton-elementer på Spæncom A/S.

De målte data er benyttet til validering af beregningsmodeller, som herefter kan bruges til at bestemme maksimale værdier af den interne varmelast i sammenhæng med valg af fremløbstemperatur.

Alt i alt har forsøgsopstillingen vist sig værdifuld til bestemmelse af de termiske egenskaber af termoaktive konstruktioner.

De overordnede konklusioner fra projektet giver anledning til optimisme for en fremtidig brug af termoaktive elementer i kontorbyggeriet.

Følgende konklusioner er fremkommet på basis af projektets aktiviteter:

- **Køleydelse ved stationær drift:**

Køleydelsen for de undersøgte dæk er ca. $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ med tilnærmelsesvis lineær temperaturafhængighed i forhold til temperaturforskellen mellem rumtemperatur og væsketemperatur, dvs. at der ved 10 C i temperaturforskel kan køles med 65 W/m^2 , hvilket er ca. dobbelt så meget som nødvendigt i et moderne kontorbyggeri, hvor det maksimale behov er ca. 30 W/m^2 .

Endvidere har det vist sig, at systemet også kan benyttes ved endnu højere kølelaste ved brug af lavere fremløbstemperaturer, men det betyder imidlertid øgede temperaturudsving i løbet af dagen og dermed risiko for, at rummet om morgenen vil opleves for køligt og for varmt om eftermiddagen.

- **Køleydelse ved køling af de termoaktive konstruktioner om natten:**

Hvis de termoaktive konstruktioner kun køles om natten, kan der let bortkøles en kølelast på 30 W/m^2 i benyttelsestiden. Betydningen af, at der kun køles om natten frem for at der køles konstant, er, at rumtemperaturen stiger lidt i løbet af dagen.

- **Køleydelsesreduktion ved nedhængte akustikflåder:**

Der er foretaget målinger på en opstilling med nedhængt loft i form af en hjørneabsorbent hele vejen rundt langs ydervæggene samt to flåder placeret midt over rummet. Resultatet herfra viser overraskende, at en akustikløsning som denne kun i meget ringe omfang sænker systemets kølekapacitet (5-10%). Dette er tilfældet både med og uden omrøring af luften i rummet. Dette resultat er ganske positivt i forhold til mulighederne for at opbygge en akustikløsning for eksempel baseret på normalt nedhængt loft afbrudt af brede spalter eller som nedhængte flåder.

Det skal bemærkes, at nedhængt akustikloft tilsyneladende er næsten uden betydning for køleydelsen, såfremt rumluften frit kan passere i hulrummet over loft og tilbage til rummet, hvor det nedhængte loft lejlighedsvis afbrydes. Løsningen kræver, at det nedhængte loft lejlighedsvis skal støvsuges på oversiden, hvilket dog er væsentlig billigere og mindre arbejdskrævende end hvis akustikdæmpningen lægges i gulvet, som det er almindeligt bl.a. i Tyskland.

- **Elbesparelse i forhold til et 6/12 grader kompressor system:**

De udførte TRNSYS simuleringer viser, at den nødvendige rumkøling kan tilvejebringes ved en væsketemperatur på 19-20 grader, dvs. køling kan foretages ved frikøling om natten uden brug af mekanisk køling - undtagen ved tropenætter, hvor udetemperaturen er over 20 C. COP (coefficient of performance) ved frikøling med luft er typisk 25 -35 inklusive ventilatorer og pumpe, mod en COP 3,5-4 for kompressorkøling, dvs. at systemet kan spare op til omkring 85% i elforbrug i forhold til kompressorkøling. I praksis vil besparelsen dog blive lidt lavere.

- **Ydelse ved opvarmning 30 grader:**

Varmeafgivelse fra et dæk (loft og gulv) udført som de testede prøveelementerne er målt og beregnet til ca. $3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$ for temperaturforskellen mellem rum og væsketemperatur, dvs. at man ved 30-35 C væsketemperatur kan dække et typisk dimensionerende varmebehov på ca. 35 W/m^2 .

- **Samspil med naturlig ventilation:**

Termoaktive konstruktioner spiller fint sammen med naturlig ventilation, hvor den naturlige ventilation kan benyttes til natkøling og være med til at køle dækkene som supplement til frikølere. Naturlig ventilation benyttes

bedst i overgangsperioder, mens nødvendig friskluftforsyning om vinteren energimæssigt bedst forsynes ved mekanisk ventilation med roterende varmeveksler.

- **Betydning af køle-/varmestrategier:**

I de dynamiske måleserier er det blandt andet vist, at det er muligt at forskyde det tidspunkt, hvor varmen optages i dækket, og det tidspunkt, hvor den fjernes fra de indstøbte slanger. Det er endvidere også vist, at selv med en fremløbstemperatur på 20 °C til dækkene er det muligt at fjerne en intern varmelast på omkring 40 W/m² uden for høje temperaturer i rummet.

Det fremgår således af simuleringresultaterne, at der under normale forudsætninger ikke er behov for yderligere køling ud over den køling, som de termoaktive konstruktioner kan levere. Derimod vil der på enkelte dage være et antal timer om formiddagen, hvor temperaturen for visse medarbejdere kan være utilfredsstillende lav, hvis der ikke anvendes nogen form for supplementsvarme. Det kan derfor anbefales at vælge en væsketemperatur, der er lidt højere i overgangsperioderne, således at der både kan køles og opvarmes med samme væsketemperatur mod at acceptere lidt flere varme timer om eftermiddagen.

- **Konklusion på ydelse og komfortforhold:**

Projektet viser ved laboratorieforsøg og teoretisk beregning, at køling med termoaktive konstruktioner kan levere køling med tilstrækkelig ydelse, samtidigt med at komfortkrav kan overholdes i benyttelsestiden. Termoaktive konstruktioner kan benyttes alene, men fungerer mest optimalt, når de benyttes til basistemperering suppleret med konvektorer til supplementsvarme ved glasfacader, hvilket giver mulighed for hurtig og individuel regulering.

- **Fremtidig produktion og pris:**

Prøvestøbningerne og undersøgelserne på Spæncom har vist, at produktet er egnet til industriel fremstilling og med nogen udvikling af produktionsapparatet vil kunne produceres med et meget begrænset merforbrug af tid.

Prisen på dækelementer er afhængig af en række forhold omkring antal kvadratmeter, varianter og udsparinger og indstøbningsdele, så en totalpris pr. kvadratmeter vil ikke kunne angives med særlig stor nøjagtighed uden mange forbehold. For et skønnet gennemsnitskontorbyggeri forventes merprisen for termoaktive dækelementer alt inklusive på sigt at ligge på kr. 100 - 200 pr. kvadratmeter i udsalgspris. Derimod er totaløkonomien bedre end ved traditionelt byggeri. Dette skyldes, at anlægsprisen samlet set bliver lavere på grund af de reducerede udgifter til køle- og varmeanlæg, og at anlægsstørrelsen reduceres på grund af betonens lastudjævnende effekt. Herudover opnås samtidig store besparelser i driftsfasen. Samlet set kan der ved optimal indpasning forventes en besparelse op til 500 kr./m². Hertil

kommer en mulig besparelse på elforbrug til køling og ventilation på op til ca. 16 kWh/m² (eller ca. 40 kWh/m² omregnet i primærenergiforbrug) og sparet service af kølemaskiner mv.

Anbefalinger

På basis af de meget lovende resultater opnået i dette projekt anbefales det klart at foretage en fuldskala demonstration af termoaktive elementer i et visionært nybyggeri og dokumentere resultaterne herfra.

Fase 2 projektet har ved simuleringer og forsøg i mock-up eftervist potentialet og funktionaliteten, men demonstration af et fuldskala anlæg mangler fortsat i Danmark.

Et fuldskala demonstrationsbyggeri med pre-fabrikerede termoaktive betondæk med optimeret energisystem vil kunne afdække systemets dynamik og styringsmuligheder i praksis under virkelige driftsforhold og med de uforudsete skift i vejr og belastninger, som naturligt vil forekomme i praksis. På basis af måleresultater fra et demonstrationsbyggeri vil det være muligt at optimere styringsstrategien og give guidelines for, hvordan et anlæg med termoaktiv konstruktioner opbygges optimalt.

Det anbefales at følge byggeriet med et måleprogram, der strækker sig over mindst ét år samt at formidle resultaterne bredt. Der bør bl.a. måles på energiforbrug (til køling, ventilation og opvarmning), indeklima, akustik og brugertilfredshed.

Resultaterne herfra vil danne en værdifuld reference og grundlag for videre udnyttelse af teknikken i praksis under danske forhold.

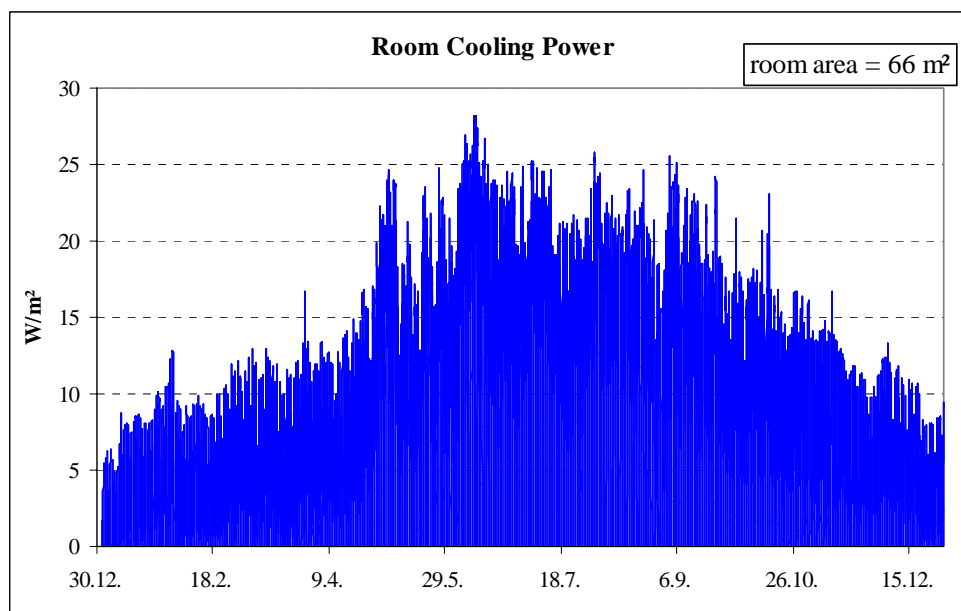
4 Termoaktive konstruktioners ydelse

Termoaktive konstruktioner kan benyttes til såvel køling som opvarmning. De kan benyttes til basistemperering suppleret med traditionelle anlæg til finregulering af temperaturen. Herved bliver de traditionelle anlæg reduceret i størrelse. Termoaktive konstruktioner kan også benyttes alene, hvis det kan tolereres at rumtemperaturen varierer et par grader i løbet af arbejdsdagen.

I første omgang bør kølebehov i bygninger altid reduceres ved eliminering / reduktion af varmekilden dvs. ved brug af solafskærmning til at skærme for direkte solindfald, anvendelse af tunge konstruktioner og energieffektivt eludstyr (PC og belysning) osv. Herefter gælder det om at dække kølebehovet ved lavest muligt energiforbrug. Dette opnås primært ved at anvende mest mulig frikøling med udeluft, men det kan også være med jordslanger eller varmeveksling med grundvand.

En forudsætning for at kunne frikøle mest muligt er, at der kan køles ved en høj medietemperaturer (18-20 C). Det er her, termoaktive konstruktioner udmærker sig, idet de på grund af den store overflade til køling kan levere den nødvendige køleydelse ved en temperatur meget tæt på rumtemperaturen.

For at bestemme den nødvendige køleydelse er der foretaget en simulering på kølebehovet for et moderne kontorbyggeri (som eksempel er brugt DR Byen) med høj intern last fra personer og IT og udvendig solafskærmning. Kontorbygninger af denne type har i benyttelsestiden et kølebehov størstedelen af året.



Figur 4.1 Kølebehovets variation over året i benyttelsestiden for et moderne kontorbyggeri med høj intern varmelast.

Af figuren ses, at der er behov for en køleydelse på højst $30\text{W}/\text{m}^2$.

De termoaktive konstruktioner opbygges som normale 1,2 meter brede beton-elementer (huldæk) med indstøbte plastslanger ca. 5 cm fra undersiden af loftet. Gennem disse slanger cirkuleres vand. Slangerne lægges med en afstand på ca. 15 cm med 7 træk for hvert element, hvilket er baseret på beregninger udført i et forprojekt.

Udtrykket termoaktive konstruktioner benyttes, fordi man aktivt påvirker konstruktionen med indvendig køling/opvarmning, samtidig med at man udnytter betonens varmakkumulerende evne. Det betyder, at man kan tilføre køle- og varmeenergi tidsforskudt i forhold til behovet i rummet. Energien kan tilføres med en mindre effekt over længere tid, ligesom kortvarige afbrydelser i køleforsyningen er mulig. Disse forhold er væsentlige i forhold til samspillet med elnettet, og man kunne forestille sig, at tidspunkt for energitilførslen kunne reguleres fra centralt hold af de systemansvarlige for elforsyningen.

For at kunne afprøve konstruktionerne under nær realistiske forhold er der opbygget en forsøgsopstilling udført som et udsnit af en typisk kontoretage med tunge dæk, lette skillevægge, der termisk svarer til normalt inventar og et gulv med træopbygning svarende til et edb-gulv.

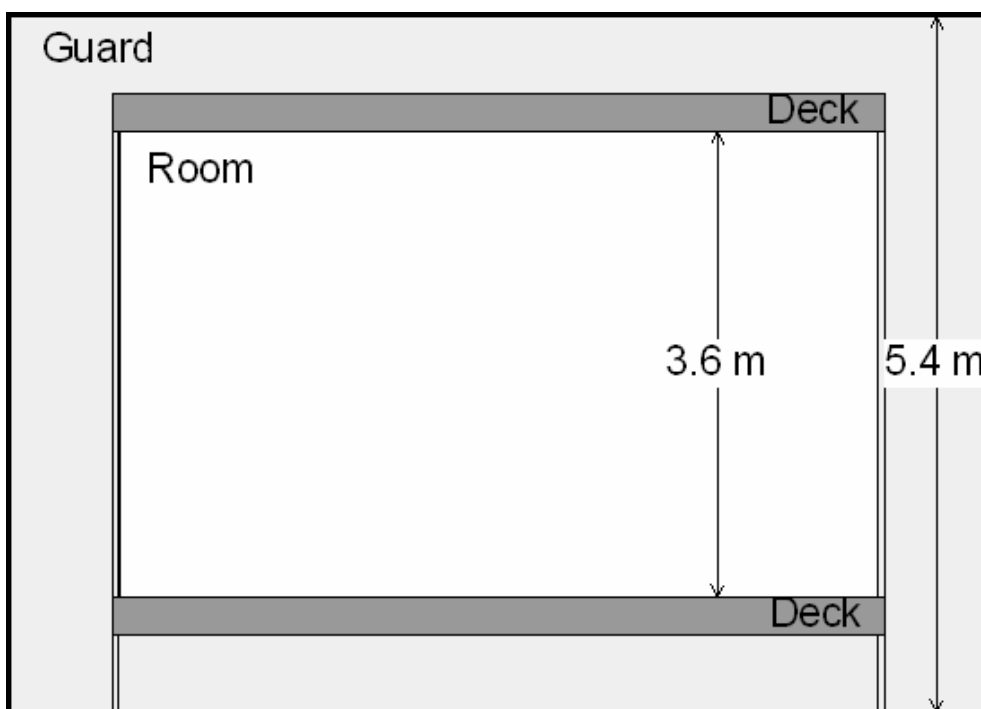
4.1 Forsøgsopstilling

Forsøgsopstillingen er opbygget som et rum på 3,6 m gange 6,0 m med en højde på 3,6 m, der er udstyret med to termoaktive dæk, ét over og ét under rummet. Hvert dæk består af tre elementer eller huldæk, hver med en bredde på 1,2 m.



Figur 4.2 Mock-up på DTU

Væggene i rummet er udført som en gipsvæg på træskelet med 100 mm isolering. Omkring rummet er der opført en guard, hvori der søges holdt den samme temperatur som i rummet. Figur 4.3 viser et lodret snit af opstillingen.



Figur 4.3 Lodret snit i forsøgsopstilling

4.2 Forsøg

I korte træk er der udført følgende forsøg med henblik på at undersøge de termiske og dynamiske egenskaber af termoaktive konstruktioner:

- Stationære forsøg med forskellige kombinationer af væske- og rumtemperaturer;
- Dynamiske forsøg med forskellige kombinationer af intern varmelast (høj/lav) og flow (tændt/slukket) – styret af tidsskemaer.

Fremløbstemperaturen til dækkene er holdt konstant under forsøg.

4.3 Stationære forsøg

Formålet med de stationære forsøg er at finde sammenhængen mellem temperaturforholdene i rum og dæk og den kølekapacitet, der kan opnås.

Kølekapaciteten af loftfladen, $U_{cc,ceiling}$, kan findes som:

$$U_{cc,ceiling} = \frac{q_{up}}{A_{deck} \cdot \Delta T} = \frac{q_{up}}{A_{deck} \cdot (T_{room} - T_{fluid})} \quad (1)$$

Her er:

q_{up} Varmestrømmen gennem loftfladen af øvre dæk.

T_{fluid} Væsketemperaturen er middelværdi af fremløbs- og returtemperaturen i slangen.

T_{room} Rumtemperaturen er et vægtet gennemsnit af rummets overflade- og lufttemperaturer.

Tilsvarende ligninger kan opstilles for kølekapaciteten af gulvfladen på nedre dæk samt for hele rummet.

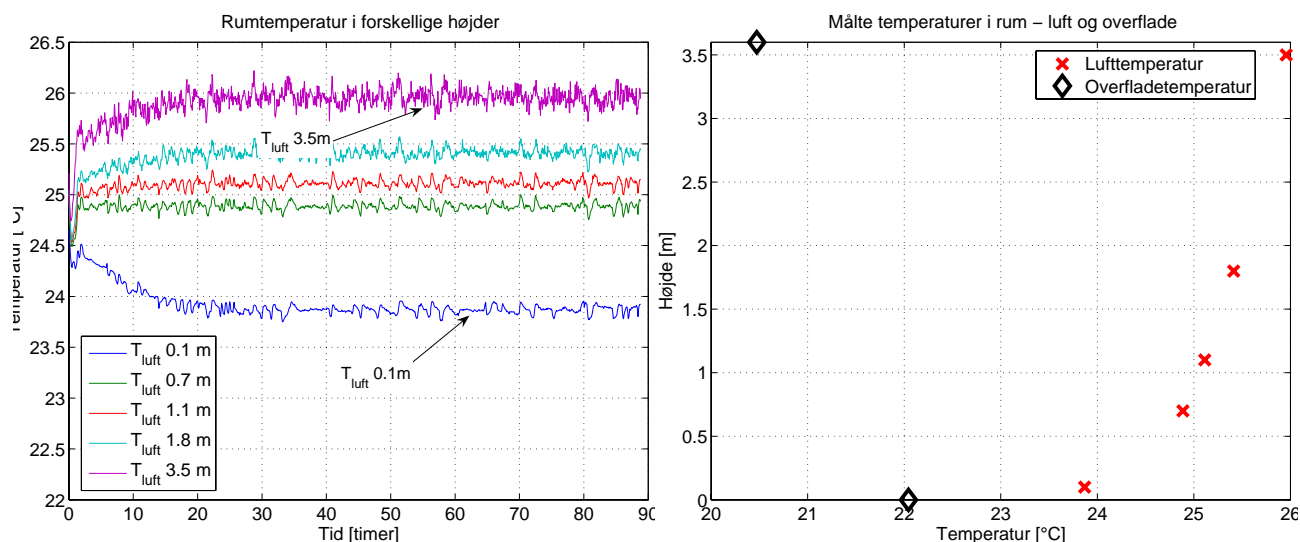
Usikkerheden på resultaterne svarer til mellem 3% og 7% af varmestrømmen, som i forsøgene er på mellem 30 W/m² og 60W/m² - med den mindste usikkerhed for den største varmestrøm. Hvilket er absolut acceptabelt.

Der henvises til Bilag 2 for yderligere information om databehandling og usikkerhedsvurdering af forholdene i forsøgsopstillingen.

4.3.1 Resultater

Figur 4.4 viser lufttemperaturen i forskellige højder i rummet i en stationær måleserie samt gennemsnitsværdier i den stationære del af målingen. Som det ses, er målingerne stabile for rumtemperaturen, og derudover er styringen i stand til

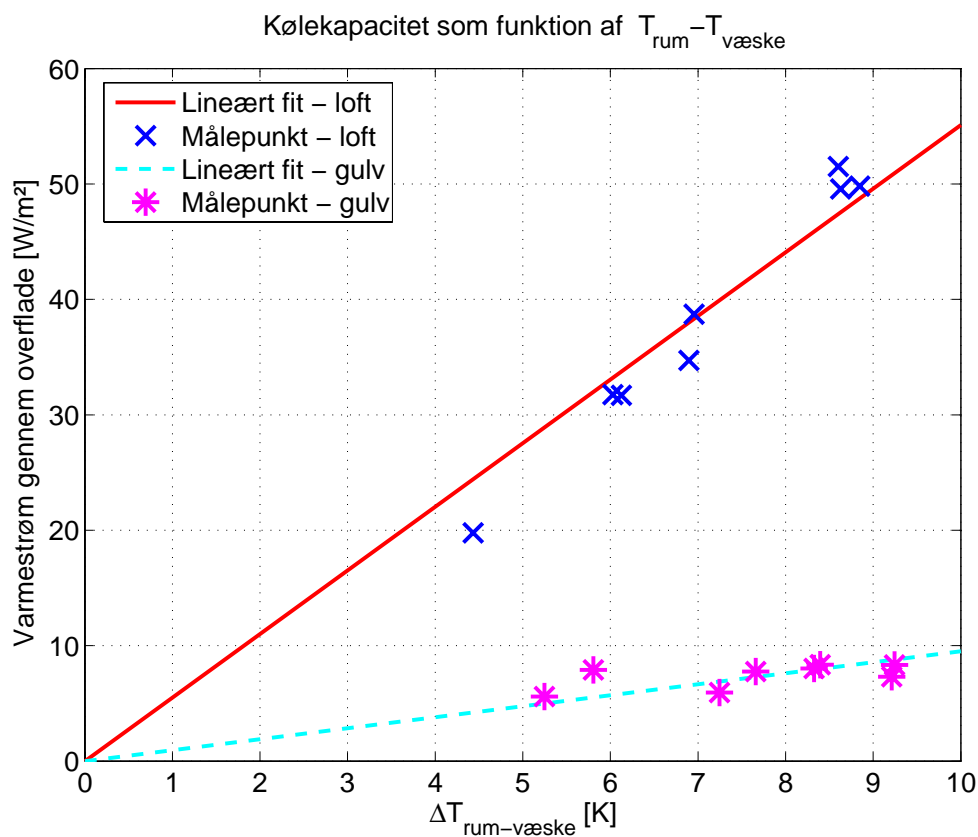
at sikre den korrekte temperatur. Temperaturforskellen mellem ankelhøjde og siddehøjde, som ofte benyttes til vurdering af termisk diskomfort, er omkring 1K, hvilket er acceptabelt.



Figur 4.4 Venstre figur viser lufttemperatur i forskellige højder i rummet fra 0.1m over gulv til 0.1m fra loft ved en setpunktstemperatur på 25°C (som gennemsnit af målingen i 0,7m og 1,1m højde). Højre figur viser de gennemsnitlige værdier i den stationære del af forsøgsserien af luft- og overfladetemperaturer i et snit midt i rummet fra gulv til loft.

Figur 4.5 viser kølekapaciteten af loftoverfladen for øvre dæk samt gulvoverfladen for nedre dæk. Figuren viser køleeffekten i W/m^2 som funktion af temperaturforskellen mellem rum og væske for hver af de otte måleserier. Det noteres, at målepunkterne lader til at være placeret på en næsten ret linie, vist som et fit på måledataene¹. Hældningen, som svarer til en kølekapacitetskoefficient med enheden W/m^2K , er for loftoverfladen lig med $5,5W/m^2K$, mens den er $1,0W/m^2K$ for gulvoverfladen. Dermed vil den samlede kølekapacitetskoefficient fra gulv og loft baseret på dækkets energibalance være på $5,5+1,0=6,5W/m^2K$.

¹ Det bemærkes, at måledataene bedre kan fittes til et eksponentialudtryk gældende for kølingen af rummet fra loft- og gulvfladen af formen, $q = 4,21 \cdot \Delta T^{1,22}$ i stedet for $q = 6,5 \cdot \Delta T$, hvor $\Delta T = T_{rum} - T_{væske}$. Her er q angivet i W/m^2 .



Figur 4.5 Kølekapacitet af loftoverflade af øvre dæk samt gulvoverfladen af nedre dæk – som begge vender mod rummet

Laves en tilsvarende analyse baseret på den afsatte effekt i rummet i stedet for den optagne effekt i slangerne, fås den samlede koefficient også til $6,5 W/m^2K$. Når afrundingen tages med i betragtningen, svarer det til en afvigelse på under 1% i den fundne koefficient.

Det er fundet, at flowmængden i slangen ikke har en direkte betydning for kølekapaciteten i dækket. Den forskel, som kan konstateres, er udelukkende en større temperaturforskel mellem fremløb og returtemperatur ved et lavere flow. Derudover er det vist, at middelvæsketemperaturen kan benyttes til at karakterisere kølekapaciteten. Dette forudsætter selvfølgelig, at der ikke er en ”for stor” temperaturforskel i væskeflowet mellem fremløb og retur.

4.3.2 Delkonklusion på stationære forsøg

Ud fra databehandlingen og de viste figurer kan det ses, at forsøgsopstillingen er i stand til at give gode stabile og ikke mindst reproducerbare resultater. Usikkerhederne i opstillingen er absolut acceptable.

Det ses, at et kølebehov på $30 W/m^2$ kan opnås ved en rumtemperatur på $24 C$ og en middelvæsketemperatur i køleslangerne på $19,5 C$ (fremløb $18 C$ og retur $21 C$).

Hovedresultatet fra de stationære forsøg er, at der med det givne design af de termoaktive dæk kan opnås en samlet kølekapacitetskoefficient på over $6\text{W/m}^2\text{K}$. Det svarer til en maksimal køleeffekt på omkring 60W/m^2 ved en væsketemperatur på 15°C og en rumtemperatur på 25°C . Disse værdier er langt over behovet for et normalt kontorbyggeri, der som tidligere nævnt ligger på omkring 30W/m^2 .

Resultaterne er yderst tilfredsstillende med henblik på brugen af termoaktive konstruktioner f.eks. i kontorbyggerier, da de viser, at det muligt at bruge termoaktive elementer til køling af bygninger selv med meget store interne varmelaster. Hvis der er direkte solstråling på dækket vil ydelsen blive endnu højere.

4.4 Dynamiske forsøg

I modsætning til de stationære forsøg, hvor formålet er at finde kølekapaciteten ved konstante påvirkninger, er de dynamiske forsøg tilrettelagt for at kunne bestemme forhold for ændring i rumtemperaturen i løbet af dagen ved skiftende belastninger samt tændt og slukket flow i kølekredsen.

Motivationen for at gennemføre de dynamiske forsøg er først og fremmest, at det er vigtigt at kende reaktionstiderne for systemet. Den store termiske masse betyder nemlig, at der ikke kan opretholdes konstante temperaturforhold i rummet, men samtidig giver systemet også mulighed for lastudjævning fra køleanlægget. Hermed kan der køles om natten i dækket, mens denne køling først kommer rummet til gode på et senere tidspunkt. Dette giver eksempelvis mulighed for at benytte køling med kold natteluft (frikøling) eller udnytte billig strøm i perioder på døgnet hvor tariffen er lavere.

Tabel 4.1 Skema over dynamiske forsøg

	Tidsskema for tændt/slukket flow	Fremløbstemperatur når tændt	Tidsskema for høj/lav varmelast	Høj/lav varmelast	Kommentar
1	21-09 / 09-21	15°C	08-20 / 20-08	48W/m^2 / 5W/m^2	Kun øvre dæk, ingen guard
2	24 timer tændt	20°C	08-17 / 17-08	40W/m^2 / 5W/m^2	Kun øvre dæk, ingen guard
3	24 timer tændt	20°C	08-17 / 17-08	30W/m^2 / 5W/m^2	

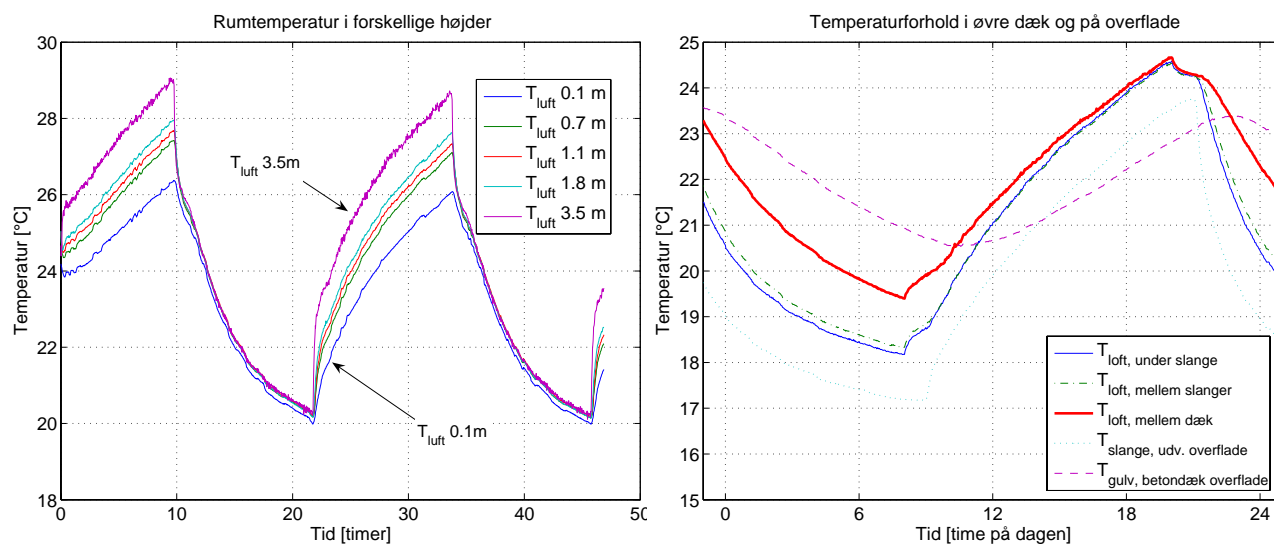
4.4.1 Forsøg 1

I dette forsøg er der høj varmelast om dagen og lav om natten, mens der omvendt er slukket for køleflowet om dagen og tændt om natten.

Figur 4.6 (venstre side) viser rumlufttemperaturen i forskellige højder i løbet af døgnet. Det ses, at om morgenen er temperaturen kølig, især for personer med let sommertøj, mens den om eftermiddagen er varm. Her er der dog kun fokuse-

ret på lufttemperaturen som en konservativ betragtning. Den operative temperatur vil, qua de lavere overfladetemperaturer, blive mindre (typisk ca. 1 C lavere).

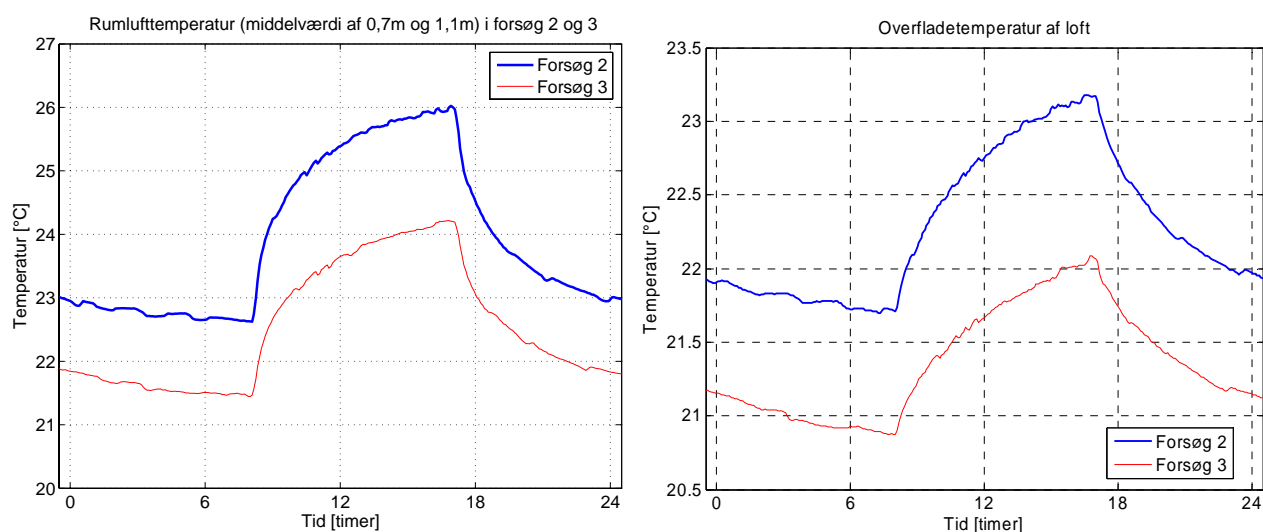
Højre side af figur 4.6 viser temperaturfordelingen internt i dækket samt på overfladerne. De to overfladetemperaturer på loftfladen registret direkte under en slange og mellem to slanger ses at følges ad, hvor punktet direkte under slangen er lidt lavere, når der er tændt for flowet. Temperaturen mellem to dæk er mindre påvirket af slangerne og dermed højere. Bemærk de små ”kanter” på måledataene omkring klokken 8-9 og 20-21. Her kan betydningen af forskellen i tidspunktet for tænd/sluk af flow og høj/lav varmelast ses. Den øverste overfladetemperatur påvirkes kun i mindre grad af væsketemperaturen. Bemærk også den tidsmæssige forsinkelse i forhold til punkterne på den nedre overflade.



Figur 4.6 Lufttemperatur i forskellige højder af rummet over døgnet, samt temperaturfordeling i øvre dæk – internt og på overflader.

4.4.2 Forsøg 2 og 3

De to sidste dynamiske forsøg er ens, bortset fra at den interne varmelast i forsøg 3 er mindre end i forsøg 2, samt at der i forsøg 3 har været flow i både øvre og nedre dæk. I begge tilfælde er der tændt for flowet hele tiden.



Figur 4.7 Rumlufttemperatur og loftoverfladetemperatur i dynamisk forsøg 2 og 3

Figur 4.7 viser rumlufttemperaturen som middelværdi af målingerne i 0,7 m og 1,1 m højde (til venstre) samt loftets middelovertemperatur (til højre). Som det ses, giver den mindre varmelast og kortere periode med høj last anledning til en lavere temperaturstigning over arbejdsdagen end i forsøg 1. Med kombinationen af en høj fremløbstemperatur på 20°C og en intern varmelast på mellem 30-40W/m² ses det, at de termoaktive konstruktioner sagtens kan sikre et godt termisk indeklima i løbet af hele arbejdsdagen.

4.4.3 Konklusion på dynamiske forsøg

I de dynamiske forsøg ses, at det er muligt at køle et rum med varierende varmelast med termoaktive konstruktioner. Køling med et termoaktivt dæk under dynamiske forhold giver varierende temperaturforhold i løbet af arbejdsdagen.

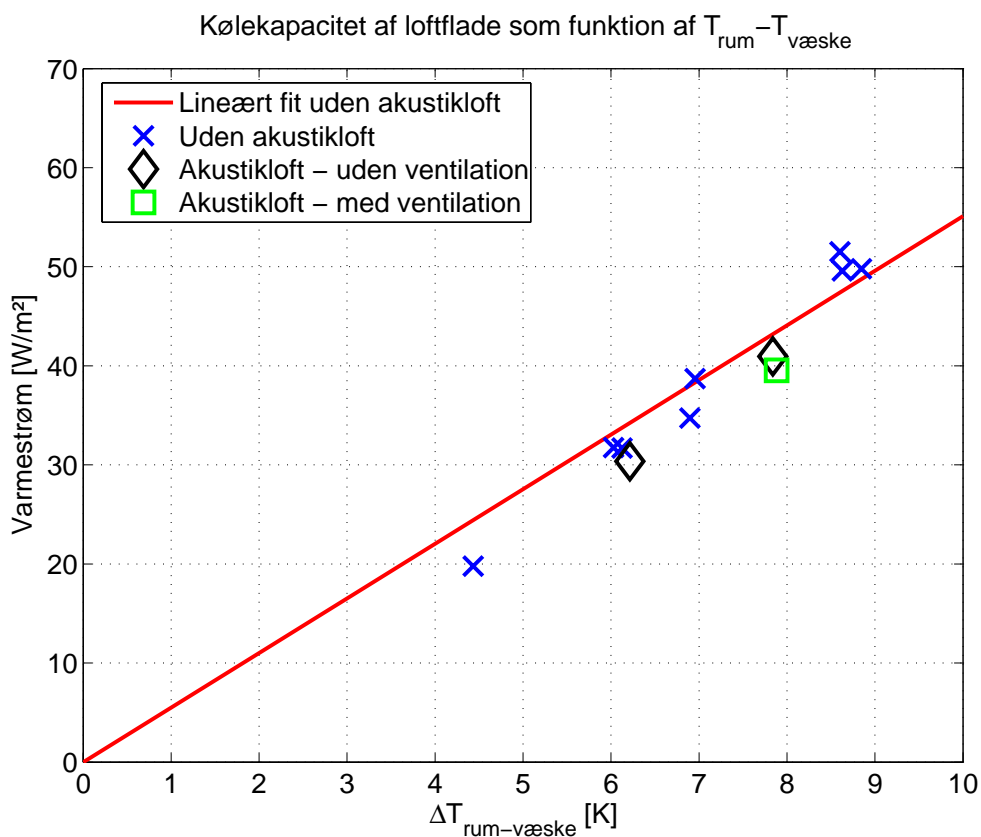
I de her udførte forsøg er det vist, at en varmelast på omkring 40W/m² sagtens kan fjernes, mens der stadig opretholdes en god termisk komfort i rummet.

Forsøgene har også vist, at det er muligt at forskyde det tidspunkt, hvor der køles i dækket, og det tidspunkt, hvor rummet køles. Således er det muligt at køle betondækket om natten, mens kølingen af rummet sker om dagen.

4.5 Forsøg med akustikloft

Der er ligeledes foretaget målinger på en opstilling med et nedhængt loft med opbygning som vist i kapitel 8 (figur 8.4).

Der er foretaget måleserier med og uden ventilation. Resultatet af den målte kølekapacitet fra loftfladen er vist på figur 4.8, sammen med de tidligere viste måleserier fra forsøgene uden akustikloft (svarende til figur 4.5) henholdsvis med og uden ventilation over flåderne.

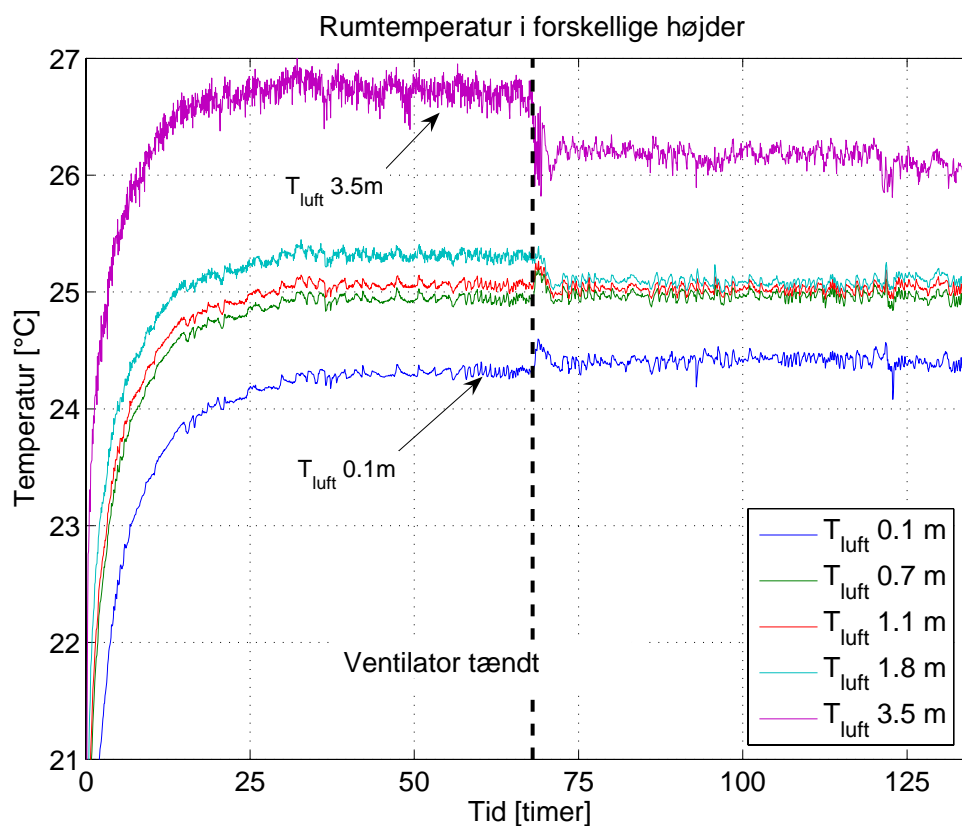


Figur 4.8 Kølekapacitet af loftflade med og uden akustikloft

Konklusionen herfra er:

- 1 Kølekapaciteten fra loftfladen med akustikloft, er stort set uændret i forhold til situationen uden akustikloft. Dette resultat er ganske overraskende, men skyldes formodentlig, at strålingsudvekslingen mellem dæk og oversiden af akustikloftet køler overside akustikloft således, at overfladen med konvektiv varmeovergang øges. Den afkølede luft søger selv ned gennem åbningerne mellem de nedhængte flåder. Det formodes derfor, at effekten vil bevares også med en større dækning af loftet med nedhængt loft, bare der lejlighedsvis er plads til, at luften kan cirkulere.
- 2 Kølekapaciteten henholdsvis med og uden ventilation (indblæsning over nedhængt loft) er ligeledes stort set identisk.

For at forklare punkt 2 ovenfor vises den vertikale temperaturgradient i figur 4.9, som kan sammenlignes med figur 4.4. Uden ventilation er temperaturgradienten større for rummet med akustikløsning end i rummet uden akustikloft, mens den er stort set den samme, når der er luftomrøring. Det medfører to modsatte effekter. Den forøgede omrøring sikrer, at luften under flåderne også kan afkøles, men samtidig formindskes lufttemperaturen direkte under dækket, som dermed medfører en mindre konvektiv afkøling af rummet.



Figur 4.9 Rumlufttemperatur i rum med akustikloft

I samme forsøgsserie er den operative temperatur målt i opstillingen henholdsvis under én af flåderne og mellem de to flåder. Dette er vist i tabel 4.2.

Tabel 4.2 Sammenligning af den operative temperatur under og mellem flåder hhv. med og uden ventilation

	Under flåde		Mellem flåder	
	Med ventilation	Uden ventilation	Med ventilation	Uden ventilation
Operativ temperatur	24,94°C	25,45°C	24,88°C	25,40°C

Som det ses, er den operative temperatur lavere når der er ventilation i rummet, hvilket skyldes den konvektive afkøling, som jo er mindre uden ventilation. Samtidig skal det bemærkes, at den operative temperatur under og mellem flåderne er ganske ens i de to tilfælde. Det vil sige, at den oplevede temperatur ikke i stort omfang afhænger af om man sidder under en flåde eller ej.

4.5.1 Bafler

På grund af den meget lille ændring af kølekapaciteten med de nedhængte flåder i forhold til situationen uden flåder, er der valgt ikke at foretage undersøgelser af køleeffekten med brug af bafler som akustikdæmpning. Disse var på forhånd forventet at give en kølekapacitet, som lå mellem opstillingerne henholdsvis med og uden flåder. Det skyldes, at de lodrette bafler ikke på samme måde vil skygge for strålingsudvekslingen som flåderne.

4.6 Diskussion og konklusion

De forsøg, som er beskrevet her, har eftervist funktionen af de termoaktive dæk, både hvad angår stationære og dynamiske forhold. Hvis der antages en nær lineær sammenhæng mellem køleeffekten og temperaturforskellen mellem rum og væske, findes kølekapacitetskoefficienten til $6,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

I de dynamiske måleserier er det blandt andet vist, at det er muligt at forskyde det tidspunkt, hvor varmen optages i dækket, og det tidspunkt, hvor den fjernes fra de indstøbte slanger. Det er endvidere også vist, at selv med en fremløbstemperatur på 20°C til dækkene er det muligt at fjerne en intern varmelast på omkring 40 W/m^2 uden risiko for høje temperaturer i rummet.

Endvidere har det vist sig, at systemet også kan operere ved endnu højere varmelaster ved brug af lavere fremløbstemperaturer, men det betyder imidlertid øgede temperaturudsving i løbet af dagen og dermed risiko for, at rummet om morgenen vil opleves for køligt og for varmt om eftermiddagen.

Endelig er der foretaget målinger på en opstilling med nedhængt loft i form af en hjørneabsorbent hele vejen rundt langs ydervæggene, samt to flåder placeret midt over rummet. Resultatet herfra viser overraskende, at en akustikløsning som denne kun i meget ringe omfang sænker systemets kølekapacitet. Dette er tilfældet både med og uden omrøring af luften i rummet. Dette resultat er ganske positivt i forhold til mulighederne for at opbygge en akustikløsning baseret på nedhængte flåder og en hjørneabsorbent, som samlet set dækker ca. halvdelen af loftarealet. Det skal dog bemærkes, at der ikke er foretaget en vurdering af de akustiske forhold i rummet.

De målte data kan benyttes til validering af beregningsmodeller, som herefter kan benyttes til at bestemme maksimale værdier af den interne varmelast i sammenhæng med valg af fremløbstemperatur.

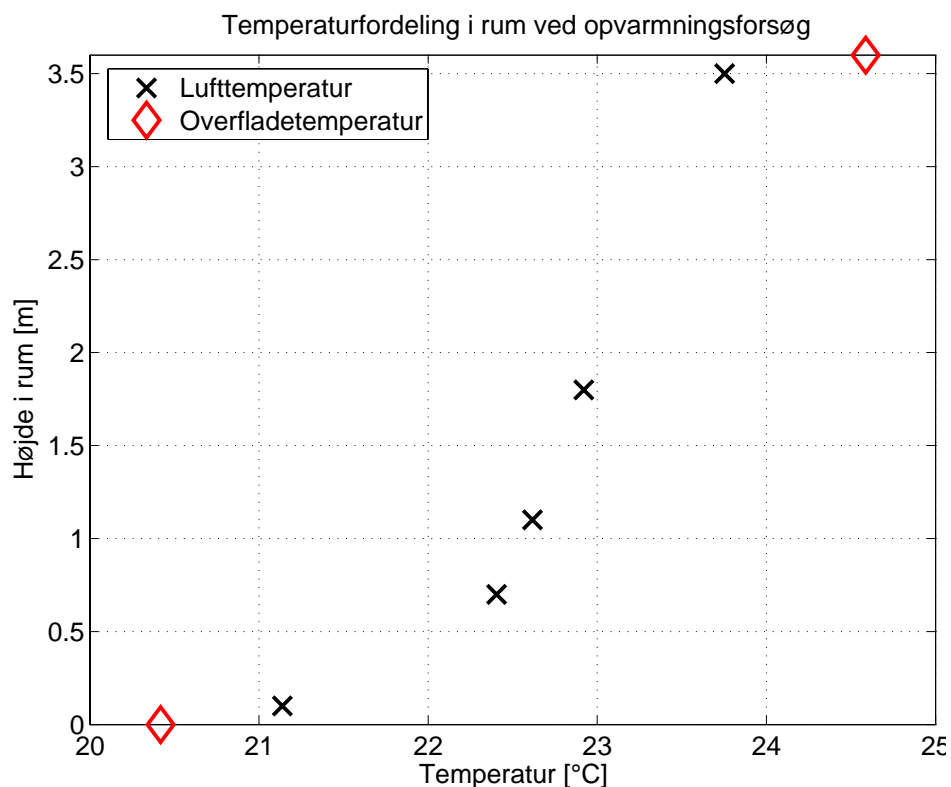
Alt i alt har forsøgsopstillingen vist sig som en yderst værdifuld hjælp til bestemmelse af de termiske egenskaber af termoaktive konstruktioner.

4.7 Opvarmning med termoaktive konstruktioner

Opvarmningssituationen er belyst ved beregninger, da mock-up'en ikke er velegnet til forsøg hermed (der kan ikke tilvejebringes et ensartet varmetab). Opvarmningssituationen (for gulv og loft tilsammen) er beregnet til $3,5 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Eventuelt nedhængt loft vil have betydning på varmeafgivelsen, hvis der ikke er foranstaltninger til at cirkulere luften over det nedhængte loft.

- For at kunne regulere temperaturen individuelt og ikke opvarme til højere temperatur end nødvendigt i nogle rum på en etage anbefales det i praksis at lade de termoaktive konstruktioner sørge for basisopvarmning og supplere med mindre varmeplader til at regulere temperaturen og hindre kuldenedfald ved vinduer. Hertil kan for eksempel benyttes Danfoss Convek varmeplader med en indbygget hastighedsreguleret tværstrømsventilator, som har den fordel, at den kan hindre kuldenedfald uden at tilføre varme i en stor del af året, hvorved man undgår samtidig køling og varmetilførsel ved facade som ville øge kølebehovet og energiforbruget unødigt. Elforbruget medgået til varmeafgivelsen må dog indgå i vurderingen af, om der skal benyttes traditionelle konvektorer eller ventilatorassisterede konvektorer.



Figur 4.10 Tilnærmet temperaturfordeling ved rumopvarmning (beregnet på basis af målinger)

Figuren viser et forsøg foretaget i forsøgsopstillingen, hvor der køles i garden omkring rummet, til en temperatur på omkring 18°C. Det var desværre ikke muligt at køle denne længere ned. I opstillingen er der kun tændt for flowet i det øverste dæk. Vasketemperaturen i forsøget er sat til 30°C. Bemærk, at grundet den høje temperatur i garden, var det ikke muligt at køle rummet tilstrækkeligt. Derfor er der i figuren trukket 3K fra alle temperaturer i både luft

og på overflader. Denne ændring vurderes ikke at ændre på temperaturforskellen mellem de enkelte målinger.

5 Komfortforhold

5.1 Komfortforhold ved temperaturglidning

En af forudsætningerne for at kunne benytte termoaktive konstruktioner i bygninger er, at temperaturen har lov at stige i løbet af dagen. I CR1752 (CEN, 1998) er der opstillet tre klasser af termisk komfort baseret på den operative temperatur, med en forventet procentdel utilfredse brugere (PPD) under henholdsvis 6%, 10% og 15%. Disse klasser er benævnt A, B og C. Det vil i denne sammenhæng sige, at temperaturen må stige henholdsvis 2K, 3K og 5K i løbet af arbejdsdagen for at blive i samme komfortklasse. Top- og bundværdierne er bestemt af de aktuelle forhold for beklædning og aktivitetsniveau. Antages en beklædning på 0,5 clo og en aktivitet på 1,2 met, er middelværdien i de tre klasser 24,5°C. Det vil sige, at for klasse A må temperaturen ved køling svinge mellem 23,5°C og 25,5°C. Mens den ved klasse B må svinge fra 22,5°C til 25,5°C.

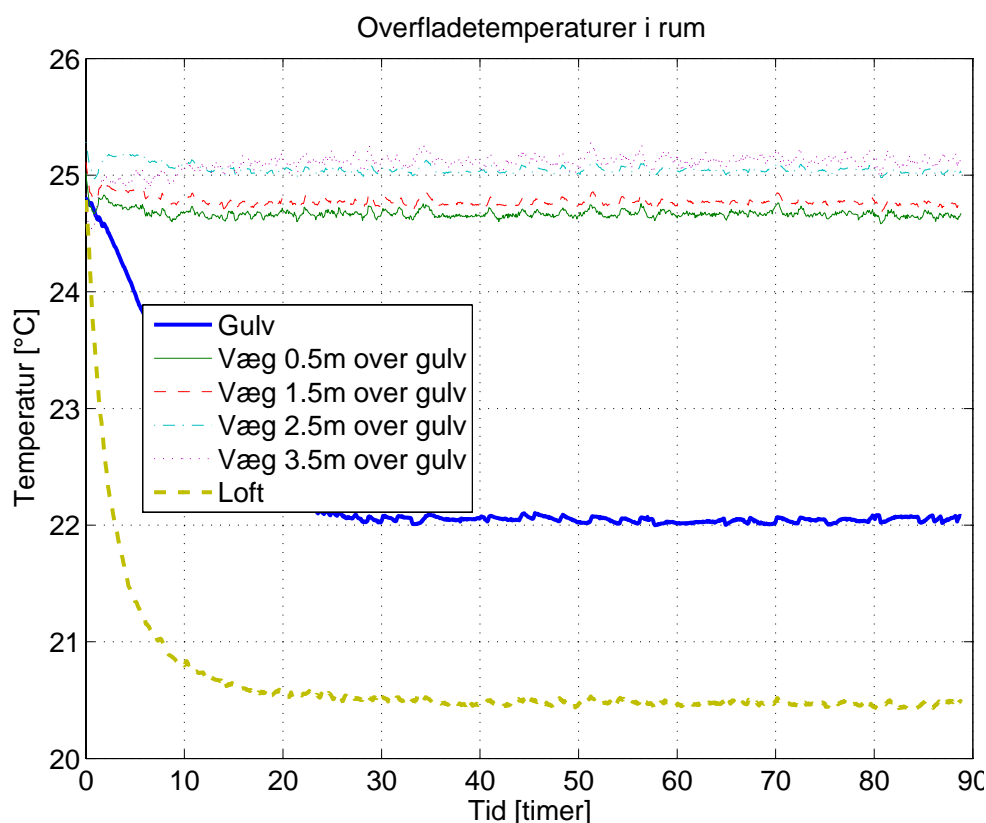
Dette gælder i benyttelsestiden, som typisk starter fra kl. 09.00, dvs. at man godt vil kunne forsvare en lidt lavere temperatur, f.eks. 21°C kl. 08.00 og 26°C klokken 18.00.

I de to dynamiske forsøg, som er vist i figur 4.7, hvor der er en intern varmelast på 40 W/m² og 30 W/m², er temperaturstigningen i løbet af dagen henholdsvis 2,5 K og 1,5 K. Dermed er det med den varmelast muligt at holde temperaturen inden for henholdsvis komfortklasserne A og B.

5.2 Overfladetemperaturer samt termografering

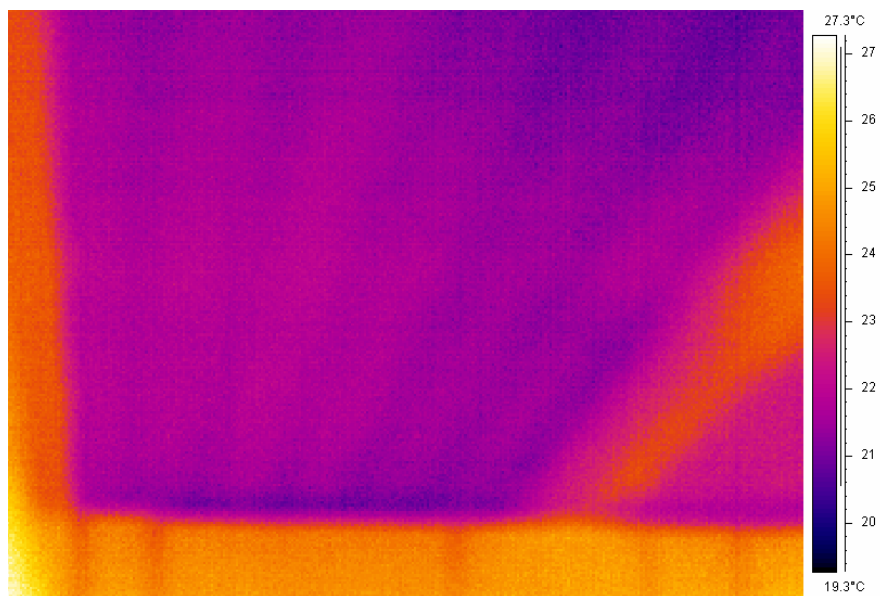
I forhold til den termiske komfort anbefales overfladetemperaturen for gulvet begrænset til ikke at måtte komme under 19°C. For loftfladen er der ikke umiddelbart nogen krav af hensyn til den termiske komfort. I praksis er overfladetemperaturen dog begrænset af, at temperaturen i væskesystemet ikke må være under dugpunktstemperaturen for at undgå kondensdannelse.

Figur 5.1 viser temperaturen på rummets indvendige overflader i en situation, hvor rumluften er opvarmet til 25°C, og væsketemperaturen er ca. 16°C. Overfladetemperaturen på væggen er vist i fire højder på den samme væg. I denne situation er lofttemperaturen ca. 20,5°C, mens gulvtemperaturen er ca. 22°C. Her er lofttemperaturen beregnet som den arealvægtede gennemsnitsværdi over hele dækket. Sænkes rumlufttemperaturen til 23°C, bliver lofttemperaturen sænket til ca. 19°C, mens gulvtemperaturen er ca. 21°C. Disse temperaturer vil ikke give anledning til problemer med den termiske komfort, selv med en varmelast på mellem 40 W/m² og 60 W/m².



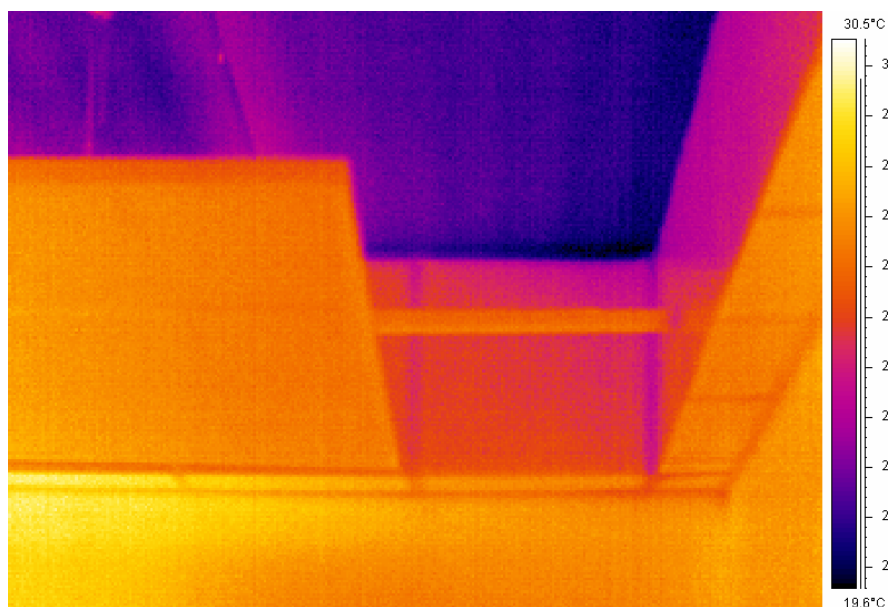
Figur 5.1 Målte overfladetemperaturer på dæk og indervæg i rummet

På figur 5.2 vises overfladetemperaturen af loftet i rummet. På billedet kan placeringen af slangerne ses med i form af en mørkere farve. Samtidig er overfladetemperaturen mellem to af dækkene, hvor der ikke er slanger, højere end i selve fladen. Bemærk at billedet er taget i opstillingen med akustikloft. Det er dog samme forhold, som gør sig gældende uden akustikloftet.



Figur 5.2 Temperatur på loftoverflade af øverste dæk.

Endelig viser figur 5.3 et billede, hvor den nedhængte flåde og hjørneabsorbenten er tydelig. Bemærk, at indflydelsen fra en af radiatorerne i rummet kan ses i nederste venstre hjørne af billedet. Samtidig ses, at den lodrette overflade af hjørneabsorbenten er koldere end væggen nedenfor som følge af afkølingen fra dækket. I øvrigt bemærkes det, at der ikke lader til at være en særlig stor temperaturforskel på dækoverfladen henholdsvis over flåden og væk fra flåden.



Figur 5.3 Termograferingsbillede af det nedhængte loft samt hjørneabsorbent under høj belastning, loftet er ca. 26 C på undersiden (til venstre ses varmluft over elradiatoren som benyttes til at tilføre kølelasten)

5.3 Styling og komfortforhold

I følgende vurdering af komfortforholdene baseret på TRNSYS simuleringer, jf. bilag 4, er der anvendt en tidsstyring af køleanlægget. Anlægget er kun aktivt om natten og der anvendes udelukkende frikøling.

I følgende tabel ses antallet af timer, hvor rumtemperaturen overstiger henholdsvis 24, 25, 26 og 27 C. Antallet af timer er optalt i benyttelsestiden. Benyttelsestiden er defineret som tidsrummet mellem kl. 9 og 17 på hverdage.

Tabel 5.1 Antal timer, hvor rumtemperaturen overstiger henholdsvis 24, 25, 26 og 27 C mellem kl. 9 og 17 på hverdage

Antal timer over 24°C	323
Antal timer over 25°C	131
Antal timer over 26°C	13
Antal timer over 27°C	0

Ifølge vejledningen for toleranceoverskridelser i DS-474: Norm for specifikation af termisk indeklima er det acceptabelt, at temperaturen på varme sommerdage overstiger 26 C i 100 timer og 27 C i 25 timer i løbet af et typisk år. Disse toleranceoverskridelser er således overholdt med den anvendte styling.

Køling vil en del af året kunne suppleres med naturlig ventilation, eventuelt i kombination af natkøling. Herved spares elenergi til ventilatorer på frikølerne.

Der er ikke udført temperaturstatistik på simuleringer med andre styringsstrategier, eksempelvis de to alternative tidsstyringer beskrevet i bilag 4, da disse kun er interessante i situationer med en væsentlig andel af mekanisk køling ud over frikølingen, idet analyserne har vist, at køling kan tilvejebringes uden brug af mekanisk køling.

Antallet af timer, hvor temperaturen er under 20 C i benyttelsestiden, er ifølge simuleringerne 95. Disse timer med forholdsvis kolde temperaturer forekommer naturligvis fortrinsvis i de tidlige morgentimer og vil kunne kompenseres med supplementsvarme med lokale varmeblader (radiatorer) eller forcering af ventilationsanlæg i morgentimerne.

Det fremgår således af simuleringsresultaterne, at der under normale forudsætninger ikke er behov for yderligere køling ud over den køling, som de termoaktive konstruktioner kan levere. Derimod vil der med den anvendte styling på nogle få dage være et antal timer om formiddagen, hvor temperaturen for visse medarbejdere kan være utilfredsstillende lav, hvis der ikke anvendes nogen form for supplementsvarme. Det vil derfor være bedre at vælge en styringsstrategi, hvor temperaturen hæves lidt om formiddagen mod at der til gengæld på varme sommerdage accepteres lidt flere varme timer om eftermiddagen, men det anbefales verificeret med målinger i et virkeligt byggeri.

6 Styringsstrategi og samspil med forsyning

6.1 Analyse af korttidsdynamik

For at vurdere de dynamiske forhold er der foretaget en række beregninger baseret på forholdene i forsøgsopstillingen. Til beregningerne er programmet TASim benyttet. Programmet er beskrevet og valideret i en Ph.d.-afhandling [2] baseret på de målinger, som også præsenteres her.

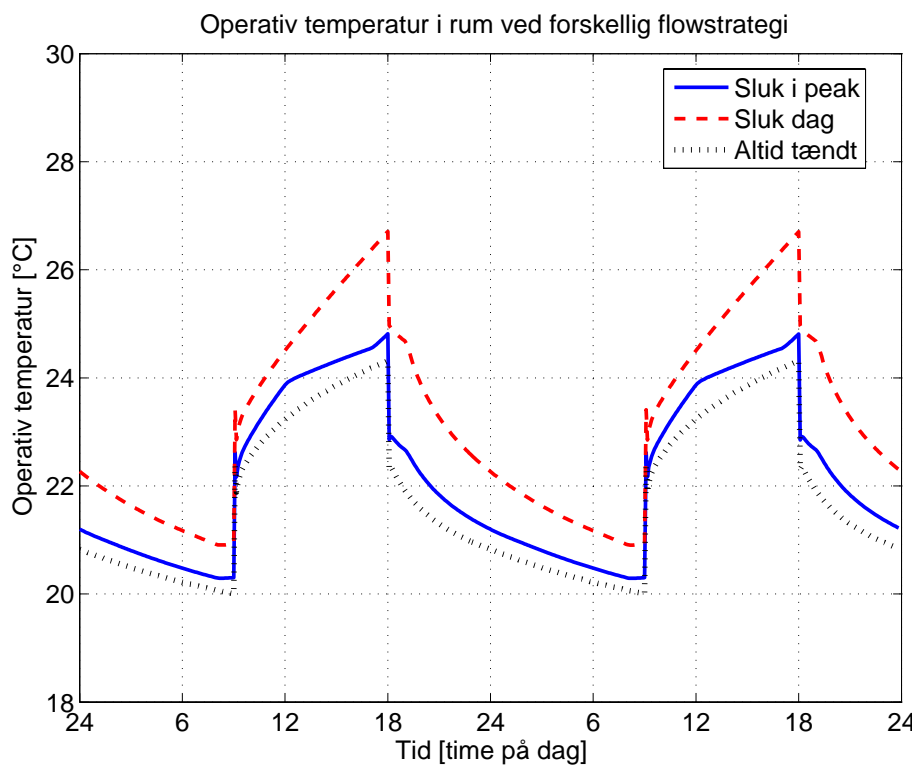
I beregningerne er der foretaget beregninger med en fremløbstemperatur på 18°C og en intern varmelast på 48 W/m² eller 30 W/m² i dagtimerne fra 9 til 17, mens der resten af tiden benyttes 5 W/m².

Figur 6.1 og figur 6.2 viser den operative temperatur midt i rummet med tre forskellige styringsstrategier af flowet, som anført her:

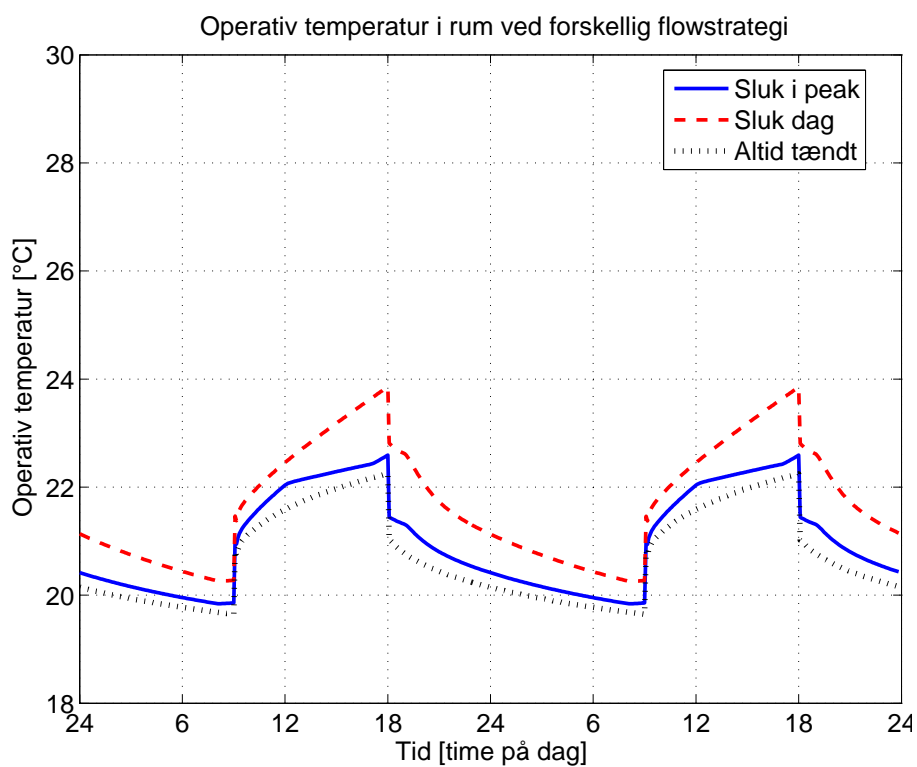
- 1 Flow tændt hele døgnet
- 2 Flow tændt hele døgnet på nær de dyre perioder (8-12 og 17-19)
- 3 Flow kun tændt om natten

Som det ses, er der med den valgte fremløbstemperatur en operativ temperatur på mellem 20°C og 21°C om morgenen afhængig af strategien, inden den høje varmelast startes. Herefter stiger temperaturen hurtigt, hvorefter den i løbet af arbejdsdagen stiger noget langsommere. Dette kan benyttes til at vurdere anvendeligheden af de valgte strategier. Først betragtes den lave last på 30 W/m², hvor der i alle tre tilfælde er en temperaturstigning på under 3 K (hvis den hurtige temperaturstigning klokken 8-9 ikke medtages). Dette svarer, jf. kapitel 6, til den termiske komfortklasse A eller B som defineret i CR1752.

Det samme er tilfældet for den høje varmelast i de to første styringsstrategier, hvorimod den strategi, hvor der er slukket for flowet i dagtimerne, ikke kan opretholde den ønskede termiske komfort. Da en intern varmelast på 30 W/m² er ganske høj, vil det altså som oftest være nok at have en styring, hvor der slukket om dagen. Endelig kan det ses, at der kun er en ganske lille forskel på den strategi, hvor der er tændt hele døgnet, og den hvor der er slukket om dagen.



Figur 6.1 Operativ temperatur i rummet med intern varmelast på 48 W/m² i dagtimerne (unormal høj varmelast).



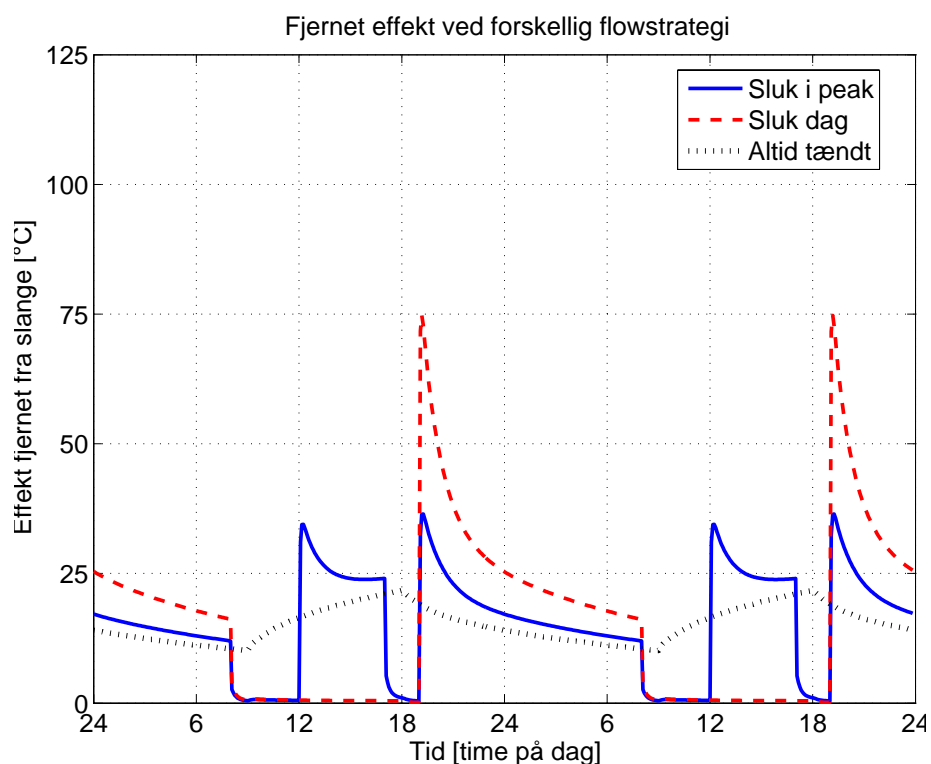
Figur 6.2 Operativ temperatur i rummet med intern varmelast på 30 W/m² (maksimal kølelast i et moderne kontorbyggeri)

Det ses, at det ikke giver komfortmæssige problemer at afbryde køleforsyningen i 9 timer sammenhengende eller i spidslastperioder.

6.2 Effektaftag fra kølesystem og lastudjævning

Ovenfor vist den beregnede operative temperatur (figur 6.1 og figur 6.2) i et rum belastet med en varmelast på 30 W/m^2 ved tre forskellige styringsstrategier. Den optagne effekt i slangen i de tre situationer er vist på figur 6.3 til venstre. Som det ses, er der stor forskel på, hvorledes effekten bliver optaget. I beregningerne antages det, at der er en "uendelig" kølekapacitet til rådighed, som altid kan give den ønskede fremløbstemperatur. Som forventet er der en større optagen effekt jo kortere systemet kører. Samtidig er der en stor peakværdi, når der tændes for flowet for den styringsstrategi, hvor der kun er tændt om natten. Denne peak kan i visse tilfælde være uønsket, derfor er der gennemført en beregning med det halve flow, som vises til højre på figur 6.3, i forhold til venstre side. Her ses det, at effektaftaget bliver mindre med det mindre flow. Årsagen til den store peak er, at der er en stor temperaturforskel mellem væske og betondæk, når der tændes for flowet i slangen.

I praksis vil kølesystemet kunne udlægges for en mindre effekt, hvorved startspidsen udjævnes over et par timer, uden at det vil påvirke rumtemperaturen nævneværdigt. En buffertank med en kapacitet 1-2 timers max. ydelse vil også kunne reducere behovet for mekanisk kølekapacitet markant.



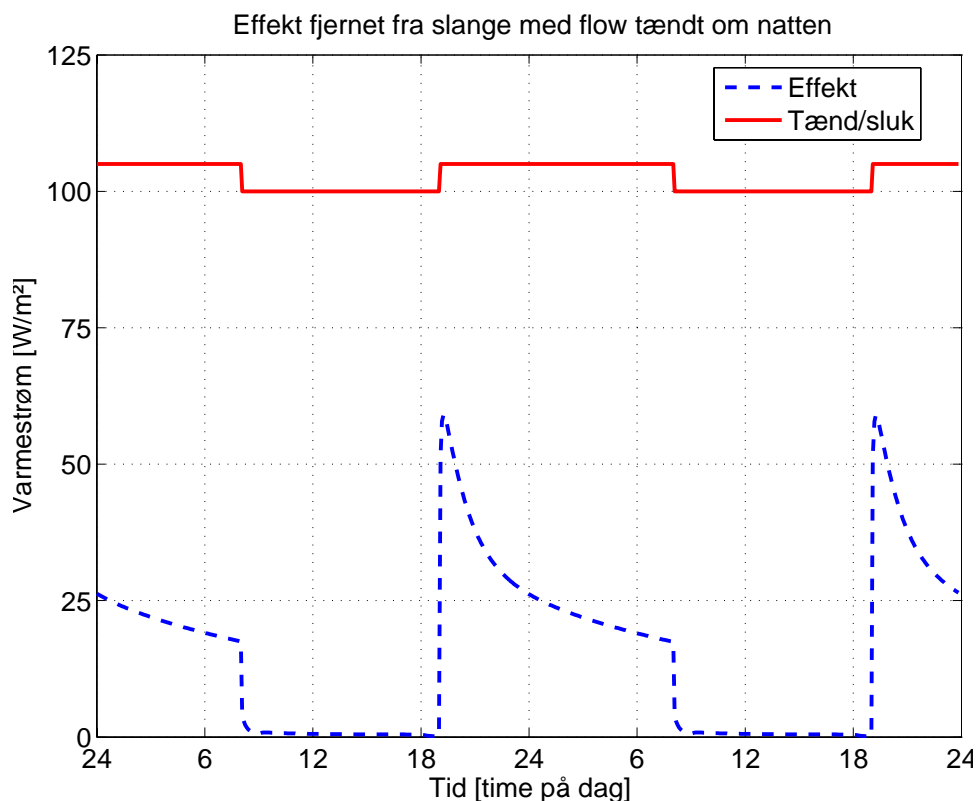
Figur 6.3 Effekt fjernet i slange ved de tre forskellige styringsstrategier (tv.) ved en intern varmelast på 30 W/m^2 i dagtimerne.

Den maksimale køleeffekt i et normalt let kontorrum uden lagring, hvor rummet køles med ventilationsluft, vil typisk være omkring 30 W/m^2 .

Det ses af figuren, at den maksimale køleeffekt ved konstant drift reduceres til 20 W/m^2 , når rummet tilføres 30 W/m^2 i benyttelsestiden, det er en effektreduktion på 33%.

Hvis køletilførslen afbrydes under spidslast, dvs. 4 timer formiddag og 2 timer aften, bliver den maksimale køleeffekt ca. 30 W/m^2 , dvs. som i et rum der køles traditionelt efter behov med afkølet ventilationsluft.

Hvis der kun køles udenfor benyttelsestiden, er der behov for et lager på ca. 2 max. timer, hvis den installerede kølekapacitet ikke skal være større end ved traditionel køling med ventilationsluft efter behov i benyttelsestiden, eller systemet kan udføres med begrænset effekt som illustreret nedenfor:



Figur 6.4 Styringsstrategien, hvor der er slukket om natten, men med det halve flow i slangen som på figuren ovenfor.

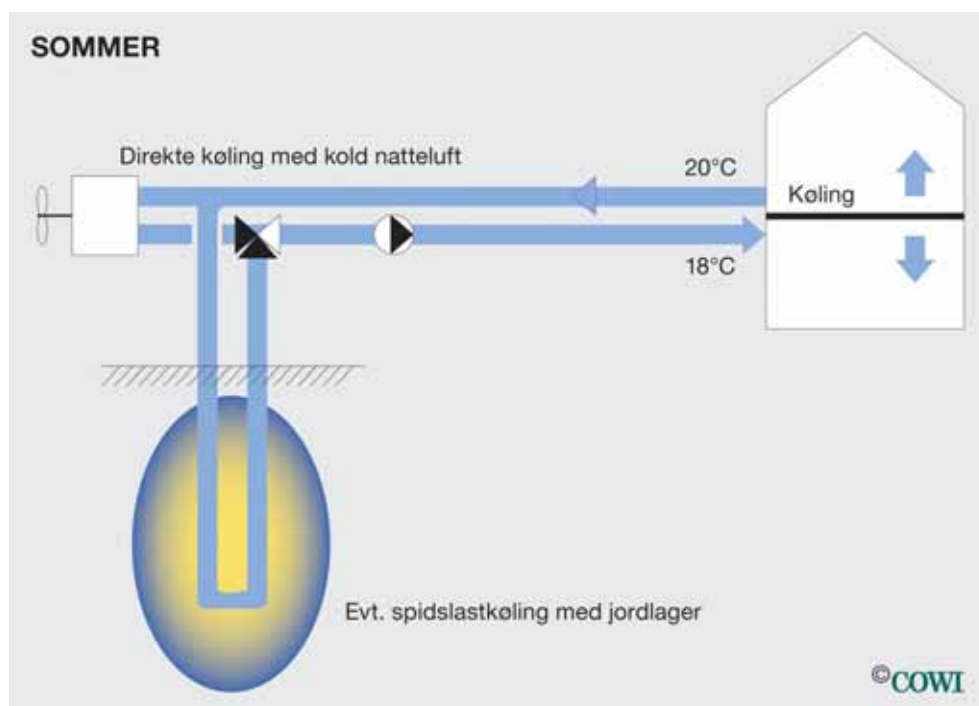
Man kan eventuelt også bare acceptere, at det tager lidt tid, inden fremløbstemperaturen kommer ned på den ønskede værdi. Det vil selvfølgelig gøre kølingen mindre effektiv i starten, men vi har hele natten til rådighed.

Frikøling og supplerende køling

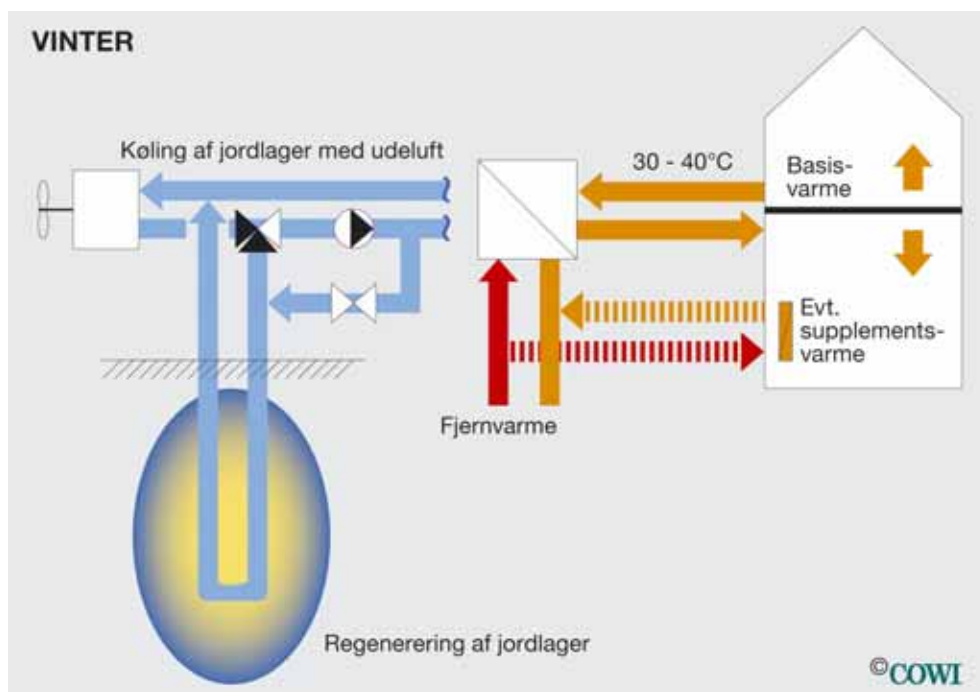
Simuleringsresultaterne, som nærmere beskrevet i bilag 4, viser, at der til alle tider vil være rigelig køling til rådighed ved natkøling. Hele kølebehovet kan dækkes ved frikøling, og der er således ikke behov for yderligere køleeffekt, hvis de normale toleranceoverskridelser i henhold til DS 474 anvendes som vejledende. Der kan dog lejlighedsvis opstå situationer i meget varme sommerperioder, hvor der er brug for en kraftig nedkøling af de termoaktive elementer om natten. Dette for at forhindre uacceptabelt høje temperaturer om dagen, som kan medføre, at temperaturen om morgenen kan blive for lav, især hvis der sker et vejrskift til køligere vejr.

Det anbefales derfor, at væsketemperaturen på det afkølede vand styres efter udetemperaturen, og at setpunktet overstyres af vejrprognose signal, der kan abonneres på fra DMI.

Der bør derfor ikke køles til en overfladetemperatur på under ca. 20 °C om morgenen. Skulle der være behov, kan væsketemperaturen sænkes i løbet af dagen, f.eks. ved at trække køling fra jordslanger.



Figur 6.5 Principdiagram af total system. Om sommeren frikøles med kølig udeluft om natten, hvilket i en række tilfælde vil være tilstrækkeligt. Et jordlager kan, om det ønskes, indbygges, så det kan levere spidslastkøling de få dage om året, hvor dette er nødvendigt. Altså helt uden brug af kølekompressorer [COWI].



Figur 6.6 Principdiagram af for vinterdrift. Jordlageret regenereres med kold udeluft, og de termoaktive konstruktioner benyttes til basis-opvarmning af bygningen, eventuelt sammen med supplerende varmegivere til hurtig/individuel regulering [COWI].

Tabel 6.1 Oversigt over, hvor mange timer om året temperaturen er over en given udetemperatur, jf. referenceåret:

Timer om året over	I døgnet	I kontortiden 8-16	Aften
24°C	72	49	23
21°C	221	147	74
18°C	954	443	511
15°C	1973	884	1089
12°C	3269	1223	2046
9°C	4229	1473	2756

Det ses, at normal frikøling med udeluft til en væsketemperatur på 10 C i kontortiden kun er mulig i ca. 1/3 af året, mens frikøling til en væsketemperatur til termoaktive konstruktioner på 19 C er mulig ca. 95% af året. I de sidste ca. 5% af året kan jordlageret, eventuelt udført som lodrette jordslanger (såkaldte

BTES anlæg), benyttes som spidslast buffer, således at mekanisk køling ikke bliver nødvendig.

Tabel 6.2 Oversigt over, hvor mange timer om året nattetemperaturen er over en given udetemperatur, jf. referenceåret. Markeringen viser de timer, hvor udetemperaturen er for høj til at frikøle til 19 C om natten (34 timer pr år).

Hverdage 23-08							
	Timer over						Timer i alt
	20°	19°	18°	17°	16°	15°	
Jan	0	0	0	0	0	0	207
Feb	0	0	0	0	0	0	180
Mar	0	0	0	0	0	0	189
Apr	0	0	0	0	0	0	198
Maj	0	0	0	0	0	5	207
Jun	0	1	5	6	19	30	180
Jul	1	3	7	20	36	50	207
Aug	0	5	12	23	28	54	198
Sep	0	0	0	2	3	10	189
Okt	0	0	0	0	0	0	207
Nov	0	0	0	0	0	0	189
Dec	0	0	0	0	0	0	198

Lageret skal typisk kunne dække et kølebehov, på ca. 1 kWh køling pr. år pr. m² kontor.

Tabel 6.3 Typisk fordeling af kølebehov fordelt på måneder i procent af det årlige kølebehov.

Måned	Kølebehov i beregnet testrum (kWh)	%
Januar	1	-
Februar	7	4,0
Marts	10	6,0
April	14	8,3
Maj	21	12,5
Juni	20	11,9
Juli	23	13,6
August	32	19,0
September	21	12,5
Oktober	14	8,3
November	4	2,3
December	1	-

Betydning af tariftilpasset drift

Elforbrug til kontorer afregnes ofte efter den såkaldte 3-ledstarif, hvor elforbrug om natten (fra kl. 21 til kl. 06) typisk koster 13% mindre (130 kr. ekskl. moms. pr. MWh) end den gennemsnitlige elpris på for tiden ca. 1000 kr. pr. MWh ekskl. moms i NESAs område medio 2005.10.06.

At benytte termoaktive konstruktioner, der køles om natten, til køling af en bygning giver altså en økonomisk besparelse selv ved 100% kompressorkøling. Besparelsen øges ved, at kølekompressorer kører mere effektivt ved den højere kølevandstemperatur i køleslangerne og den koldere udeluft om natten, hvor kølekompressorerne skal af med varmen.

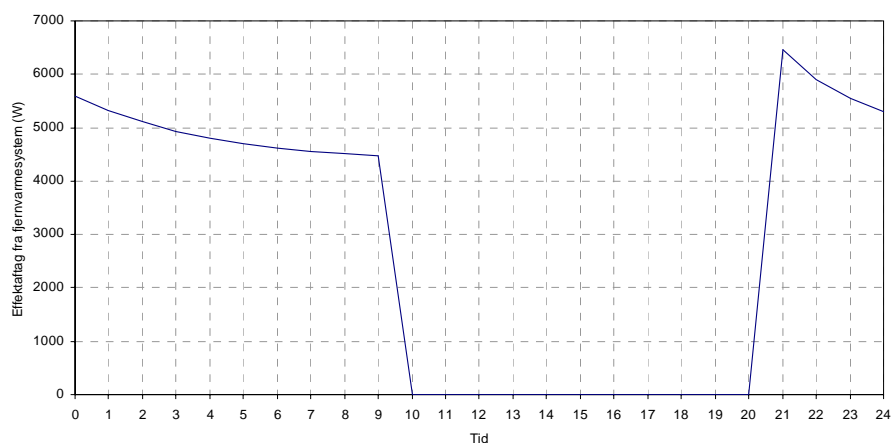
Men som tidligere nævnt er der slet ikke behov for kølekompressorer, da kølingen kan leveres ved frikøling, eventuelt kombineret med et lager. Frikøling kan tilvejebringes med en COP (coefficient of performance) på typisk 60, hvor en kølekompressor uden frikøling ofte ligger på en COP på 3,5 som middelværdi over året. Da COP-værdien er et udtryk for, hvor stor en køleydelse i kWh, der kan leveres med et elforbrug på 1 kWh, ses det, at der er en markant elbesparelse ved at basere kølesystemet på at benytte termoaktive konstruktioner, der kan frikøles hele året.

Det er altså ikke den tariftilpassede drift, men muligheden for den langt større andel af frikøling, der giver den store elbesparelse på op til ca. 90% i forhold til traditionel kompressorkøling.

Opvarmning

Termoaktive konstruktioner kan ud over at levere køling også benyttes til rumopvarmning ved lav medietemperatur. I nedenstående figur ses en beregnet døgnkurve for effektaftag fra fjernvarmesystemet ved en udetemperatur på tilnærmelsesvis 0 C.

Det ses, at der kun er behov for supplerende varme i natte-, morgen- og aften-timer. Den akkumulerede varme i de termoaktive konstruktioner, solbidrag og de interne varmelaster sørger for at holde lokalet over den ønskede rumtemperatur. Den karakteristiske morgenspids er elimineret, forudsat at der ikke samtidigt startes ventilationsanlæg med dårlig varmegenvinding og store varmeflader.



Figur 6.7 Døgncurve for effektaftag fra fjernvarmesystem beregnet ved hjælp af TRNSYS-model ved en udetemperatur på 0 grader under opvarmning (bemærk manglende morgenspids og den lastudjævnende effekt).

Den jævne belastning i fjernvarmeaftag over nattetimerne er en stor fordel for fjernvarmeforsyning i de store morgenspids, som typisk opstår, når der i normale bygninger benyttes energi til at genopvarme rummene. Systemet arbejder i modfase med rumopvarmning i boliger og bidrager således til en samlet bedre udnyttelse af et givent fjernvarmesystem.

Ulempen er, at der opnås en lidt mindre varmebesparelse på grund af mindre natsænkning på hverdage. Da de store besparelser for kontorbyggeri dog ligger i temperatursænkningen over weekenden, som også kan opnås med afbrydelse af varmforsyningen til de termoaktive konstruktioner, indtil rumtemperaturen er faldet til en ønsket minimumsværdi, er der i praksis ikke væsentlig forskel.

Da systemet giver store besparelser på elforbrug til køling, som tæller højere økonomisk, og i forhold til det primære energiforbrug end den mindre varmebesparelse på natsænkning, taler dette til fordel for brug af de termoaktive konstruktioner.

Anbefalet styringsstrategi

De indledende undersøgelser viser, at tilførsel af varme eller køling bedst sker om natten, typisk i tidsrummet mellem kl. 24 og kl. 06. I overgangsperioden forår og efterår kan der startes senere. Systemet kan optimeres ved at udvikle en adaptiv styring af køle- og opvarmningsperioden med en vejrprognosealgoritme baseret på data, der løbende hentes fra DMI over Internettet.

Det anbefales ikke at køle dækkene længere tid end til det tidspunkt, hvor rumtemperaturen når ca. 20 C, for at rummet ikke skal blive for koldt om morgenen, når det tages i brug. Hvis rumtemperaturen bliver for høj i løbet af dagen, startes cirkulationspumpen, så varmeoverskuddet fordeles bedre til hele den akkumulerende masse; effekten heraf er dog næppe særlig stor.

Hvis frikøling om natten ikke er tilstrækkelig, startes frikøling om dagen, hvis udetemperaturen er under 18 C, ellers trækkes der på kølelageret. Alternativt kan frikølerne kortvarigt overrisles med postevand, så fordampning af vandet giver en temperatur på 18 C eller derunder. Dette må kun ske ganske få timer om året, ellers skal systemet udføres med recirkulation og vandbehandling (så belægninger og risiko for legionella undgås).

I overgangsperiode kan køling fortages med en vandtemperatur på ca. 22-23 C, hvilket gør, at systemet samtidig kan benyttes til at tilføre og fraføre varme alt efter skift i rummets behov eller uventede vejrændringer.

Systemets regulering bør som minimum opdeles i facadezoner. Systemets ulempe er, at det regulerer trægt, hvilket om vinteren kan betyde, at der i perioder opvarmes til højere temperatur end 21 C. Det anbefales derfor at benytte termoaktive konstruktioner til at levere basisopvarmning i rum, hvor der er høje krav til komfort - og at supplere med små varmeplader, der kan varetage den sidste trimning af rumtemperaturen med hurtigt regulerende varmetilførsel, der også kan benyttes til individuel regulering ved sekretærarbejdspladser eller i lokaler med stærkt varierende belastning som f.eks. mødelokaler.

Ovennævnte foreløbige styringsstrategi er baseret på resultatet af de udførte simuleringer og forsøg i mock-up; men det anbefales klart, at der udføres et fuldskala demonstrationsbyggeri, som vil kunne afdække systemets dynamik og styringsmuligheder i praksis under virkelige driftsforhold og med de uforudsete skift i vejr og belastninger, som naturligt vil forekomme i praksis. På basis af måleresultater fra et demonstrationsbyggeri vil det være muligt at optimere styringsstrategien og give guidelines for, hvordan et anlæg med termoaktive konstruktioner opbygges optimalt.

6.3 Økonomisk vurdering

Ved at benytte termoaktive konstruktioner kan der spares penge på såvel anlægssiden som på driftssiden.

Anlægsbesparelser

Ved brug af termoaktive konstruktioner spares anlægsudgifter og plads til installationer. Ventilationskanaler kan udføres med lille dimension, da køling ikke skal bæres med ventilationsluft, dvs. at ventilationsanlæg kun skal tilvejebringe frisk udeluft (dvs. et luftskifte på 1-2 gange i timen i stedet for et luftskifte på normalt 4-8 gange i timen). Varmeanlæg kan dermed udføres med mindre dimensioner på rør og varmeplader.

Etagenhøjden kan sænkes, da ventilationskanaler er mindre; det kan spare dyr facade eller give plads til en ekstra etage på et højhus. Kompressorkøleanlæg og kølecentral er ikke længere nødvendigt, idet der kan frikøles med udeluft og jordslanger hele året.

Det er vanskeligt nøjagtigt at prissætte disse besparelser, da de afhænger af udformningen af hvert enkelt byggeri. Nedenfor er dog angivet nogle grove esti-

mater over anlægsbesparelserne, idet der tages udgangspunkt i et byggeri med et dimensionerende kølebehov på 1 MW, svarende til et moderne kontorbyggeri på 3500 m² (priserne er ekskl. moms).

Sparede omkostninger:

• Køleanlæg (udover frikøleflader)	ca. kr.	700.000
• Køle- og varmecentral (inst. og bygn.arb.)	ca. kr.	1.200.000
• Ventilationsanlæg (fra 4-8h ⁻¹ til 1-2h ⁻¹)	ca. kr.	1.750.000
• Reduceret varmeanlæg (2/3 af normal inst.)	ca. kr.	700.000

Meromkostninger:

• Termoaktive betonelementer	ca. kr.	700.000
• Rørinstallation, fordelerstationer mv.	ca. kr.	700.000
• CTS og prediktiv styring	ca. kr.	350.000
• Tilpasset akustikløsning	ca. kr.	350.000
• Jordlager	<u>ca. kr.</u>	<u>1.200.000</u>

Netto besparelse: ca. kr. 1.050.000

Nettobesparelsen er ca. 300 kr./m², der dog først vil kunne realiseres, efter at der er bygget et antal byggerier med denne teknologi.

Det første demonstrationsbyggeri vil være en del dyrere, da systemet endnu ikke er fuldt udviklet og optimeret. Det er også sandsynligt, at man i det første byggeri vil bevare køleanlæg og køle- og varmecentral for at have fuld back-up som sikkerhed for det nye system.

Der henvises i øvrigt til økonomiopgørelsen i EFP-2001 projektet: Termoaktive konstruktioner Fase 1 - Forprojekt bilag 2. Ens.J.nr. 1213/01-0020.

Driftsbesparelser

Med brugen af de termoaktive konstruktioner og deraf følgende mulighed for reduceret ventilation kan der opnås en årlig elbesparelse på typisk 16 kWh/m² eller 40 kWh/m² i primærenergiforbrug. Besparelsen fordeler sig ligeligt på reduceret elforbrug til køling og reduceret elforbrug til mekanisk ventilation, da den mekaniske ventilation ikke skal bære tilførsel af køling eller varmeenergi, men kun skal levere det nødvendige luftskifte på typisk 2 gange i timen i benyttelsestiden.

For byggeriet i eksemplet udgør den årlige besparelse (ekskl. moms):

• El: 16 kWh/m ² x 3500m ² / 1000 * 1000 kr./MWh =	56.000 kr./år
• Sparet årlig servicering: =	40.000 kr./år

Den mulige varmebesparelse ved systemet er ikke medregnet.

Den samlede driftsbesparelse udgør altså 96.000 kr./år eller ca. 27 kr./m² pr. år.

Totaløkonomi

Nuværdien af 30 års drift inklusive reinvesteringer kan med en kalkulationsrente på 3% på basis af ovenstående beregnes til 3,66 mio. kr. for det nævnte eksempel med et 3500 m² kontorbyggeri. Dette svarer til, at byggeriet reelt må være op til 1446 kr. dyrere pr. m² end angivet ovenfor, før der totaløkonomisk set opnås break-even med en traditionel køleløsning. I beregningen er indregnet en sparet reinvestering på 1.225 mio. kr. efter 15 års drift, som ellers skulle have været afholdt. Udelades medregning af denne reinvestering ligger break-even på 2,9 mio. kr., og udelades yderligere besparelsen i årlig servicering, fås break-even på 2,12 mio. kr. eller ca. 600 kr./m².

Det ses, at brugen af termoaktive konstruktioner kan være et attraktivt økonomisk energisparetiltag blandt flere til at imødekomme bygningsreglementets skærpede energiramme krav til maksimalt tilladt primærenergiforbrug på ca. 95 kWh/m².

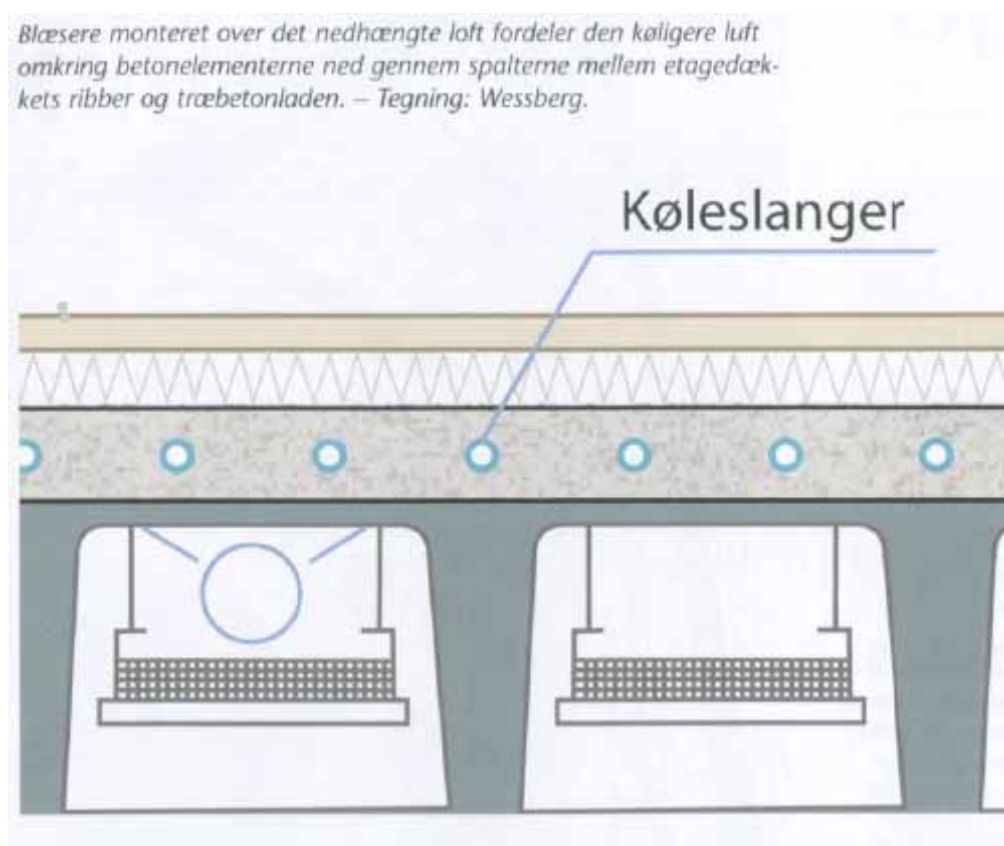
6.4 Miljøeffekt, sparet CO₂

1 MWh sparet elforbrug svarer i Københavnsområdet til en sparet luftemission på 537 kg CO₂ med tilhørende NO_x og SO_x emissioner (Elkraft 2003).

Elbesparelsen i det nævnte eksempel giver altså en CO₂ reduktion på 30 tons pr. år eller 902 tons på 30 år, svarende til ca. 258 kg pr. m².

7 Produktionsmæssige muligheder

Anvendelse af termoaktive konstruktioner udført som in-situ støbte konstruktioner kendes fra udlandet og fra enkelte danske byggerier.



Figur 7.1 Et eksempel på in-situ støbte termoaktive betonkonstruktioner anvendt i Harbourhouse [Byggeri nr. 5, 2005]

I modsætning til in-situ støbte konstruktioner dokumenterer nærværende projekt, at dækkene kan udføres som præfabrikerede dækelementer med plan underside, hvor den nødvendige køling kan leveres og fordeles uden brug af mekanisk ventilation.

7.1 Elementudformning

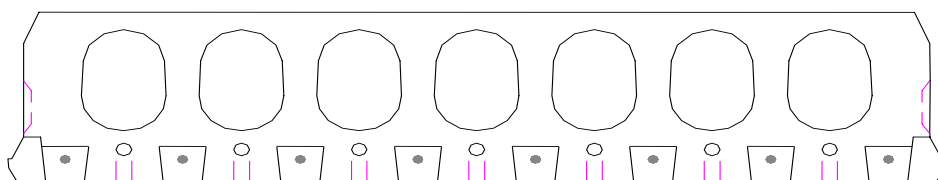
Huldækselementer produceres normalt i højder fra 150 mm til 400 mm afhængigt af spændvidden og anvendelsen. Den mest nærliggende anvendelse af termoaktive elementer er kontorbyggeri, hvor et typisk element vil være et PX27, der kan anvendes til spændvidder normalt op til 12 meter afhængigt af svingningsfølsomheden.

Der er i udformningen af de termoaktive elementer lagt vægt på, at de kan støbes med det nuværende produktionsudstyr uden omfattende ombygninger. Ud over den indlysende fordel ved, at investeringerne i udstyr holdes nede, opnås en fleksibilitet i produktionen, som igen er med til at sænke den endelige pris på dækket.

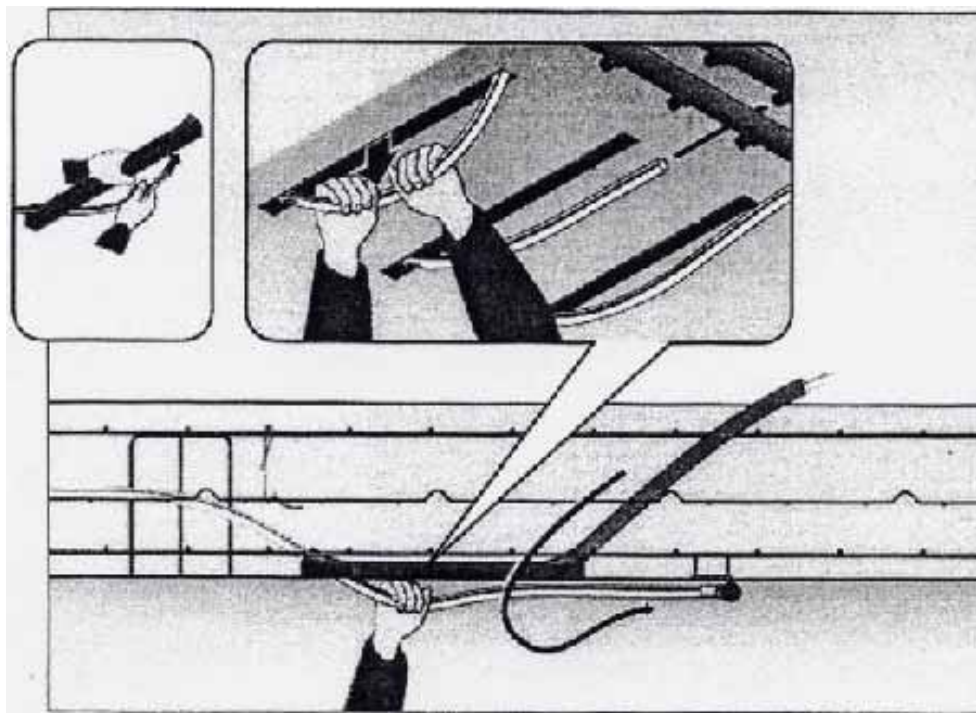
Forsøgselementerne er valgt som 270 mm høje huldæk. Produktionsmæssigt vil elementerne umiddelbart kunne udføres i 220, 270, 320 mm højde.

Elementerne er udformet som standard Spæncom PX27 dæk med reduceret højde af kanalerne. Kanalernes geometri er identisk med geometrien i standard PX22 dæk. Der bliver hermed skabt et område på ca. 5*10 cm under rørene, som vandslangerne indstøbes i. Slangerne er ført retlinet gennem elementet under alle kanaler (7 stk. i hvert dæk) og samles uden for dækkene. Slangerne stikker lidt over 10 cm uden for dækket, så de kan bøjes op til overkanten af dækket i enderne, hvor de kan beskyttes under montage af et stålprofil.

Der er udført forsøg med udsparinger eller indstøbte polystyrolklodser, som muliggør, at slangerne bukkes op eller ned og samles over eller under dækket afhængigt af bygningens øvrige konstruktion. Fordelingsrør kan således både føres i gulvopbygning på min. 60 mm eller underloft / over nedhængt loft. Endelig er der støbt prøveplader med udsparinger midtpå, så slangerne ville kunne trækkes ned f.eks. ved en skillevæg og samles i forskellige sektioner af bygningen, og således at modstående facadesektioner kan reguleres individuelt.



Figur 7.2 Elementgeometri PX27– termoaktivt

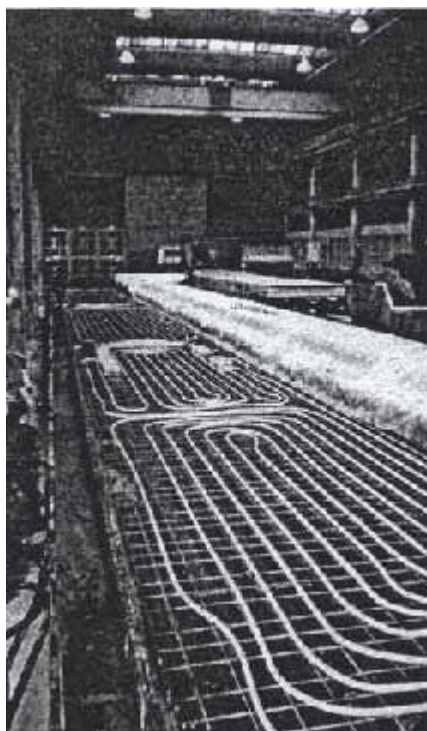


Figur 7.3 Eksempel på placering af polystyrolklodser for adgang til rørslanger (Bjarne Olesen, Wirsbo)

7.2 Alternativ udformning

Slangerne ville kunne lægges i en spiral eller et andet mønster i elementet. Dette giver nogle væsentligt billigere samlinger uden for elementet, men er til gengæld fordyrende for selve elementet. Slangerne vil med denne udformning skulle tilpasses til elementlængden og monteres i støbeformen som en færdig enhed, der bindes til hovedarmeringen. Ud over ekstraomkostninger kan der være en risiko for, at fremstillingen af spiralslangerne kan blive en flaskehals i produktionen. Hvis slangerne lægges i bukninger på tværs af elementet, ville de eventuelt kunne fremstilles i store mængder, der klippes til efter elementlængde, hvilket dog giver lidt større hydraulisk tryktab i rørsystemet. Indflydelsen på bæreevnen af elementet er vurderet til at være begrænset.

Det anbefales i stedet at udføre standardspiraler med seks træk, således at der er 30 cm mellem de 2 inderste rør, så bukkediameteren ikke bliver for lille. Det anbefales endvidere at udforme disse spiraler i en standardlængde. Spiralerne skal primært betjene facadezoner, og i midten af elementet kan der være en neutralzone af varierende længde, således at de samme spiraler f.eks. kan benyttes til dækelementer med længder varierende fra 9 til 12 m.



Figur 7.4 Forsøg med indstøbning af spiralformede slangeelementer (Bjarne Olesen, Wirsbo)

7.3 Styrkeforhold

Med den aktuelle elementudformning vil kapaciteten af elementerne være mindst den samme som den normale kapacitet. Til gengæld er egenvægten noget større: $4,62 \text{ kN/m}^2$ i forhold til et normalt dæks $3,89 \text{ kN/m}^2$, altså en til lægsvægt på lidt under 20%.

Betydningen af den ekstra egenvægt for et dæk med 12 m spændvidde i kontorer uden arkivlast:

Tabel 7.1 Betydningen af den ekstra egenvægt

	Std PX27 Armering 6L12,5+2L15,2	Termoaktivt 27 cm Armering 6L12,5+2L15,2	Termoaktivt 27 cm Armering 4L12,5+4L15,2	Skønnet "normalkrav" til bæreevnen
MRd	7,3	6,6	7,5	5,4
VRd	10,6	9,9	10,3	5,4
Brandsituation BS60	5,0	5,0	5,0	4,5
Mrev	5,9	5,2	6,0	4,5
Mbal	1,5	0,8	1,3	1,0-1,5

Alle laster i kN/m^2 .

Som det ses, vil det normalt være muligt at opnå de samme spænd i kontorområder, om end med et let øget armeringsforbrug.

Lidt anderledes forholder det sig for arkiver og kontorlokaler med arkivlast. Her vil kravet i brandsituationen typisk ligge omkring $6,5 \text{ kN/m}^2$. Med maksimal armering kan dette krav opfyldes med en spændvidde på 11,4 meter i et standarddæk. Denne spændvidde vil kunne øges til op imod 12,6 meter, hvis dækket brandisoleres. Denne mulighed foreligger i sagens natur ikke i et termoaktivt element, hvor effekten af dækket forsvinder, hvis dækket isoleres på undersiden.

I et termoaktivt 27 cm dæk kan der maksimalt benyttes en spændvidde på 10,8 meter i arkivområder, hvilket i de fleste tilfælde vil være fuldt tilstrækkeligt.

7.4 Valg af rørmateriale

Der er til elementerne brugt standard PEX-rør. Plastrør som disse har de indlysende fordele, at de er ufølsomme for korrosion, er lette og relativt billige, samtidig med at de er tilstrækkelig robuste til, at de kan håndteres i produktionen.

Rørsamlinger sker uden for dækelementet med klemringfittings.

7.5 Beskyttelse af og adgang til rør

Der er ikke umiddelbart lavet tiltag til beskyttelse af slangerne. Placeringen af slangerne i tværsnittet er valgt, så de er tilpas langt fra bevægelige dele i støbmaskinen og samtidig relativt nemme af fastholde. Udsparinger til at føre rørene op eller ned i enderne udgraves manuelt i den våde beton, udsparinger under slanger mellem understøtningerne udføres ved at montere polystyrolklodser mellem slangen og støbebunden. Polystyrolklodserne kan udkradses, hvorefter slangerne kan friskæres og bøjes ned i det færdige element. Dette vil eventuelt kunne udføres på byggepladsen, så transportskader undgås.

Ved eventuelt beskadigelse af slangen vil den skulle hugges fri for reparation. Ved enkeltliggende retlinede slanger vil man kunne frakoble den enkelte beskadigede slange mod at miste 1/7 af elementets termiske funktionsevne. Omvendt udgør de udvendige samlinger af de retlinede rør en øget risiko for beskadigelse og er fordyrende for konstruktionen i fittings og arbejdsløsn. Så spiralførmede indstøbte rørelementer kan være at foretrække.

Boring af huller i elementerne til montage af akustiklofter, lysarmaturer, dræning m.v. skal naturligvis foregå i veldefinerede områder, så hverken slanger eller liner beskadiges. Til markering kan benyttes en skabelon, eller det kan foreskrives ikke at benytte skrue, der går dybere end 40 mm. Det anbefales dog at opsætte træ- eller metalskinner, som man kan fastgøre nedhængte lofter og andet til uden fare for at beskadige de indstøbte rør.

Drænhuller er lidt mere problematiske at bore ud i elementerne, da slangerne ligger, hvor hullerne normalt vil bores. Dette kan dog løses, enten ved at binde et rør fra formbunden op til siden af slangerne, som senere kan bruges til at styre boret, eller ved at bore op i kanalen midt mellem linerne og vandslangerne



Figur 7.5 Foto fra prøvestøbning - støbeklar form med slanger monteret, der dog stadig kræver en del arbejdstid, som vil kunne nedbringes ved en produktmodningsindsats frem mod et produkt, der er egnet for industriel produktion.

Plastslangerne er i forsøgselementerne bundet til armeringsnet for at sikre en meget nøjagtig placering. Slangerne går i sagens natur igennem endeskottene, hvilket ses nederst i billedet, og skæres først samtidig med hovedarmeringen.

Støbningen indebærer en del manuelt arbejde, som vil kunne reduceres, når systemet med tiden bliver udviklet og optimeret til en industriel masseproduktion.



Figur 7.6 Foto fra prøvestøbning - slanger delvist indstøbt i underbeton

Slanger delvist indstøbt i underbeton. Elementerne støbes i 3 lag, henholdsvis et lag underbeton med armering og slanger, et lag overbeton uden armering, og til sidst et lag overflademørtel. På billedet ses underbetonen med rør og armering indstøbt.



Figur 7.7 Foto fra prøvestøbning - færdigstøbt underbeton

Underbeton med alle indstøbningsdele færdigstøbt, og formen klar til støbning af den resterende del af elementerne på traditionel vis.



Figur 7.8 Foto fra prøvestøbning - færdigt element

7.6 Produktionsegnethed

Under prøvestøbningen blev slangerne fastholdt af tværarmering med meget lille afstand. Denne skønnes at kunne øges til mindst 600 mm uden nævneværdig betydning for slangernes placering i tværsnittene. Udlægningen og fastholdelsen af slangerne har været relativt tidskrævende under forsøget, men vil med relativt små tiltag og noget rutine kunne bringes ned på lidt over niveau med montage af sidenet i elementerne. Når der foreligger en egentlig produktion af elementerne, er der en væsentlig potentiel besparelse i at lade støbemaskinen fastholde og eventuelt udlægge slangerne.

Ønskes slangerne udlagt på en måde, så der kun er et indløb og et udløb, vil det være mest hensigtsmæssigt at producere nogle færdige enheder, hvor slangerne på forhånd bindes til et armeringsnet, som derefter placeres i støbeformen. Generelt skal arbejdet i selve formen minimeres så meget som muligt, både fordi arbejdsstillingen er mindre god, og fordi støbeformen skal kunne tømmes, armeres og udstøbes inden for en arbejdsdag.

Produktet i den nuværende udformning er absolut egnet til industriel fremstilling og vil med nogen udvikling af produktionsapparatet kunne produceres med et begrænset merforbrug af tid.

7.7 Prisniveau for termoaktive dækelementer

Prisen på dækelementer er i forvejen stærkt afhængig af en række forhold omkring antal kvadratmeter, varianter og udsparinger og indstøbningsdele, så en totalpris per kvadratmeter vil ikke kunne angives med særlig stor nøjagtighed uden et væld af forbehold. For et skønnet gennemsnitskontorbyggeri vil merprisen med tiden ved en fuldt udviklet industriel produktion kunne forventeligt være 100 kr. pr. kvadratmeter i udsalgspris, men den vil kunne variere med op til 25%. Ved de første byggerier med disse dækelementer vil prisen være noget højere, sandsynligvis 200 kr. pr. m².

8 Akustikforhold

8.1 Generelle forhold vedrørende god lyd i kontorer

Der er 3 vigtige forhold, der skal tages højde for:

- 1 **Rumakustik** beskriver lydmiljøet, i rum f.eks. i kontorer. Det mest sædvanlige mål for akustikken er efterklangstiden. I rum, hvor koncentration og kommunikation er særlig vigtig, kan man supplere med mål for taleforståelighed og privacy (uforstyrrethed). God lydisolering er også et krav for at opnå den ønskede akustik.
- 2 **Lydisolering** beskriver en bygningsdels evne til at forhindre, at lyden trænger igennem fra et rum til et andet.
- 3 **Støj** relaterer sig til ekstern støj såsom biler og tog og til baggrundsstøj f.eks. ventilation, elektrisk og elektronisk udstyr. Anden støj kan komme fra mennesker i rummet f.eks. samtale, hoste, fodtrin og skramlen med stole.

8.1.1 Foranstaltninger til forbedring af akustikken

Akustikken kan forbedres ved anbringelse af lydabsorberende materialer i lokalet, f.eks. på loft, vægge eller som fritstående skærme. Det absorberende materiale behøver ikke nødvendigvis dække hele lofts- eller vægfladen, og specielt for produktionslokaler og små kontorer til 1-2 personer) vil en dækning på 50 eller 75% af fladen, jævnt fordelt, ofte give et acceptabelt resultat.

Ved støjende maskiner o.l. er det ofte en god idé at gøre noget særligt ud af støjdemningen på loftet over eller på væggen bag maskinen. Det vil i store rum ofte være en fordel at anbringe en del af lydabsorptionen nede i højde med støjklæderne, f.eks. i form af lydabsorberende skærmvægge, som vægbeklædning, eller som nedhængte sektioner.

Såfremt støjen indeholder kraftig, dyb lyd, kan det være nødvendigt med særlige foranstaltninger, f. eks. opsætning af lavfrekvensabsorbenter.

8.1.2 Placering af lydabsorberende materialer

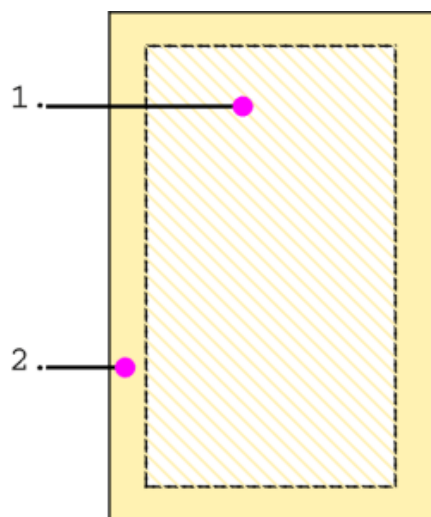
Som lydabsorbenter anvendes i reglen mineraluld eller lignende med åbne porer. Til specielle formål kan det være nødvendigt at anvende andre typer absorbenter, f. eks. membranabsorbenter til lavfrekvent absorption.

Man må være opmærksom på, at lydbafler nedhængt fra loftet giver ringe lydabsorption ved lave frekvenser. Det samme gælder for absorbenter, der monteres direkte mod loft eller vægge. Et sammenhængende, nedhængt loft eller absorbenter, der anbringes foran en væg, giver god lavfrekvensabsorption.

Ved valg af materialer skal man være opmærksom på, at der kan være funktionskrav ud over de rent lydæssige, f. eks. krav vedrørende hygiejne, holdbarhed, drøys, indeklime, brandfare m.v.

Lydabsorbenternes placering har stor betydning for, hvordan lyden dæmpes og breder sig. Normalt er loftet den vigtigste flade at dæmpe, idet lydrefleksion herfra kan brede sig til hele rummet, men man kan også installere lydabsorbenter på dele af væggene.

Man kan med fordel supplere med særligt gode absorbenter i hjørner, idet man her kan dæmpe lyden, hvor den naturligt er stærkest på grund af den randeffekt, som opstår, når to reflekterende flader møder hinanden i et hjørne. Disse hjørneabsorbenter er således meget effektive til at dæmpe lyden.



1. Absorbenterne i loftet bestemmer rummets efterklangstid, eftersom loftfladen normalt udgør den største reflekterende flade i rummet.
2. Lydabsorbenter i den såkaldte frise langs væggene har ekstra stor betydning, når man ønsker at sænke efterklangstiden og fjerne uønskede lydreflekser.

Figur 8.1 Placering af loft- og hjørneabsorbenter

8.1.3 Akustikdæmpning i rum med delvist frilaggt etagedæk

Ved cellekontorer til 1-2 personer med et volumen mindre end 75 m^3 er der normalt ingen krav, og tilstrækkeligt akustikdæpende materiale kan normalt placeres på vægflader.

Ved lidt større rum kan der suppleres med hjørneabsorbenter eventuelt udformet som absorbentbafler på tværs af rummet. Den porøse absorbent bør placeres mindst 20-30 cm fra en hård (væg)flade.

Ved større rum over op til 300 m³ anbefales normalt, at 70% af loftet er dækket af akustikdæpende lofter. Ved storrumskontorer anbefales normalt over 80%.

Hvis loftet ikke kan dækkes i helt dette omfang, kan der suppleres med skærm- og skillevægge med akustiskdæpende materiale. Hvis de er beklædt med beskyttende plade, bør denne helst have 20-25% hulareal. Dybe frekvenser dæmpes bedst med nedhængte akustiklofter/skærmvægge eller flader placeret nær vægge bagvedliggende hulrum. Det er en fordel, hvis skillevægge nogle steder føres til loft, så de afskærmer for direkte lyd og refleksioner fra loft. Øverste del af disse vægge kan f.eks. udføres i glas og kan på denne måde visuelt være med til at bevare det store rums karakter, samtidig med at det opdeles lyd-mæssigt i mindre enheder.

Ved storrumskontorer må der suppleres med arealer i form af lyd- eller nedhængte flåder af akustikloft, eller gulvet må tages i brug. Ved brug af lyd- eller nedhængte flåder må der regnes med ca. 50 cm mellemrum. Flåderne fås typisk i 30, 45 og 60 cm's højde og er omkring 50 mm tykke. Længden er typisk 90 eller 120 cm. Benyttes nedhængte flåder, bør de arealmæssigt svare til omkring 50% af loftsarealet, og for større kontorer må der suppleres med hjørneabsorbenter / absorbentbafler i en passende takt. Disse bafler bør starte ved loftsfladen og gå min. 30 cm ned. Loftsplanet mellem flåder kan eventuelt markeres med et åbent rasterloft.

Hvis etageadskillelsen med termoaktive konstruktioner er udført som TT-dæk f.eks. med 30 cm fri ribbehøjde, kan nedhængte lofter ophænges mellem ribber. Dette forudsætter, at køleslangerne også er indstøbt i ribberne. Ydelsen kan øges ved at tilføre ventilationsluft i mellemrummet mellem nedhængt loft og TT-dæk, hvorved varmeovergangen øges.

Hvis der er meget eksternt støj, f. eks. fra trafik, kan det anbefales at etablere en lyd-isolerende facadekonstruktion og beklædning, der f.eks. ved åbning af højt-siddende ventilationsvinduer dæmper lydtransmission/-reflektion ind i rummet, når disse vinduer åbnes.

I Danmark har vi ikke tradition for at benytte tæpper. Disse benyttes dog i stor udstrækning som akustikdæpende flade i udlandet f.eks. i Tyskland. Tæpper kan med fordel lægges i ganglinier, så de dæmper trinlyd.

Man kan dog også dække hele gulvet med tæppe i aftagelige tæppefliser på 1 m x 1 m fastgjort med dobbeltklæbende tape til en edb-gulvopbygning. Dette er f.eks. udført på LO's ny hovedsæde på Islands Brygge (figur 8.2). Opbygninger er her kun 60 mm og giver plads til gulvstikkontakter og føringsveje for el og sprinklerrør for etagen under (installationer der normalt ligger over nedhængt loft). Loftet udgøres af de "rå" betonlofter, som kan udnytte varmeakkumuleringen, og som kan køles om natten ved brug af naturlig ventilation gennem vinduer.



Figur 8.2 Foto af et loft udført med synlige betondæk - LO på Islands brygge

Tæppet er et diffusionsåbent uldtæppe uden bagbeklædning placeret på et edbgulv udført af 2 mm perforeret stålplade, der hviler på en tætsiddende opklodsning. Det kunne også være en anden type plade f. eks. krydsfiner. Hullerne bør ikke være over $\varnothing 5$ mm for at modstå brug af høje hæle.



Figur 8.3 Foto af ganglinie ved facader - LO på Islands brygge

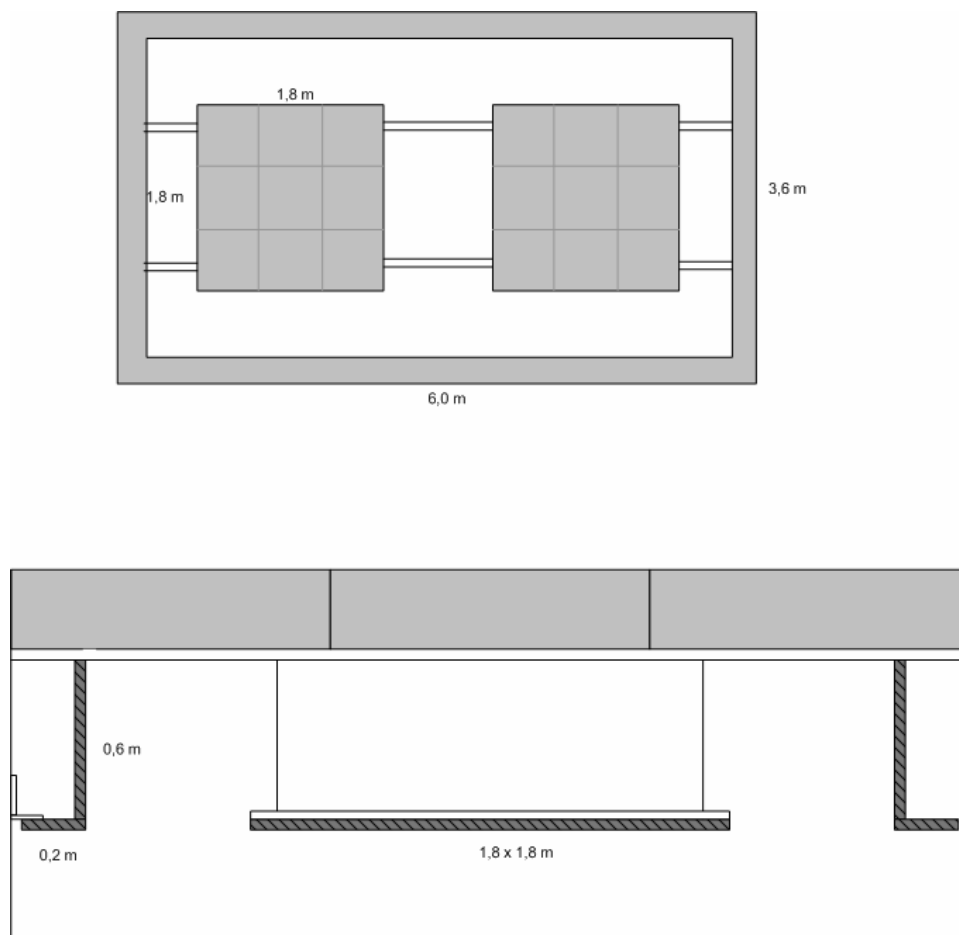
Bemærk, at det supplerende indvendige solafskærmningsgardin også benyttes som akustikregulering.

8.2 Anvendt akustikløsning mock-up

Mock-up'en anvendt til forsøg har et gulvareal på ca. 20 m² og volumen på 75 m³. For at belyse effekten af et nedhængt loft på funktionen af det termoaktive dæk benyttes med baggrund i foregående afsnit en udformning som følger.

- Langs væg etableres en hjørneabsorbent 20 cm fra og dækkende de øverste 60 cm ned af sidevæggene lig ca. 10,5 m².
- Midt i loft ophænges 2 flåder af 1,8 m x 1,8 m lig 6,5 m². Oversiden af de nedhængte flåder vil også i en vis grad virke dæmpende.

Vejledningens krav om et absorptionsareal 0,8 x gulvarealet er således opfyldt, og 50% af loftarealet er stadig frit. Loftet over de nedhængte flåder vil stadig have en termisk effekt, dog noget reduceret afhængig af luftbevægelsen i rummet.



Figur 8.4 Skitser af akustikløsning vandret og lodret snit

På vægge vil der kunne opsættes yderligere dæmpning, hvis det var et ønske eller nødvendigt akustisk set.

Løsningen, som afprøves termisk, er valgt, idet den også kan anvendes i storrumskontorer, hvis det beskrevne "modul" gentages over hele loftsfladen med

bafler placeret i forbindelse med de gennemgående bånd, der indrammer de nedhængte flåder.

Det vil dog være en fordel, hvis det yderligere kombineres med lyddæpende skærm- og skillevægge som tidligere beskrevet.

9 Referencer

[1] CEN (1998): CR 1752, Ventilation for Buildings: Design Criteria for the Indoor Environment. Brussels: CEN.

[2] Weitzmann, P. (2004): Modelling building integrated heating and cooling systems, Ph.D. dissertation, BYG·DTU.

Bilag 1 - Formidlingsaktiviteter

Der er udført en mangestrengt formidling af projektet og de opnåede resultater. Af væsentlige aktiviteter kan følgende nævnes:

- Projektet har indgået og indgår fortsat i undervisningen på DTU og har dannet grundlag for flere eksamensprojekter.
- Projektet har endvidere indgået som væsentligt element i arbejdet for Ph.d. afhandling "Modelling building integrated heating and cooling systems" ved Peter Weitzmann, 2004
- DTU gensynsdag 17. september 2004, poster og fremvisning af mock-up i laboratoriet
- Hjemmeside: WWW.COWI.DK søg på: "Termoaktiv"
- ARKITEKTEN nr. 13, 2004, omtale
- DANSK BETON - Årg. 22, nr. 1 (2005). - S. 11-12
"Termoaktive betonelementer kan halvere energiforbruget til køling og ventilation" af Jan Broch Nielsen, interview med Reto M. Hummelshøj
Emne: betonelementer; indeklima; betonbyggeri; energiforbrug; termoaktive konstruktioner
- HVAC MAGASINET nr. 2, 2005
"Spændende erfaringer med frikøling fra undergrunden og lagring af køleenergi" - S. 47-49 om Termoaktive Konstruktioner
- CONCRETE Magazine Nov/Dec Issue 2005 "CONCRETE AND ENERGY - Thermal active concrete elements" by Reto M. Hummelshøj and Kirstine Hjorth Lorenzen, COWI A/S
- DANVAK Temadag for energirådgivere, 2. november 2004, om Alternative Komfortløsninger, arrangeret af Michael Nielsen, COWI.
- Præsentation for den norske arkitektforening 28. april 2005 i forbindelse med deres besøg til Danmark for at se på miljørigtige løsninger, ca. 40 deltagere.

Bilag 2 - Opbygning af forsøgsopstilling

Vedlagt Appendix 1 til Ph.D. afhandling "Modelling building integrated heating and cooling systems" som er udført af Peter Weitzmann med tilknytning til nærværende PSO-ELFOR projekt.

Description of test facility

This appendix describes the test facility and the equipment used to ensure the functionality.

1 Design of test facility

This section will only include drawings to understand the main geometry of the test facility.

The main design of the test facility is a construction consisting of two levels of thermo active components in between which an office room in a building is placed. The room is closed to the four sides by insulating walls. The room is surrounded by a guard box, which separates the room and thermo active component from the rest of the laboratory.

The room has a length of 6.0m and a width of 3.6m, for a total room area of 21.6m², equivalent to a fairly large single person office or a “typical” two-person office. The internal room height is 3.6m. The decks are 6.6m in length, so that they are long enough to be supported by the load bearing construction decks (described below). The lower deck is raised about 0.5m from the floor in the laboratory. The upper deck is about 4.4m above the laboratory floor.

The total size of the test facility is 7.6m long, 4.6m wide and 5.4m high.

The thermo active decks are pre-fabricated hollow core concrete decks integrated pipes with a height of 270mm, with the 20mm pipe placed 50mm above the ceiling surface of the deck.

The ends and sides of the decks have been insulated to minimize unwanted heat losses from the deck to the guard.

The temperature in the guard zone will in all cases be controlled to be the same as in the room, to ensure that there will be no heat transfer across the room walls. The air gap in the guard zone will also allow realistic thermal conditions for the deck surfaces facing the guard. However, the radiation is not going to be completely realistic due to small vertical distance between deck surface and guard surface.

The decks are supported by a load bearing construction placed in the air gap in the guard, designed as four steel columns with beams for supporting the deck-elements. To ensure that the supporting beams will have a minimal influence on the temperature distribution in the deck, a 100mm x 100mm wooden beam is placed on top of the steel beam as a thermal break.

Approximately 50 thermocouples and thermopiles are measuring the temperatures throughout the construction. The data logger has a possibility to log a maximum of 60 thermocouples and thermopiles

The flow in the decks is controlled by two flow units capable of delivering water at a given temperature and flow. The flow units can be turned on or off at a given time schedule to give dynamical conditions for the flow.

Internally in the room, four radiators with a total power output of 1.9kW are installed as heat load. The maximum heat load in the room is therefore 88W/m². The internal heat load is controlled by a power controller which is fed by a continuous 0-10V signal. Therefore for instance, a 5V signal means that the radiators are turned on 50% of the time, resulting in a heat load of 44W/m². The heat load can be controlled, in principle, infinitely variably.

The temperature in the guard is controlled by the same type of control.

In the room, there is no ventilation in the present state of the test facility. The inner walls and joints between walls and decks have been carefully assembled to avoid leaks.

Figure 1 shows the main dimensions of the test facility seen from the side and horizontally.

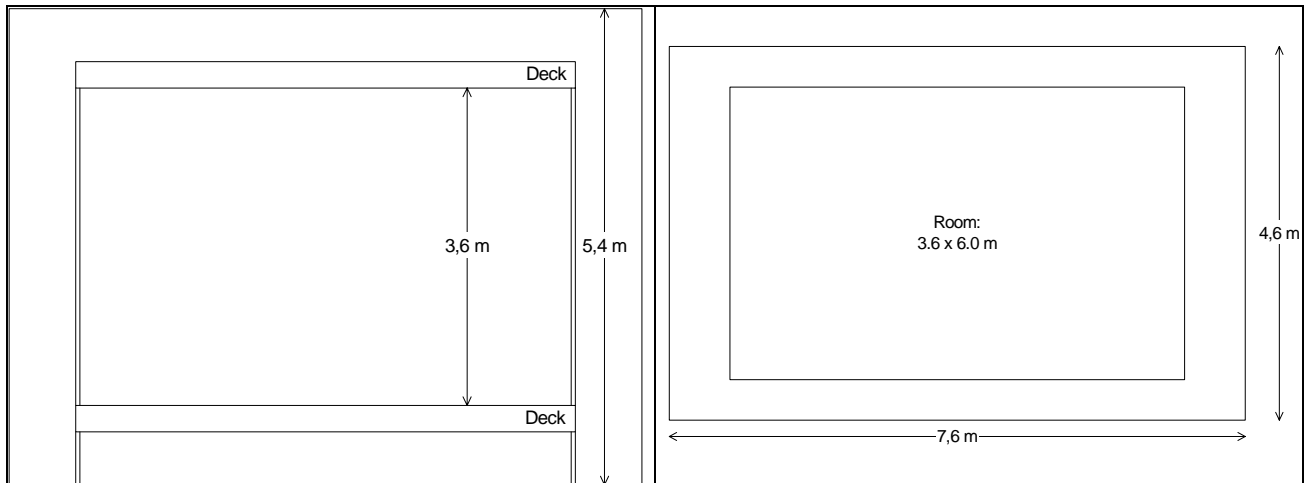


Figure 1 Vertical and horizontal dimensions of test facility

1.1 Schematic description of test facility and measurement equipment

Figure 2 shows a schematic drawing of the test facility.

The figure shows the connections between the test facility itself and the flow units and measurement and control units. In the figure four different types of connections are shown:

- The dense solid blue line shows pipes with fluid between decks, fans and flow units.
- The thin solid black line shows electrical cabling – here only the part which is required for the radiators and not all other electricity using equipment such as the PC and flow units.
- The dash-dotted brown line indicates measurement signals from flow units, energy meter and from the test facility. The last one is only indicated, as several positions are used throughout the facility.
- The dashed pink line shows the control signals used by the test setup to ensure the correct control of the conditions in the facility.

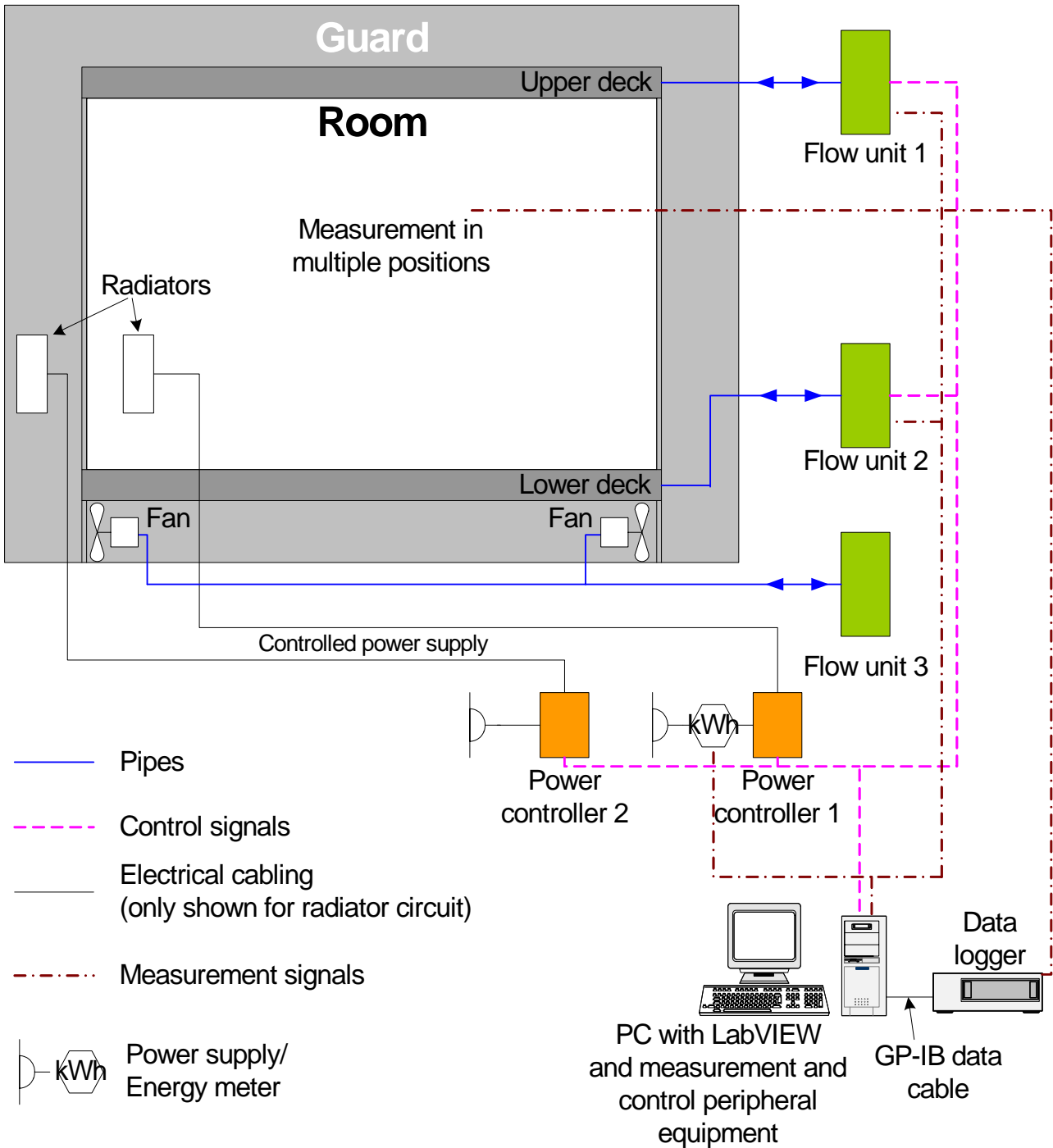


Figure 2 Schematic drawing of the test setup

2 Measurements series

Two types of control algorithms have been developed for the test setup.

1. Constant measurement series with variable internal heat load. The purpose is to find the cooling capacity of the decks.

2. Variable flow and internal heat load. The flow can be turned on and off during a 24h cycle. The internal heat load can be set to high and low during a 24h cycle. The purpose is to find the dynamic properties of the thermo active decks for different combinations of flow and heat load.

3 Measurement positions

This chapter describes the measurements and measurement positions in the test facility.

☞ Alternative measurement positions can be used by moving existing thermocouples or by installing new cabling. If permanent changes are made to the measurement positions, make sure to update this manual.

3.1 Deck

Figure 3 shows the temperature positions in the upper deck.

Three sections are used, with a different number of measurements in each section. The positions of the sections are shown on the horizontal view. Section 1 is the most detailed, where temperatures are measured in different positions of the deck and on the upper and lower surface of the deck.

Generally in the test setup **thermopiles with three elements** are used to find temperature differences as the signal is increased proportionally to the number of elements. The only exception is for the temperature difference between supply and return, where five thermopiles are used.

For the lower deck, only one temperature on the lower surface is measured. Otherwise the same positions are installed.

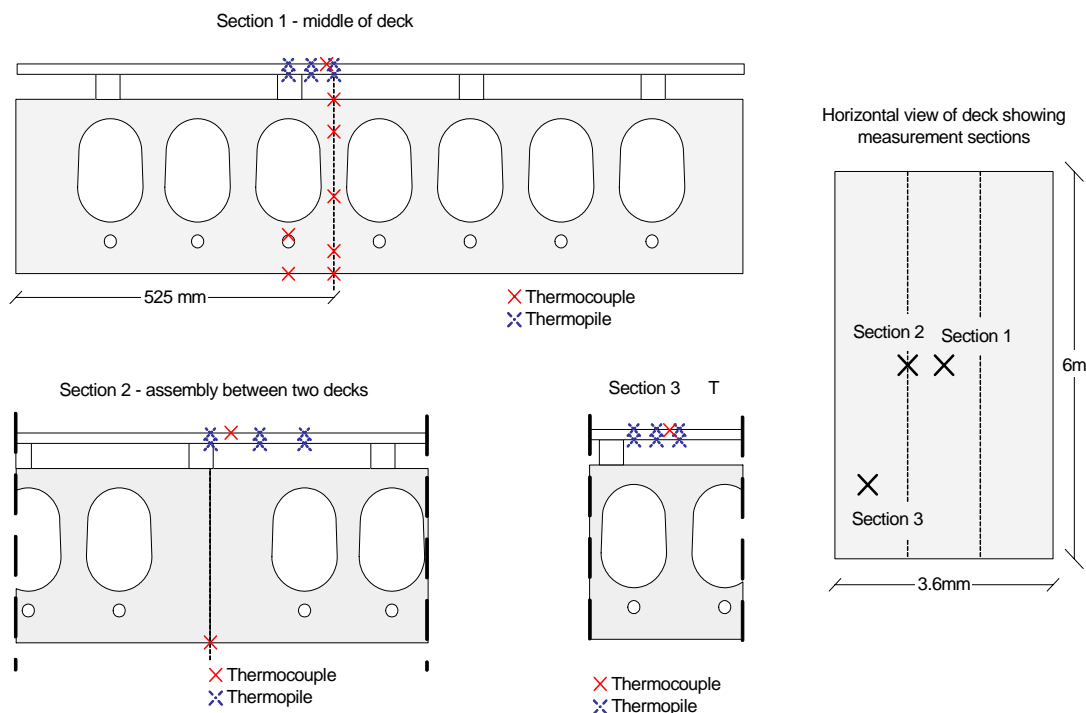


Figure 3 Measurement positions in decks. Here shown for the upper deck – the lower deck only has one measurement position on the ceiling surface

3.2 Room

Figure 4 shows the measurement positions in the room. The left figure shows the surface temperatures on the internal room surfaces. The floor and ceiling surface temperatures are measured in the middle of the surface. On one of the 6m long walls, the surface temperatures are measured at heights of 0.5m, 1.5m, 2.5m and 3.5m.

☞ Initially, a test has shown that measuring the temperature in the middle of each of the surfaces gave almost identical surface temperatures, which means that there is no need to measure all four.

The right figure shows the air temperature measurements, which are measured at 0.1m, 0.7m, 1.1m, 1.8m and 3.5m (0.1m from the ceiling surface).

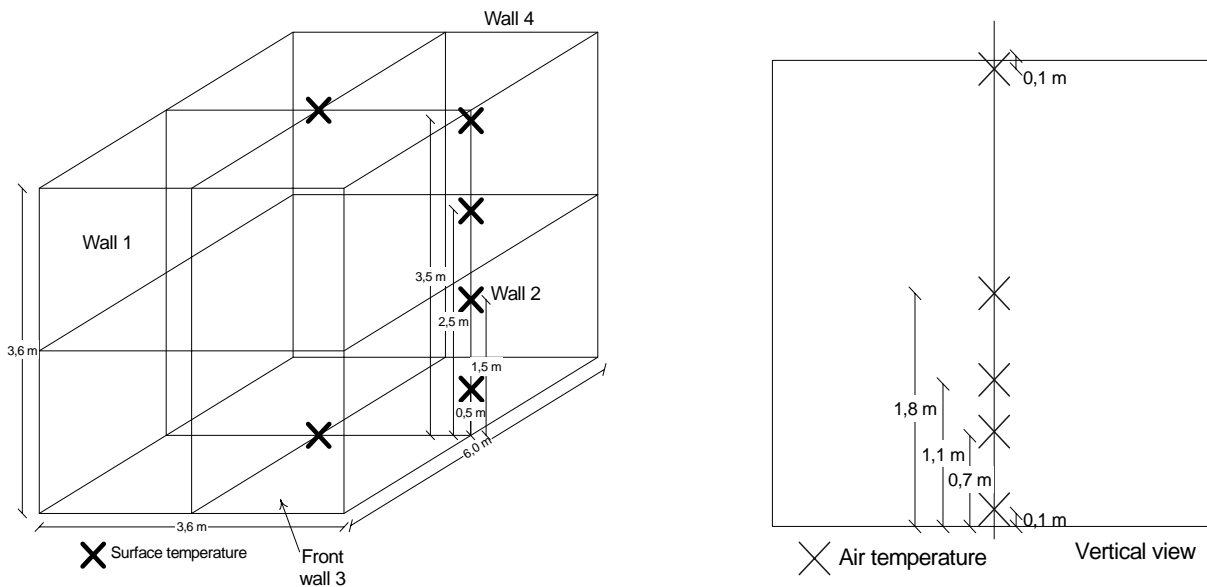


Figure 4 Measurement positions internally in the room

3.3 Unwanted heat flows and guard

Figure 5 shows the control measurements of the temperatures and temperature differences characterising the conditions between room and guard to be able to account for the unwanted heat flows between deck and guard and room and guard.

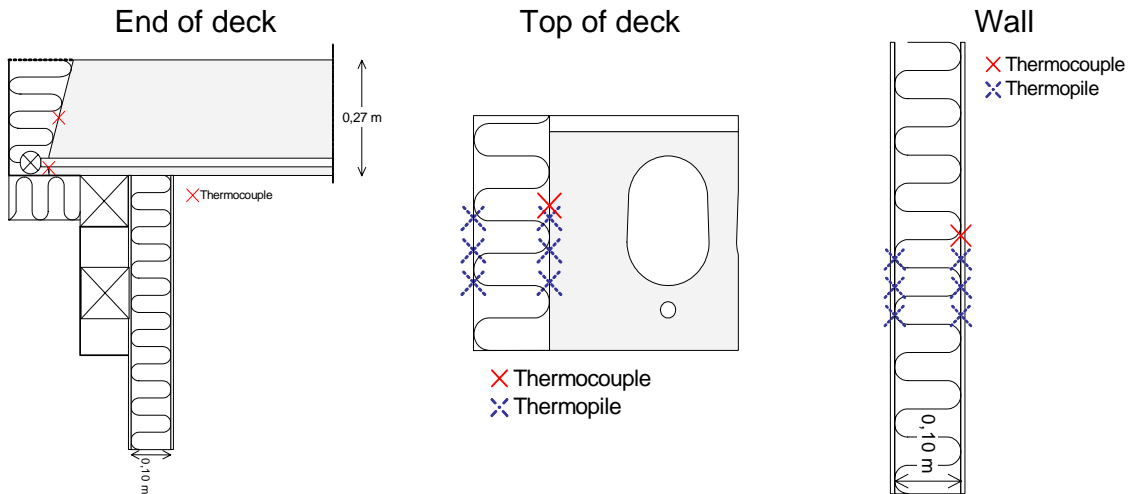


Figure 5 Measurement positions between deck/room and guard

In the guard zone, six temperatures are measured; one placed centrally outside each of the six room surfaces.

3.4 Fluid flow

Figure 6 shows the measurements used for the flow and temperatures in each of the two decks. The flow is measured in the flow unit while the supply temperature is measured directly at the inlet to the distribution manifold to each of the decks.

The temperature difference is measured by a thermopile using five serial thermocouples placed in the inlet and outlet from the manifolds.

The same positions of the measurements are used for both decks to account for the fluid flow.

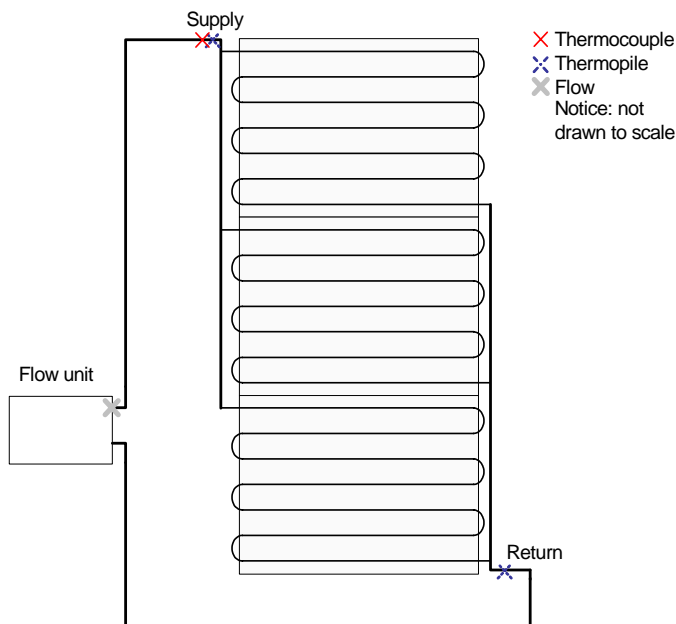


Figure 6 Measurement positions of flow and temperature for the upper and lower decks

4 Accuracy assessment

4.1 Measurement equipment

The temperatures in the mock-up are measured by the use of thermocouples for absolute temperatures and thermopiles for temperature differences. Type TT thermocouples (copper/constantan) are used. Type TT has an increased accuracy compared to type T. An Agilent 34970A data acquisition/Switch unit equipped with 60 voltage and 6 current measurement slots connected to a PC is used for the measurements.

The temperatures are calculated internally in the instrument by using ITS-90 software compensation.

The accuracy of the temperature measurements can be found from the following relation:

$$Accuracy = \pm(\% \text{ of reading} + \% \text{ of range}) \quad (9.1)$$

This accuracy is very good for the measurement of voltage and conversion of voltage to temperature to temperatures. However, the accuracy of the thermocouple itself is not as good. An accuracy of 1K is given in the data sheet for the data logger, plus the accuracy from the thermocouples themselves, which are expected to be 0.3% of the reading. This is typical for thermocouple measurements. A very large part of this is due to the fact that a common reference point in the data logger is used. Since the temperature across this data logger board can be up to 1K, this sets the limit to the accuracy.

For the voltage differential measurements (thermopiles), which do not use the reference point in the data logger, the coefficients in Eq. (6.1) for the measurement accuracy are 0.0050+0.0040. Notice that for the thermopiles, three or five elements in the pile are used to increase the measurement signal. This increases the accuracy of these measurements.

The flow is measured using a "Danfoss MASS 1100, DN10" which can measure up to 4.400 kg/h. The output from the unit is a 0-20mA signal, where the maximum rate which will give 20mA can be set on the unit. An accuracy of 0.5% is given on the output of the signal. The accuracy of the reading in the data logger, the coefficients are 0.050+0.005.

The accuracy of the heat flow in the decks is a combination of the flow measurement and temperature difference measured by the thermopile placed in the supply and return of the decks (see Figure 6 for position of the supply side of the thermopile). In a previous investigation (Weitzmann and Jensen, 2000), the error of this has been shown to be less than 2% of the actual heat flow.

4.2 Unwanted heat flows

Besides from the accuracy of the measurement equipment, which has been described above, another source limiting the accuracy of the measurements are the unwanted heat flows in the mock-up.

The following heat flows are considered:

- One-dimensional heat flow through walls between room and guard
- Two-dimensional heat flow through the ends of the decks
- Two-dimensional heat flow through the sides of the decks
- Three-dimensional heat flow through corners
- Infiltration/exfiltration between guard and room

These are treated individually in the following sections. Finally, a section is dedicated to other types of unwanted heat flows in the construction.

The investigation of the unwanted heat flows in this section does not cover the unwanted but required heat flow from the deck surface which is facing the guard. This heat flow is required to give realistic conditions for the temperatures and heat flows in the decks. Therefore the upper deck is not insulated to minimize to unwanted heat loss, since this will cause an unrealistic temperature distribution in the deck, which is not desired, especially with respect to the dynamical measurement series. At the same time, the heat flow through the floor surface of the upper deck is measured based on measurements of the temperature difference across the floor covering, shown in Figure 3.

4.2.1 One-dimensional heat flow through walls between room and guard

The one-dimensional heat flow through the walls can be estimated by the measured temperature difference across the insulation layer in the wall construction, since the thermal transmittance is well-defined for the wall. The thermal transmittance is calculated to be $0.38\text{W/m}^2\text{K}$. The area of the inner wall is 69m^2 . Therefore an unwanted heat flow of 26W/K can be expected between room and guard.

Since the temperature difference between room and guard is typically less than 1K , a maximum unwanted heat flow of 25W can be expected.

4.2.2 Two-dimensional heat flow through the ends of the decks

The deck end is extended approximately 30cm into the guard zone in each end of the deck. Figure 7 shows the end of the deck with the insulation box and manifold. To find the unwanted heat loss from the deck to the guard, the heat flow from the deck to the insulation box and wall below the deck is found. The two-dimensional section assumes that the temperature at the pipe level is the same in the entire deck, and that there are no air cavities. Different combinations of room/guard and pipe temperature are tested. However, for all combinations the same value is found; 0.4W/mK . The temperature difference refers to the difference between the fluid temperature in the pipe and the guard temperature. For the 7.2m of deck end, a maximum unwanted heat loss of 2.9W/K can be expected.

Since this difference will typically not be larger than 10K , a maximum of approximately 30W for one deck can be expected.

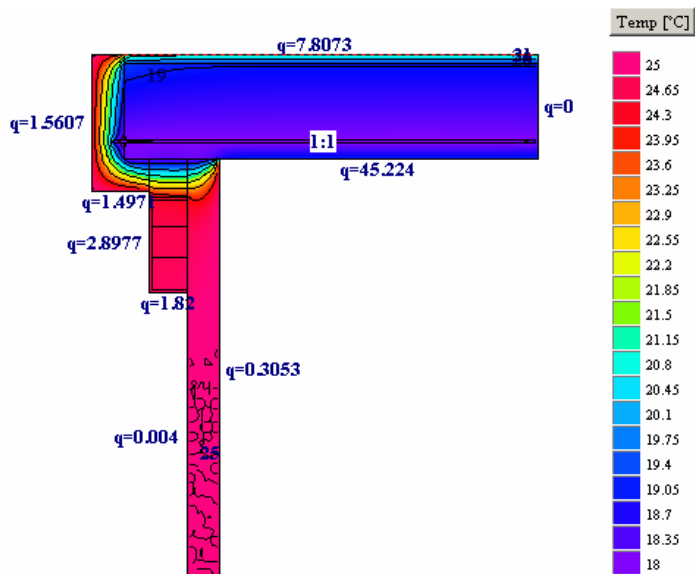


Figure 7 Heat2 simulation of temperatures in the end of the deck. Heat flows shown in W/m² surface.

4.2.3 Two-dimensional heat flow through the sides of the decks

The unwanted heat loss along the side of the deck is found in similar way as above. Figure 8 shows a calculation using 18°C pipe temperature, 25°C room temperature and 27°C guard temperature. This results in an unwanted heat loss of 0.6W/m of joint, which will result in an unwanted heat loss of 7W for the 12m of thermal bridge. Again different combinations of fluid and room/guard temperature have been tested. In this case the linear thermal transmittance value loss is not the same for all combinations of temperatures. However the value of 0.6W/m was found to be the highest for any of the combinations. A maximum unwanted heat loss of 10W for each of the decks is therefore assumed.

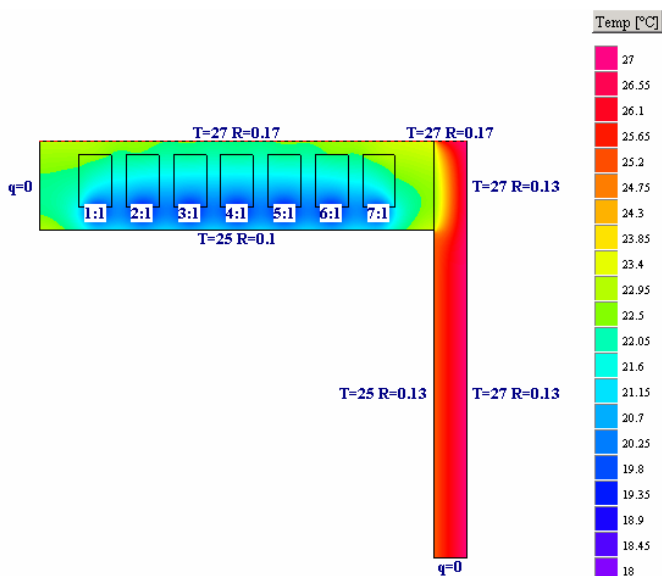


Figure 8 Heat2 simulation of temperatures along the rim of the deck. Here shown for the upper deck

4.2.4 Three-dimensional heat flow through corners

The heat flows through the corners also been estimated using a Heat3 simulation. However, in this case it is not possible to use given temperatures as inputs for the pipes. Instead it is necessary to use a heat flow rate, which means that the estimates can not be defined in the same way as when using temperatures.

However, a maximum unwanted heat loss of around 1W for each corner is found. For practical purposes, this heat flow can be omitted from the investigations.

4.2.5 Infiltration/exfiltration

The air change rate between room and guard due to infiltration/exfiltration has not been measured. However, even for an air change rate of 5l/s, which is assumed to be very high the unwanted heat loss is 6W/K equal to 6W if the temperature difference is 1K between room and guard.

4.2.6 Other sources of unwanted heat flows

A source of unwanted heat loss from the room to the guard is the fact that the radiators are placed on the walls, which means that the walls are heated. The unwanted heat loss from this is not assessed here.

4.2.7 Summing up on unwanted heat flows between deck/room and guard

In this section the unwanted heat losses between deck and guard and room and guard have been investigated. For each an estimated maximum value of the unwanted heat loss has been given based on a worst-case situation. This is shown in Table 1.

Table 1 Maximum values for the unwanted heat flows

Heat flow	Maximum value
Through walls	50W
Deck ends	30W/deck
Deck sides	10W/deck
Corners	1W/corner
Air change	12W

An assessment of the maximum unwanted heat loss from the deck to the guard has shown that the maximum value is found to be 40W (30W from the ends and 10W from the sides). This is based on a guard temperature which is higher than the room air temperature, which is not the case for the measurements where the guard temperature is typically 1K-2K lower. A correction of 40W is equivalent to 2W/m² floor surface, since the room is 21.6m². As the cooling capacity of the deck in the measurements is between 30W/m² and 60W/m² an error of 3%-7% is the maximum expected value. However as this value is based on maximum expected values, the unwanted heat loss will be lower than given here.

5 Processing measurement data

This description is only an example on how measurement data can be processed. It is by no means comprehensive and it does not represent 'the truth' on how to execute the data analysis.

The purpose of the data analysis is to find the main heat flows in the construction and the cooling capacity from the deck to the room. This section sets up equations for calculating the heat flows in the upper deck and the entire room. Further, the measurement data are used to validate TASim, which is not described in this section.

5.1 Energy balance and heat flows in upper deck

The main object for measurements in the mock-up is to find the heat flows in the upper deck. In this analysis, the deck is considered the object of the measurements while the rest of the mock-up is actually only a means of creating the proper boundary conditions for the deck. The upper deck is used for the investigation. This means that the main heat flow, q_{up} , will consequently be through the ceiling surface of the room.

Figure 9 shows the deck with the main heat flows, where q_{pipe} is the heat flow in the pipe, q_{up} is the heat flow through the ceiling surface, q_{down} is the heat flow through the floor surface and q_{guard} is the heat flow between the ends and sides of the deck.

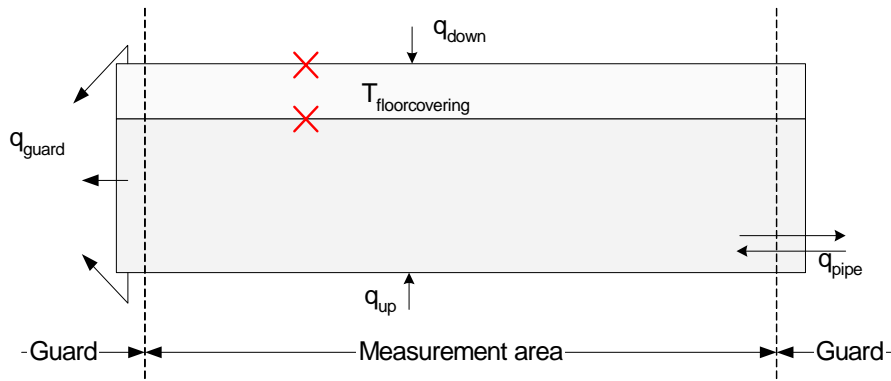


Figure 9 Heat flows in upper deck

Eq (7.1) is the main energy balance for the deck assuming steady-state conditions.

$$q_{pipe} = q_{up} + q_{down} + q_{guard} \quad (9.2)$$

The individual heat flows can be found as described below.

The heat flow between pipe and concrete deck, q_{pipe} , is given by the basic relationship between flow and temperature difference between supply and return temperature.

$$q_{pipe} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{supply} - T_{return}) \quad (9.3)$$

The heat flux through the floor surface, q_{down} , is found from:

$$q_{down} = \frac{1}{R_{floorcovering}} \cdot \Delta T_{floorcovering} \quad (9.4)$$

The thermopile is placed directly across the plywood layer in the floor construction. The thermal resistance of the floor covering is therefore the resistance of the plywood plate. The thermal resistance of the plywood plate is well-defined, which means that the measurement of the heat flow based on this thermal resistance will also be well-defined.

The unwanted heat loss from the ends and sides of the deck to the guard, q_{guard} , can be estimated based on simulations using the actual measurement conditions as input. In general, the heat loss is a function of geometry and temperatures in room, guard and deck (based on the fluid temperature in the pipe).

$$q_{guard} = f(\text{geometry}, T_{room}, T_{guard}, T_{fluid}) \quad (9.5)$$

Based on Eq. (7.1) to Eq. (7.4) it is possible to find, q_{up} , which expresses the cooling capacity of the ceiling surface.

This set of equations is equally applicable to both decks, though the upper deck is the most interesting when the decks are used for cooling the room. Notice that the heat flow through the ceiling surface of the lower deck will not be realistic compared to the upper deck due to the proximity of the floor in the laboratory – especially for radiation.

5.2 Heat flows in the room

The heat flows in the room are generally more difficult to measure than in the deck alone. Therefore, the measurement accuracy is expected to be poorer than for the deck alone.

Figure 10 shows the heat flows in the room

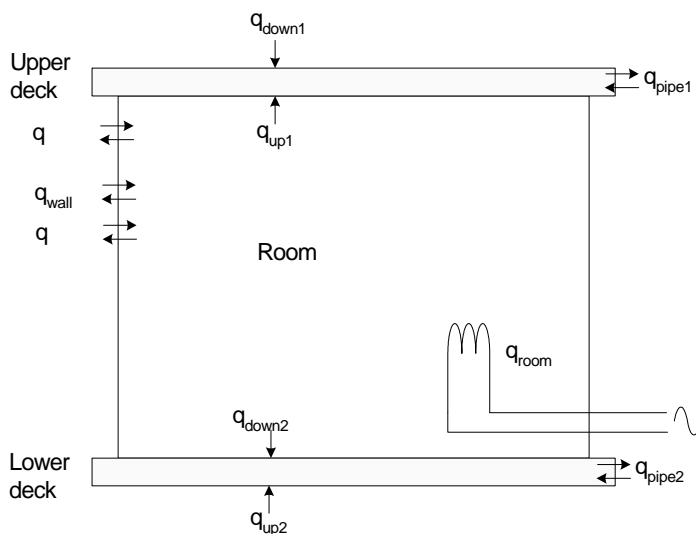


Figure 10 Heat flows in room

Again, an energy balance equation can be set up for the conditions – in this case for the room:

$$q_{room} = q_{up1} + q_{down2} + q_{wall} + q_{\psi} + q_{\chi} \quad (9.6)$$

Where:

- q_{room} Heat load in the room
- q_{up1} Heat flow from room to the upper deck through the ceiling surface
- q_{down2} Heat flow from room to the lower deck through the floor surface
- q_{wall} Unwanted one-dimensional heat flow from room to guard

q_{ψ} Unwanted two-dimensional heat flow from room to guard

q_{χ} Unwanted three-dimensional heat flow from room to guard

The heat flows through the wall, q_{wall} , is a function of the temperature in the wall and guard and the thermal transmittance of the wall.

$$q_{wall} = f(T_{room}, T_{guard}, U_{wall}) \quad (9.7)$$

The heat flows through the assemblies and corners, q_{ψ} and q_{χ} , are as the wall heat transfer a function of the temperature difference between room and guard. The line and point heat transfers can be calculated in for instance Heat2 and/or Heat3, which are used to predict the unwanted heat loss, shown in Eq. (7.7) and (7.8).

$$q_{\psi} = f(geometry, T_{room}, T_{guard}, T_{fluid}) \quad (9.8)$$

$$q_{\chi} = f(geometry, T_{room}, T_{guard}, T_{fluid}) \quad (9.9)$$

Notice, that the temperature is also included in the equations, even though they are not directly a part of the heat transfer between the room and guard. However, the temperature in the decks will have an influence on the line and point losses from the room to the guard.

The left side of Eq. (7.5) can be found by measuring the heat loads in the room, which comes from the electrical heaters in the room as defined in section 3.1

$$q_{room} = f(heat\ loads) \quad (9.10)$$

5.3 Cooling capacity

The cooling capacity of the ceiling surface of the upper deck can found based on Eq. (9.2) to Eq. (9.5), using steady-state measurements. In this section the method is applied to the measurement conditions and further, the cooling capacity coefficient is defined.

In brief the method is to find the heat flow through the ceiling surface and divide the heat flow by the temperature difference between the fluid and the room.

The heat flow through the ceiling surface, q_{up} , is found from Eq. (9.11)

$$q_{up} = q_{pipe} - q_{down} - q_{guard} \quad (9.11)$$

That is, the heat flow through the ceiling surface is the heat flow in the pipe minus the unwanted heat flows to the guard through the sides and ends of the deck and to the guard through the floor covering.

The heat flow from the fluid is found from Eq. (9.3) while the heat flow through the floor covering is found from Eq. (9.4).

Therefore, the cooling capacity coefficient, $U_{cc,ceiling}$, can be found from the following relationship:

$$U_{cc,ceiling} = \frac{q_{up}}{A_{deck} \cdot \Delta T} = \frac{q_{up}}{A_{deck} \cdot (T_{room} - T_{fluid})} \quad (9.12)$$

Here the fluid temperature, T_{fluid} , is defined as the average value of the supply and return temperature, or:

$$T_{fluid} = \frac{1}{2} \cdot (T_{supply} - T_{return}) = T_{supply} + \frac{1}{2} \cdot \Delta T_{supply-return} \quad (9.13)$$

The room temperature is more difficult to define, as this depends on both position in the room and the fact that the air and surface temperatures are different. An approach, which is used for guarded hot box measurements for finding the thermal properties of windows using ISO 12567-1 (ISO, 2000), is to calculate the environmental temperature, which is the average of the air and radiant temperatures weighed by the surface heat transfer coefficients for convection and radiation respectively.

$$T_{room} = \frac{h_{conv} \cdot T_{air} + h_{rad} \cdot T_{rad}}{h_{conv} + h_{rad}} \quad (9.14)$$

The radiant temperature, T_{rad} , is found as the average temperature of measured surface temperatures on the inner walls and floor surface and the air temperature, T_{air} , is found as the average of the measured temperature in 0.7m and 1.1m height. Notice, that the room air temperature is stratified in the room, such that the air temperature is higher in the top of the room than in the bottom.

The radiative heat transfer between two surfaces is given by the following relationship taking the view factors and emissivity of the surfaces into account. (Mills, 1992).

$$q_{12} = \sigma \cdot F_{1,2} \cdot (\varepsilon_1 \cdot T_1^4 - \varepsilon_2 \cdot T_2^4), \quad 0 \leq F \leq 1 \quad (9.15)$$

By assuming that all surfaces (except for the ceiling) have the same temperature, and all surfaces have the same emissivity as well as linearizing the temperature difference, Eq. (9.15) can be simplified to:

$$\begin{aligned} q_{12} &= \sigma \cdot \varepsilon \cdot (4 \cdot T_m^3) \cdot (T_{room} - T_{ceiling}) \\ &= h_{rad} \cdot (T_{room} - T_{ceiling}) \end{aligned} \quad (9.16)$$

Here T_m is the average value of all surfaces in the room. In all cases the radiant heat transfer coefficient will be around 5.5m²K/W.

The convective heat transfer coefficient depends greatly on the actual temperature conditions and is difficult to accurately calculate. Therefore, the convective heat transfer coefficient will be based on the actual measurement data, where it is assumed that that the actual measured heat flow between

the cooled surface(s) and the room, q_{up} , is equal to the sum of the convective and radiative part of the heat transfer:

$$q_{up} = h_{co} \cdot (T_{air} - T_{sur}) + h_{rad} \cdot (T_{rad} - T_{sur}) \quad (9.17)$$

Eq. (9.17) has only one unknown, namely the convective heat transfer coefficient. Using Eq. (9.14) through Eq. (9.17) therefore yields the environmental temperature, T_{room} .

Based on this, the cooling capacity of the ceiling surface of the deck can be calculated.

The influence from the floor surface on the cooling capacity from the lower deck can be included by making a similar calculation to Eq. (1) thereby finding the cooling capacity coefficient for the floor, where instead the heat flow through the floor covering, q_{down} is used.

$$U_{cc, floor} = \frac{q_{down}}{A_{deck} \cdot \Delta T} = \frac{q_{down}}{A_{deck} \cdot (T_{room} - T_{fluid})} \quad (9.18)$$

Again the same calculations can be used for finding the heat flow and temperature difference.

Therefore a combined cooling capacity coefficient for the ceiling surface of the upper deck and the floor surface of the lower deck can be found by the following relationship, summing the two cooling capacity coefficients to give a combined cooling capacity coefficient of the decks towards the room.

$$U_{cc, room} = U_{cc, floor} + U_{cc, ceiling} \quad (9.19)$$

To check the results from the calculation of the cooling capacity of ceiling and floor surface, an alternative calculation can be made where the room heat load is used in stead of the fluid heat flow in the decks.

$$U_{cc, room} = \frac{q_{internal}}{A_{floor} \cdot (T_{room} - T_{fluid})} \quad (9.20)$$

Where,

$$q_{internal} = q_{room} - q_{wall} - q_{inf/exf} \quad (9.21)$$

That is, the cooling capacity of the deck is equal to the heat load in the room minus the unwanted heat losses through wall and from infiltration/exfiltration. Both of these unwanted heat losses are kept small. The same method for finding the room temperature as described in Eq. (9.14) can be reused.

Bilag 3 - Akustik lovmæssige krav

Lovmæssige krav

I medfør af Arbejds miljøloven, § 43, kan Arbejdsministeren fastsætte regler om arbejdsstedets indretning, herunder om indretning af betydning for akustiske forhold. I forhold til pågældende projekt og design af akustikløsning henvises særligt til reglerne i bekendtgørelse nr. 801 af 4. oktober 1993 om støjgrænser på arbejdspladsen, bekendtgørelse nr. 1163 af 16. december 1992 om faste arbejdssteders indretning og bekendtgørelse nr. 867 af 13. oktober 1994 om arbejdets udførelse.

Jævnfør disse regler, skal de akustiske forhold være tilfredsstillende, hvilket også har været udgangspunktet for udvikling af løsningen for forsøgsopstillingen.

AT-anvisninger

AT anvisning no.1.1.0.1. nov. 1995 oplyser om, hvorledes akustiske forhold i et arbejdsrum vurderes, og hvilke forhold Arbejdstilsynet lægger vægt på, når det vurderes, om de akustiske forhold er tilfredsstillende. Som en generel vejledning er anført de efterklangstider og de absorptionsarealer, som Arbejdstilsynet vil opfatte som tilfredsstillende for de respektive lokaletyper, når i øvrigt normale forhold gør sig gældende. Desuden oplyses om foranstaltninger, der kan træffes til forbedring af akustikken.

Akustik

I et arbejdsrum vil det normalt være en fordel, at rummets overflader dæmper (absorberer) støj mest muligt. Herved undgås, at støjen reflekteres tilbage i rummet. En undtagelse herfra er dog undervisningsrum o.l., hvor en alt for kraftig dæmpning gør det svært at "tale rummet op".

Hvis lydrefleksionerne i et arbejdsrum ikke dæmpes tilstrækkeligt, medfører det en række ugunstige virkninger, akustikken bliver dårlig. Først og fremmest vil det generelle støjniveau stige, og støjen fra en given støjkilde vil påvirke personer, der opholder sig i lokalet, selv i stor afstand af støjkilden. Herudover vil nytten af støjafskærmende foranstaltninger nedsættes. Rummet vil føles ubehageligt at opholde sig i, og det vil f.eks. være vanskeligere at opfatte lyd-signaler som samtale på nogen afstand.

Om de akustiske forhold i et rum er tilfredsstillende, vil ofte kunne afgøres ved en vurdering på stedet. I tvivlstilfælde vil det være nødvendigt at foretage en måling eller beregning.

Efterklangstid

Et rums akustik beskrives normalt ved dets efterklangstid. Efterklangstiden er udtryk for, hvor hurtigt en lyd vil "dø ud" i rummet. Det angives med det antal sekunder, der forløber, før et lydtrykniveau er faldet 60 dB (decibel).

Ækvivalent absorptionsareal

Det ækvivalente absorptionsareal er et udtryk for rummets samlede lydabsorptionsmængde. Det findes ved at gange de lydabsorberende fladers areal med deres absorptionskoefficient og derefter sammenlægge resultaterne for samtlige flader. Absorptionskoefficienten udtrykker, hvor stor en del af den indfaldende lydenergi, som fladen absorberer. Oplysning om et lydabsorberende materiales absorptionskoefficient kan gives af leverandører og forhandlere.

Fastlæggelsen af mindre rums ækvivalente absorptionsareal kan foretages ud fra en efterklangsmåling. I så fald anvendes en omregningsformel (ofte Sabines formel) til beregningen:

$$t \text{ (sek)} = 0,16 V / \text{Sum (alfa} \times A), \text{ hvor}$$

t = efterklangstid i sekunder i et valgt frekvensområde
V = rummets volumen i m³
alfa = lysabsorptionskoefficienten for rummets flader
A = arealet af den respektive rumflade

For større rum giver Sabines formel ikke altid valide beregningsresultater, idet forudsætningen om diffust lydfelt ofte ikke kan opfyldes. For rum over 1000 m³ anbefales det derfor at beregne det ækvivalente absorptionsareal ud fra rumoverfladernes absorptionskoefficienter, eller anvende andre måle/beregningsenheder, der ikke bygger på Sabines formel.

Bygningsmyndigheder og Arbejdstilsynets krav

Arbejdstilsynet vurderer de akustiske forhold i arbejdsrum efter de retningslinier, der er angivet nedenfor. Efter retningslinierne vil vurderingen bero på typen af arbejdsrum, og efterklangstiden eller det ækvivalente absorptionsareal bestemmes for rummet som det benyttes, med inventar, maskiner, udstyr m.v.

Retningslinierne er baseret på dels bygningsreglementets grænseværdier og værdier i øvrigt, der er angivet i skemaet.

Retningsliniernes værdier er minimumsværdier, således at en dæmpning ud over det anførte normalt vil forbedre forholdene yderligere.

Tabel 1 Vejledende gennemsnitsværdier af efterklangstider og ækvivalente absorptionsarealer for heloktaver i frekvensområdet 125-2000 Hz.

Lokaletype	Efterklangs-tid i sek. Maksimal gennemsnits-værdi i frekvens-området 125-2000 Hz	Ækvivalent absorptions-areal A, mindste gennemsnits-værdi i frekvens-området 125- 2000 Hz	Maksimal afvigelse fra den anbefalede værdi i noget frekvensinterval
Kontorer m.v.			
Enkeltpersonskontor		Ingen værdi	-
Flerepersonerskontorer mindre end 300 m ³		A bør være mindst 0,8 x gulvarealet	- 0,2 x gulvarealet ved 125 og 250 Hz - 0,1 ved øv. frek.
Flerepersonerskontorer større end 300 m ³		0,9 x gulvarealet	do.
Produktionslokaler m.v.			
Under 200 m ³	0,8		+ 0,2 s
1.000 m ³	1,3		+ 0,2 s
Mellem 200 m ³ og 1.000 m ³	Der udregnes en forholds-mæssig værdi		+ 0,2 s
Over 1.000 m ³ Do., hvor loftshøjden overstiger 5 m		A bør være mindst 0,6 x gulvarealet. A bør være mindst 0,7 x gulvarealet	- 0,1 x gulvarealet - 0,2 x gulvarealet ved 125 og 250 Hz - 0,1 ved øv. frek.

Arbejdstilsynet vil opfatte værdierne som tilfredsstillende under normale forhold. I reglen vil dæmpning herudover forbedre forholdene yderligere.

Note:

Kontorer m.v. omfatter kontorer, butikker, receptioner og telefonomstillinger osv. og her bør skemaets værdier overholdes i arbejdsområder. For kontorer og produktionslokaler m.v. er anført en højeste gennemsnitsværdi af efterklangstiden eller et mindste ækvivalent absorptionsareal. For at sikre, at tilstrækkelig lydabsorption er til stede i alle frekvensintervaller, bør afvigelsen fra den anbefalede gennemsnitsværdi ikke overstige de angivne værdier i noget frekvensinterval.

Hvis der ikke forekommer væsentlig lavfrekvent støj som f.eks. fra ventilationsanlæg, kan man se bort fra værdien i frekvensområdet omkring 125 Hz.

Bilag 4 - Styringsstrategier belyst ved TRNSYS-modeller

Dette bilag beskriver opbygningen af de modeller, som er anvendt i simuleringerne. Beskrivelsen omfatter både materialemæssig opbygning af konstruktionerne, modellering af installationer samt definition af styring af installationer.

Modellering af konstruktioner

Akustikloft

Akustikloft modelleres som en ækvivalent varmeisolering placeret homogent på undersiden af de termoaktive dæk. Denne beregning gennemføres med henblik på sammenligning med målte resultater fra forsøg med rigtige akustikløsninger. Målet er i første omgang at undersøge om den simple tilnærmelse kan give acceptable resultater. Derefter kan andre beregninger foretages med akustikloft, hvis sammenligningen er i orden. Denne beregning afventer forsøgsresultaterne.

Varmelaster

En af langsiderne i kontoret modelleres som en ydervæg. I ydervæggen indsættes vinduer, så rummet får solindfald fra syd. Glasareal udgør ca. 50% af gulvareal.

$$U\text{-værdi væg} = 0,2 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\text{Glasareal} = 10,8 \text{ m}^2$$

$$U\text{-værdi, vindue} = 1,3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$G\text{-værdi vindue} = 0,59$$

Udvendig solafskærmning med afskærmningsfaktor på 0,5.

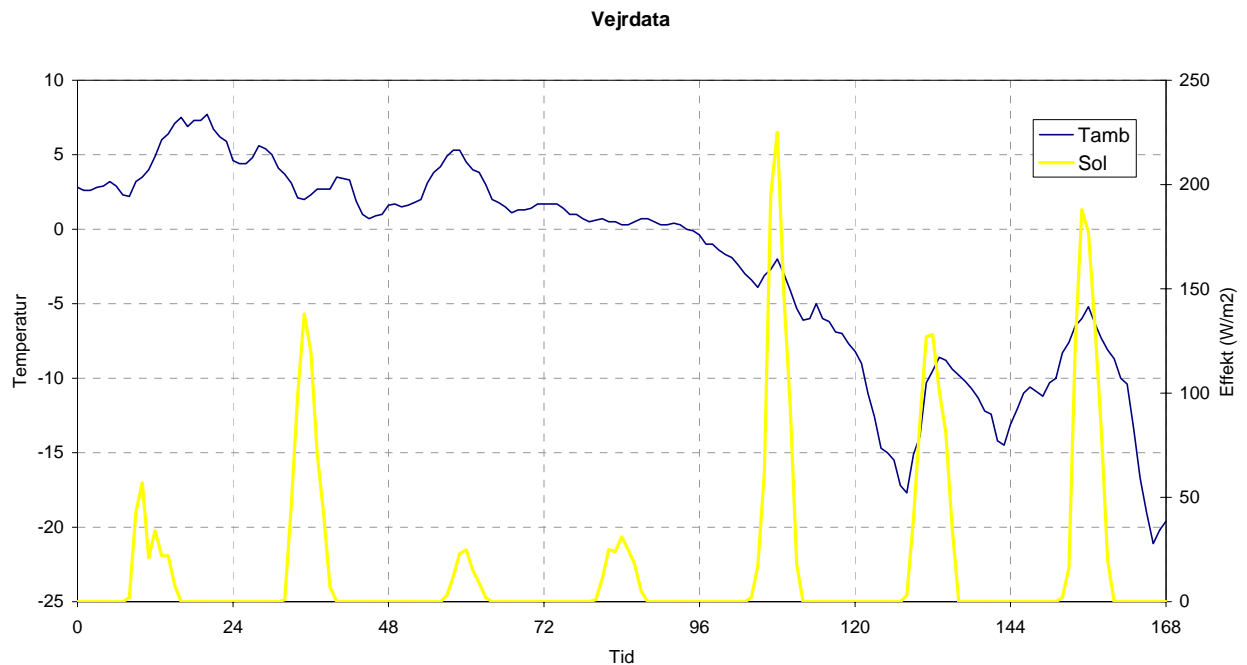
Intern varmelast fra personer, edb-udstyr og belysning (ekskl. sollast) er 20 W/m^2 i tidsrummet 9-17 og 5 W/m^2 udenfor dette tidsrum (afgives 50% konvektivt, 50% ved stråling).

Andre overflader i rummet vender mod tilsvarende zone (temperatur på den anden side af fladen er identisk med temperaturen i rummet).

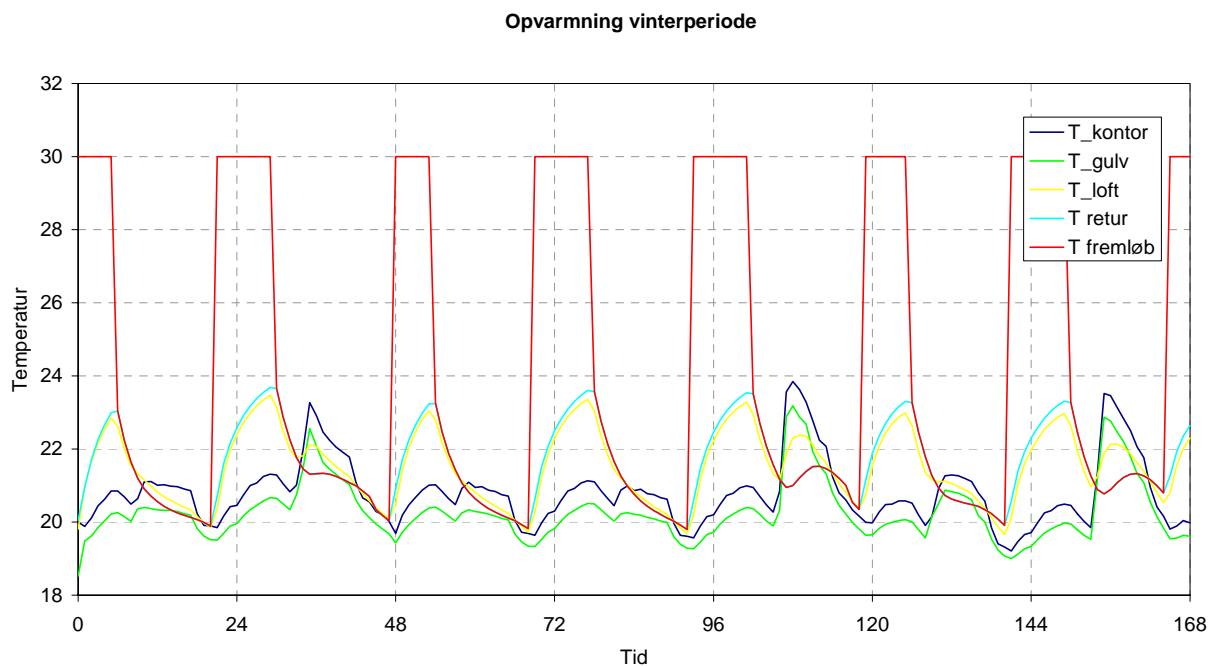
Modellering og test af varmegiver

De termoaktive konstruktioner anvendes i den ene model til opvarmning af kontoret. Varmegiveren er modelleret, så der altid er tilstrækkeligt med effekt til rådighed til at give den ønskede fremløbstemperatur. Valgt fremløbstemperatur: 30°C . Opvarmning starter hvis $T_{\text{kontor}} < 20^\circ\text{C}$ og slukker når $T_{\text{kontor}} = 22^\circ\text{C}$. Konstruktionerne er kun aktive om natten.

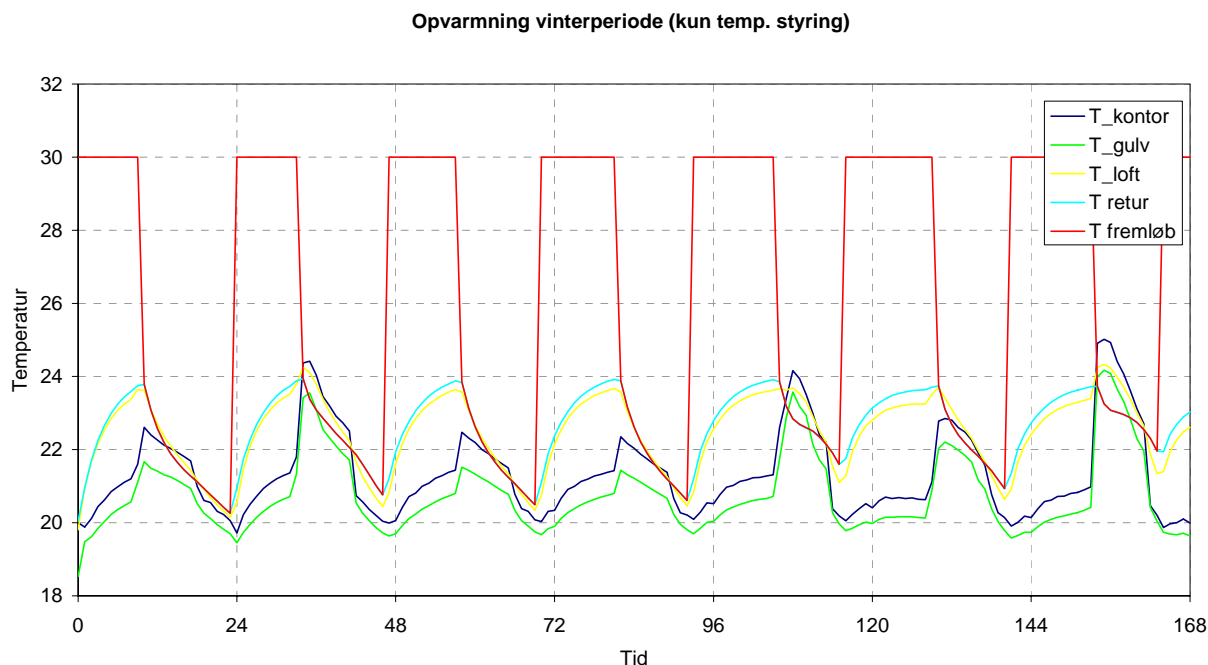
Den modellerede varmegiver testes med to forskellige styringer i en repræsentativ vinterperiode: Kold uge i januar med kun lidt sol.



Figur 1 *Vejrdata for kold uge i januar*



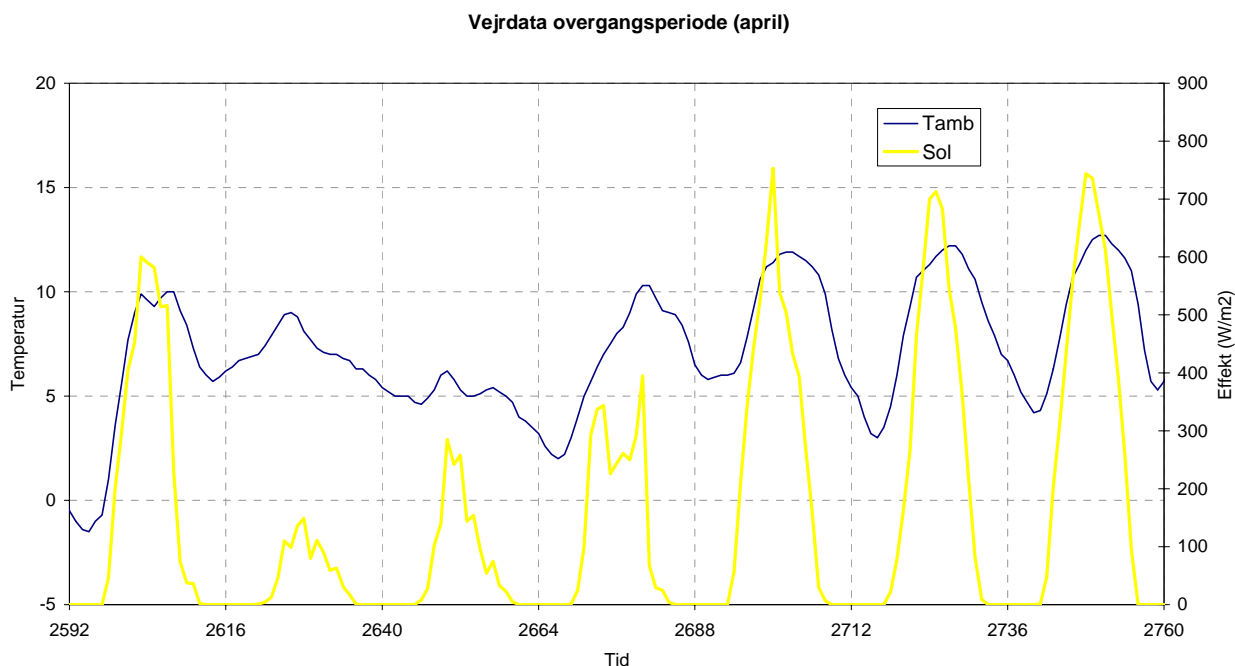
Figur 2 *Beregninger af temperaturer ved styringer i en repræsentativ vinterperiode: Kold uge i januar med kun lidt sol.*



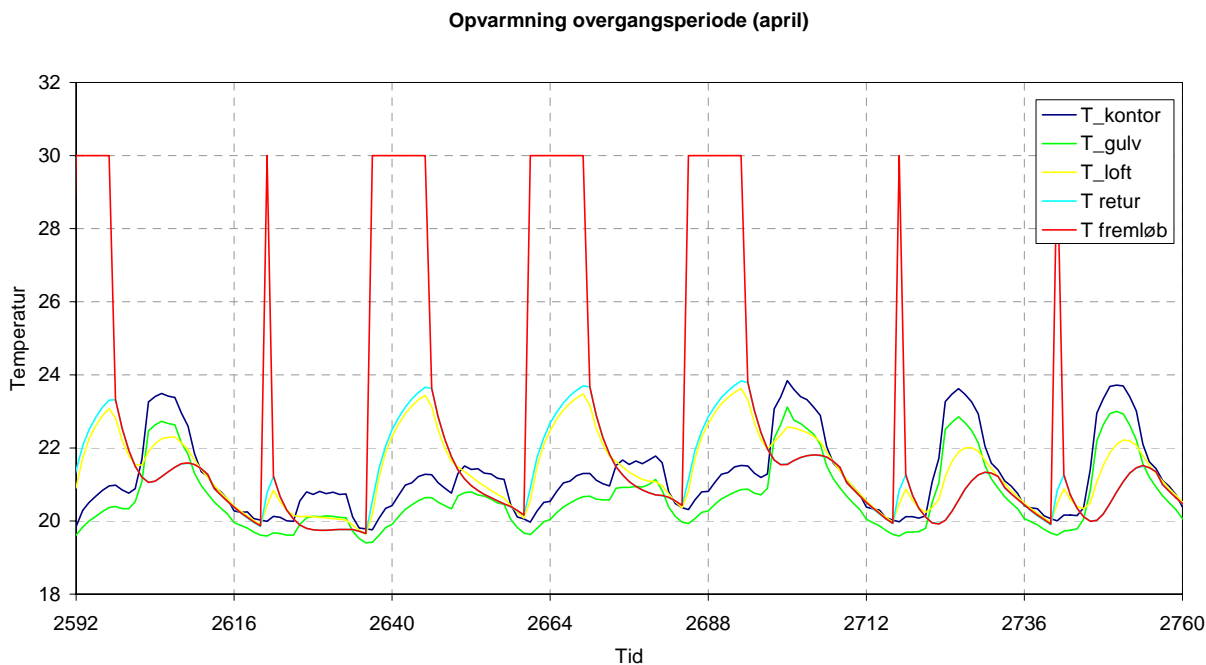
Figur 3 Beregninger af temperaturer ved temperaturstyring i en repræsentativ vinter periode: Kold uge i januar med kun lidt sol

Det fremgår af testen, at de termoaktive konstruktioner kan holde bygningen opvarmet, selv i meget kolde perioder. Hvis konstruktionerne kun er aktive om natten indtil kl. 6, vil det dog virke koldt om morgenen.

Den modellerede varmegiver testes i endnu en periode. Næmlig en overgangsperiode i april med en blanding af vinterlige temperaturer og forårstemperaturer. Nogle dage med en del sol.



Figur 4 Vejrdata for overgangsperiode i april. Nogle dage med en del sol



Figur 5 Beregninger af temperaturer ved opvarmning i en repræsentativ overgangsperiode: april med kun lidt sol

Det fremgår af simuleringseresultaterne at når der var været sol i løbet af dagen, falder temperaturen i kontoret så langsomt, at den først når under 20 C sidst på natten (tidlig morgen). Opvarmningen bliver dermed kun aktiv i et meget kort tidsrum.

Modellering og test af køleanlæg

Der opbygges endnu en model, hvor der i stedet for fast indløbstemperatur til de termoaktive dæk tilføjes et køleanlæg til modellen. Køleanlægget er modelleret som 2 varmevekslere i serie. Den første udveksler varme med udeluft, mens den næste giver den resterende køling, hvis nødvendigt. Modellen er i øvrigt uændret.

Egenskaber og forudsætninger for varmeveksler til køling med udeluft:

- Krydsstrømsvarmeveksler, væskeflow ublandet, luftflow blandet.
- Ingen varmeudveksling med omgivelser. Temperaturniveauet er ikke så langt fra omgivelserne, så det er ikke helt galt.

T_{ude}	= 16°C
$T_{afkastsluft}$	= 20°C
$T_{retur\ fra\ bygning}$	= 22°C
$T_{fremløb\ til\ bygning}$	= 19°C

Med væskeflow på 720 kg/time gennem et dæk på 21,6m², fås et luftflow på ca. 2250 kg/time. Dette vælges som max. flow i modellen.

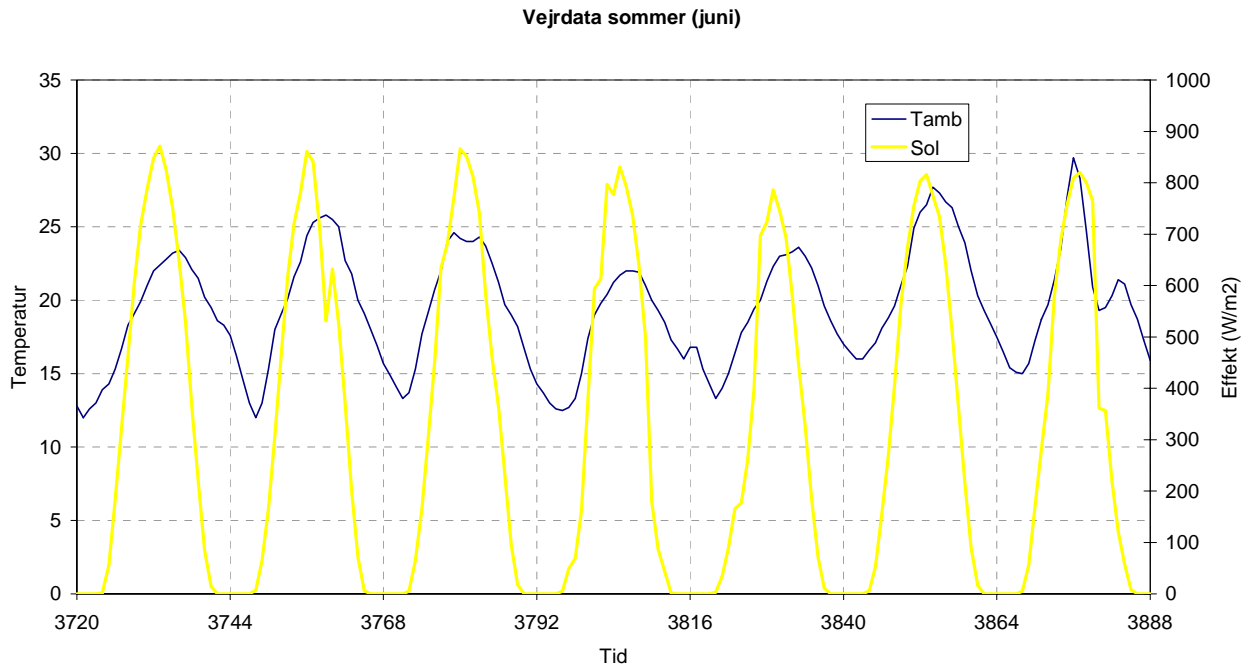
Varmeveksler effektivitet = 0,67

Kapacitetsstrømsforhold = 0,75

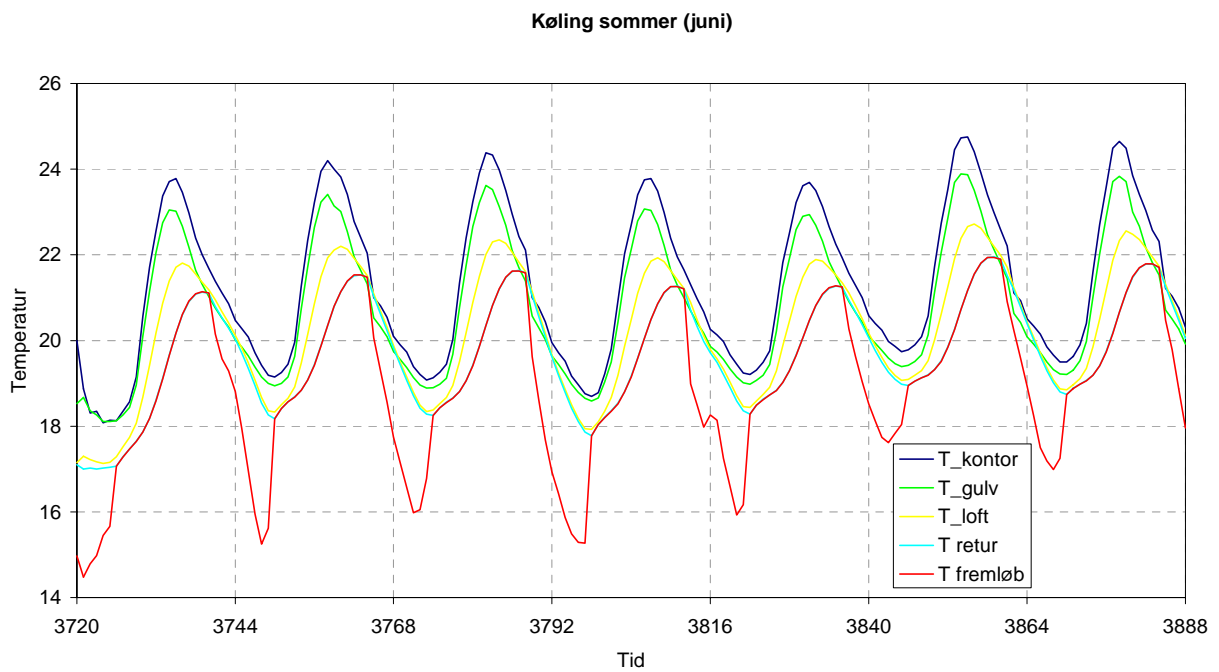
Efter NTU metoden fastlægges NTU af diagram (A.14.05 i Danvak grundbogen) = 2,4.

Den overordnede UA for varmeveksleren beregnes til 1509 W/K eller 5432 kJ/h K.

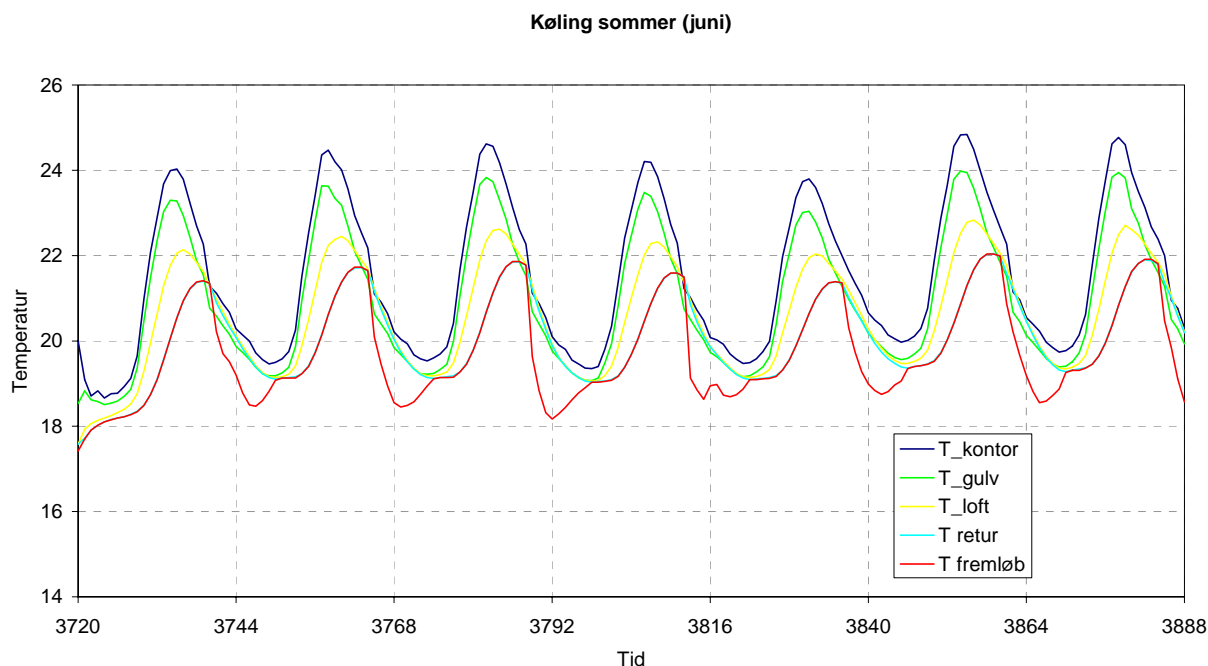
Det modellerede køleanlæg testes i en køling sommerperiode midt i juni måned (dag nr. 155-162) med to forskellige styringsstrategier. Perioden er kendetegnet ved meget sol, pæne dagtemperaturer men ikke så varmt om natten.



Figur 6 Vejrdata for sommer uge i juni

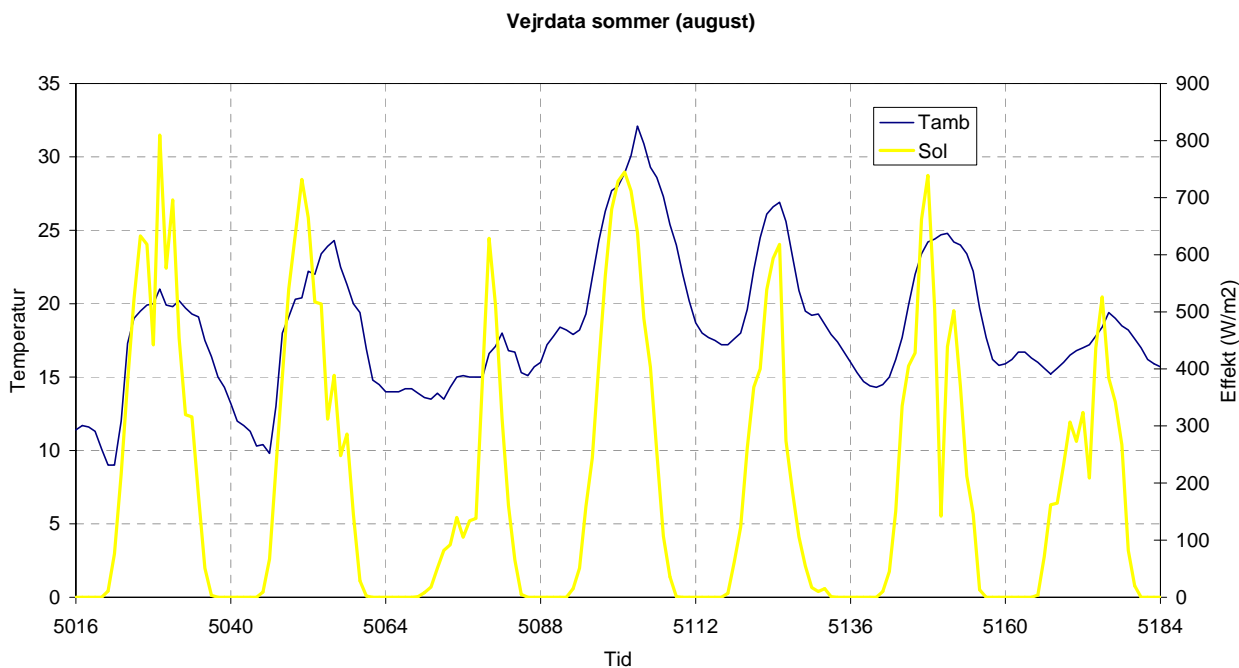


Figur 7 Styringsstrategi 1: Kun tidsstyring

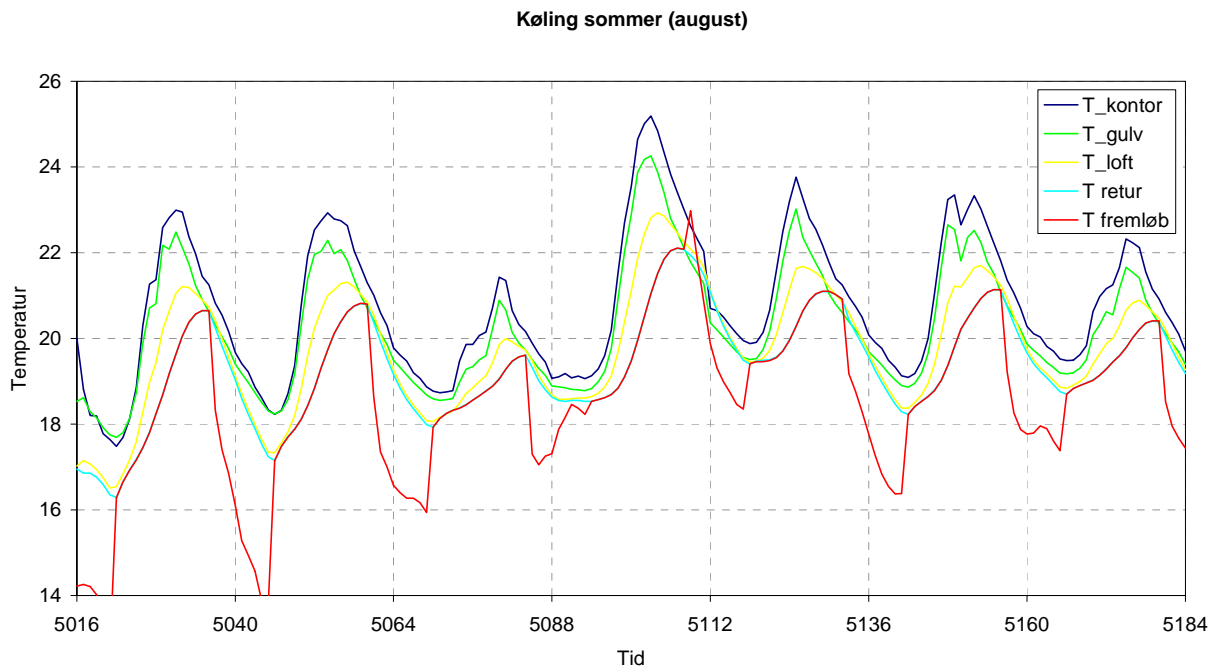


Figur 8 *Styringsstrategi 2: Tidsstyring plus regulering af luftflow $g=(19-T_{retur})/2$*

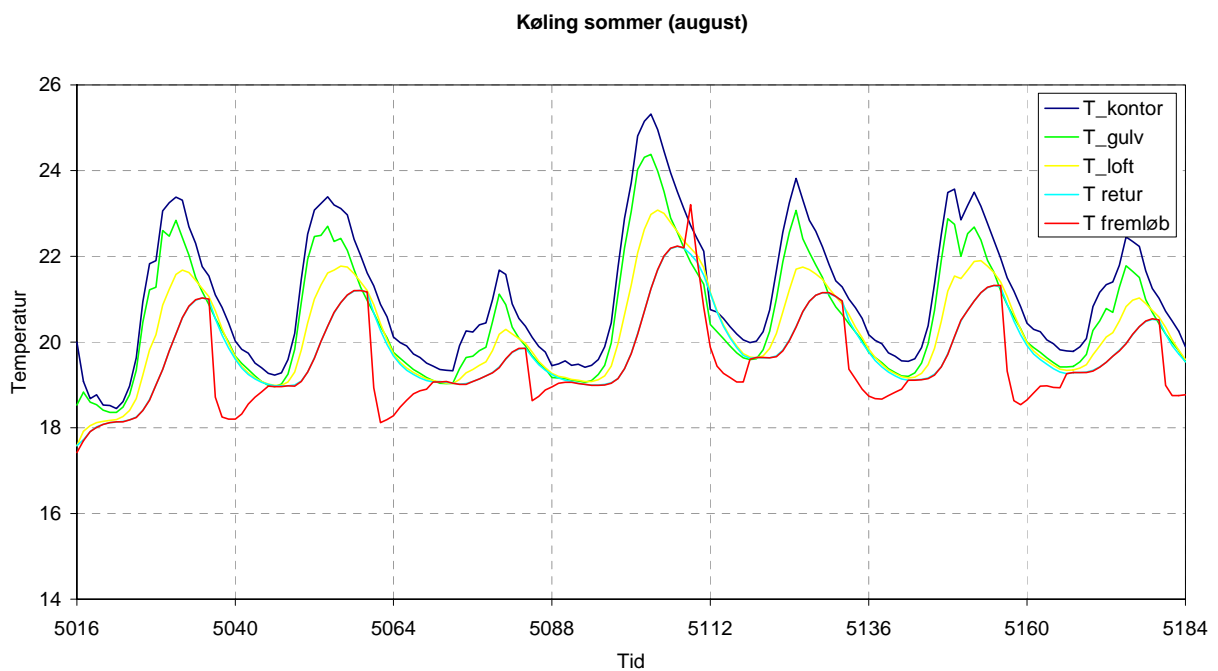
Køleanlægget testes i endnu en sommerperiode i august måned (dag nr. 209-216). Perioden er kendetegnet med meget varme i dagtimer og nattetimer, men ikke helt så meget sol. Der findes ikke i referenceåret en nat med temperaturer over 20°C (tropenat). Nedenstående periode med en minimumstemperatur om natten på godt 17°C er den varmeste i referenceåret.



Figur 9 *Vejrdata for meget varm sommer uge i august*



Figur 10 Styringsstrategi 1: Kun tidsstyring



Figur 11 Styringsstrategi 2: Tidsstyring plus regulering af luftflow $g=(19-T_{retur})/2$

Modellering og test af styringsstrategier for køleanlæg

Hvis udeluften er lav, bliver $T_{\text{fremløb}}$ for lav, hvilket giver for lave overfladetemperaturer på loft og gulv i bygningen. Styring indføres så indløbstemperaturen holdes så vidt muligt konstant på 19 °C. Styring foregår ved variation af flow af luft gennem varmeveksler på baggrund af returtemperaturen fra dækkene:

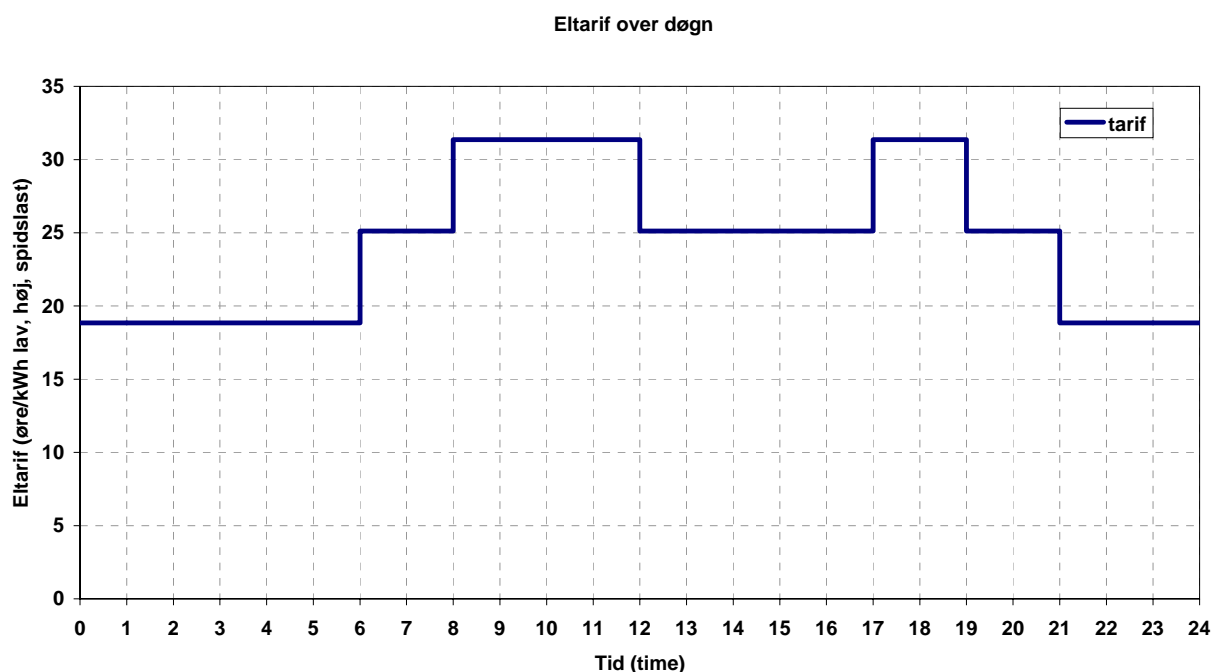
Hvis $T_{\text{retur}} \leq 19^\circ\text{C}$: Ingen køling

Hvis $T_{\text{retur}} \geq 21^\circ\text{C}$: fuld køling

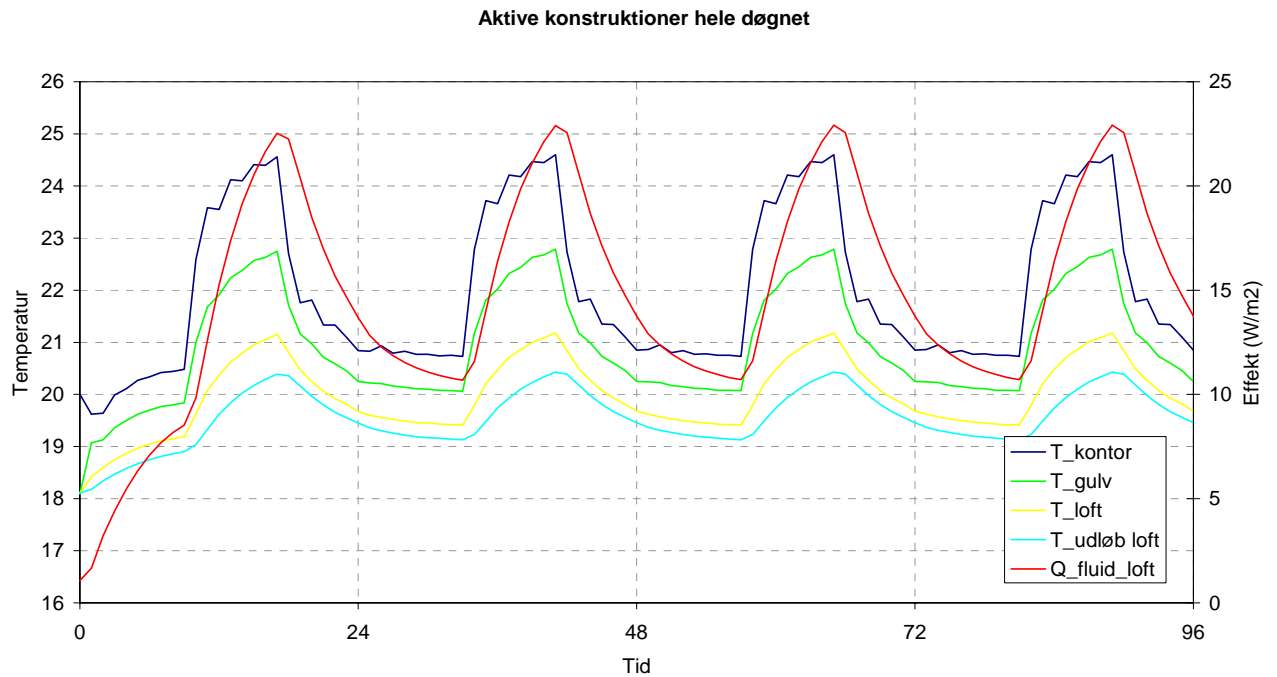
Derimellem: grad af køling: $g = (T_{\text{retur}} - 19)/2$

Følgende tre forskellige tidsstyringer er modelleret:

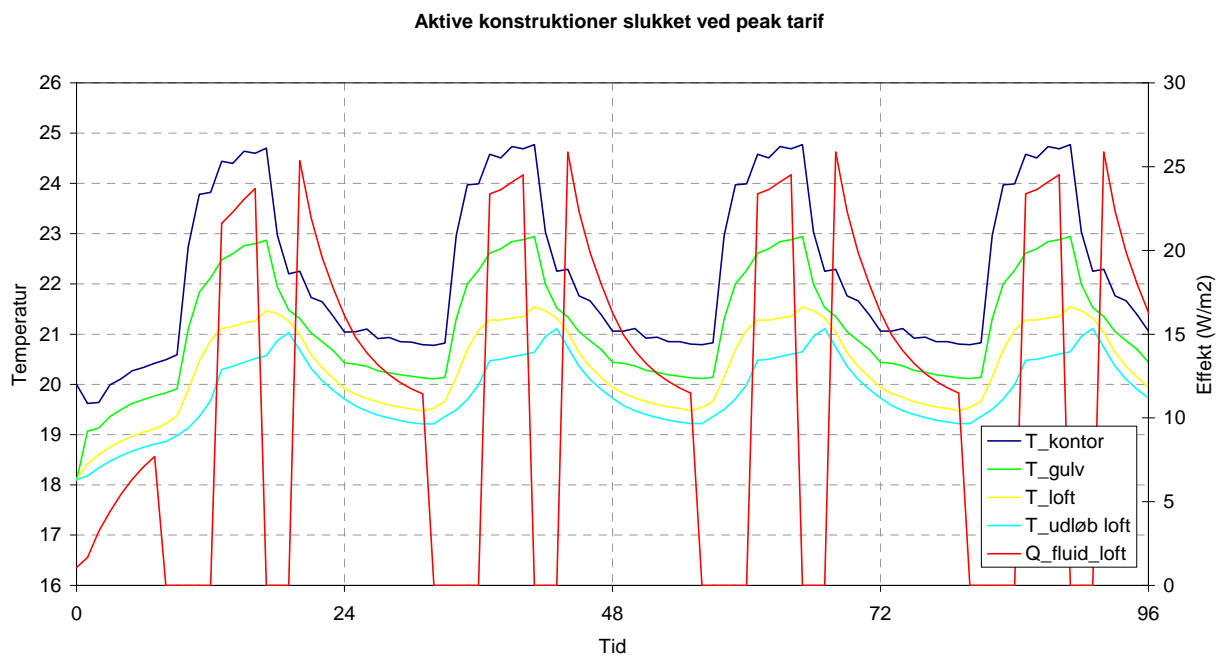
- altid aktiv
- ikke aktiv ved peak-tarif
- kun aktiv om natten



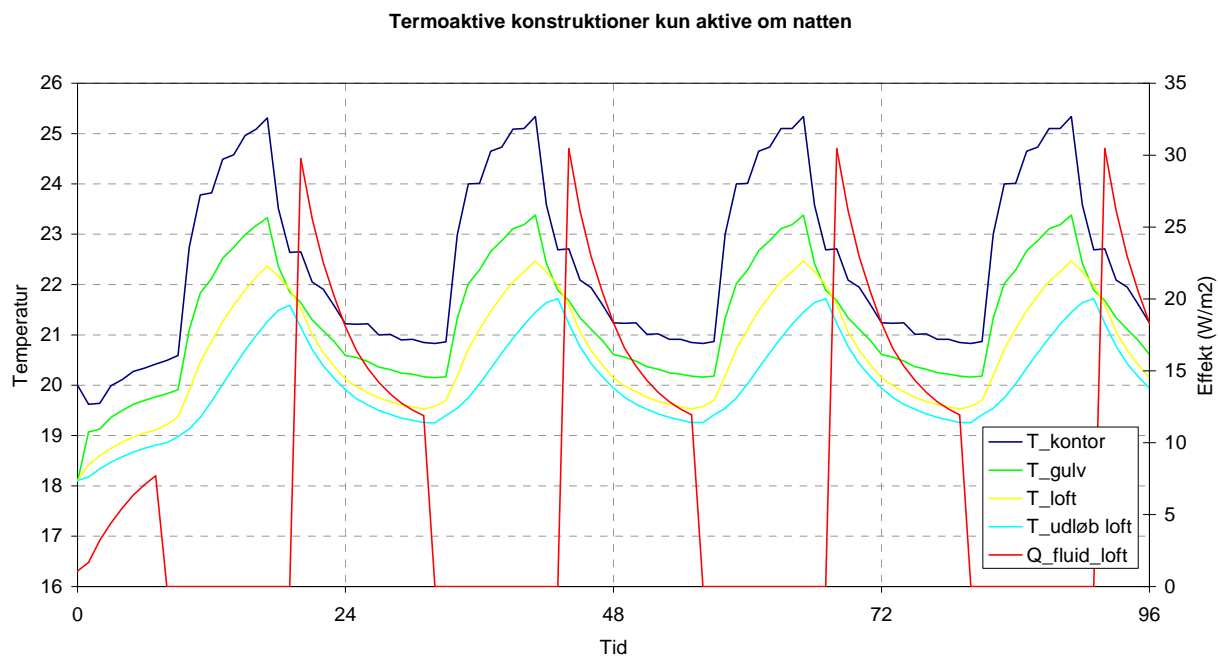
Figur 12 Eksempel på tarif over døgn



Figur 13 Simulerede temperaturer ved tidsstyring: altid aktiv



Figur 14 Simulerede temperaturer ved tidsstyring: slukket ved peak tarif



Figur 15 Simulerede temperaturer ved tidsstyring: aktiv om natten

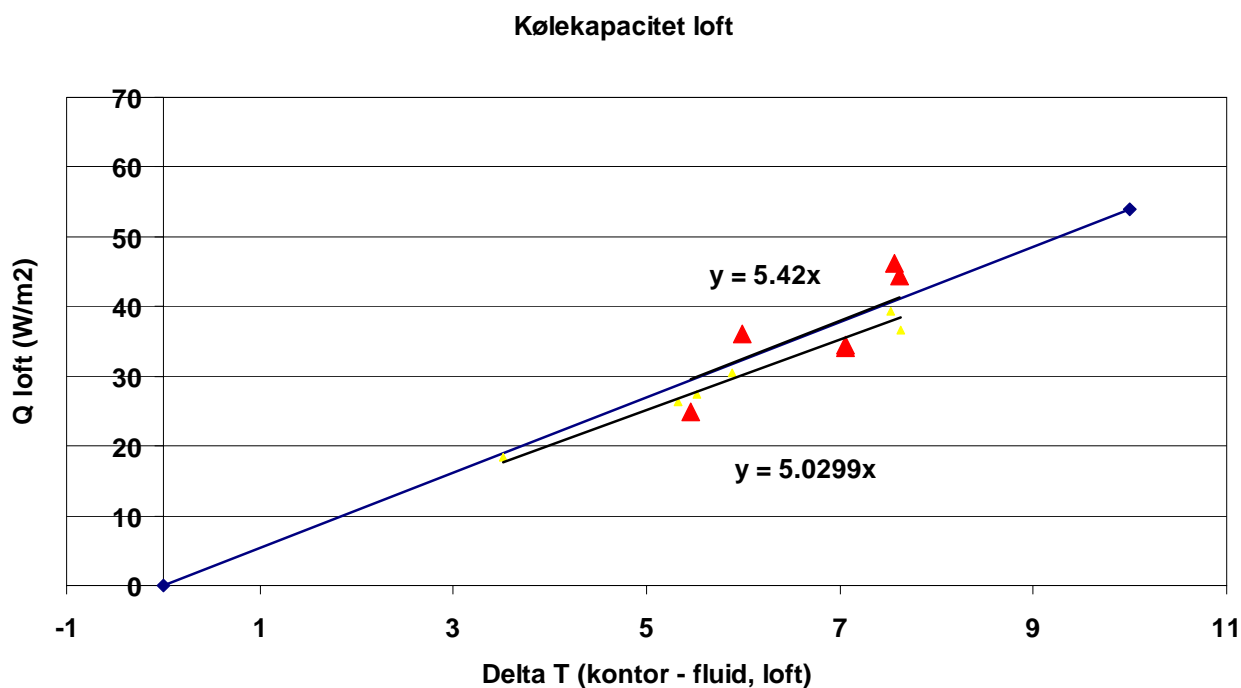
Som det ses af simuleringseresultaterne, er det med de givne interne varmelaster generelt tilstrækkeligt kun at køle om natten. Kun ved høj varmelast er det nødvendigt at køle i mellemtarif-perioderne.

Bilag 5 - Validering af programmel

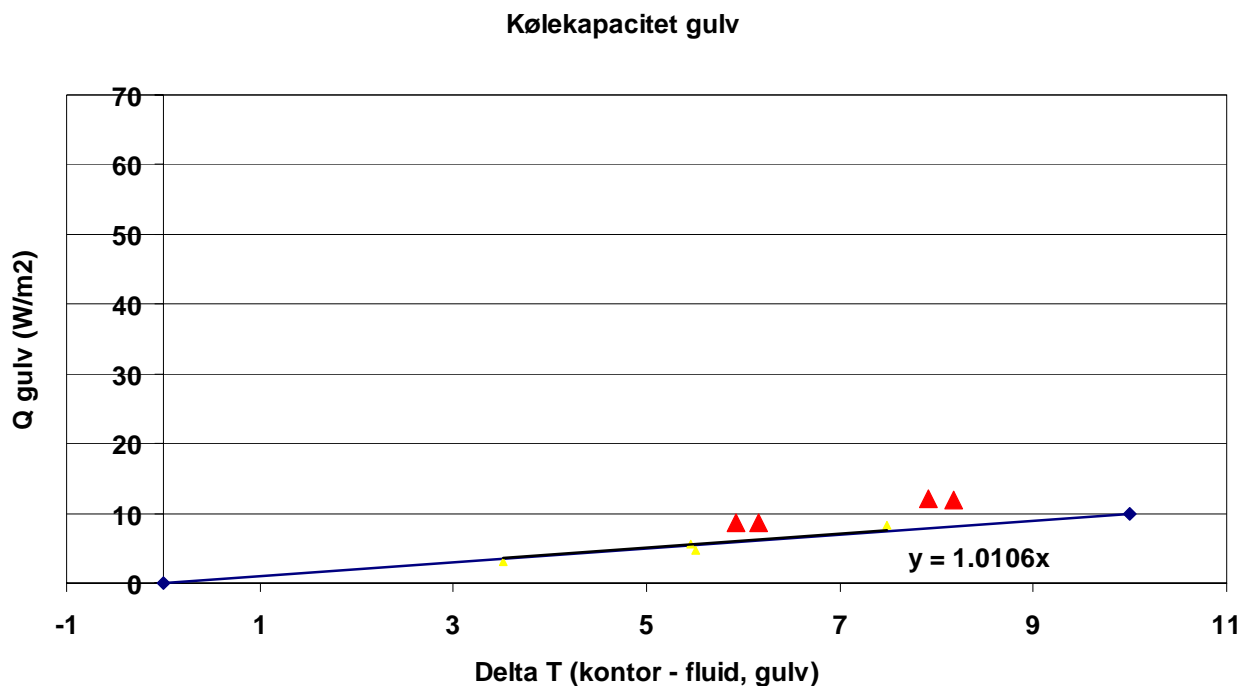
Der er opbygget en model, der korresponderer med den opbyggede forsøgsopstilling på DTU. Modellen består af en bygningsmodel, der beskriver forsøgsrummet, samt en øvre og en nedre guardzone. Modellen indeholder desuden en systemmodel, der består af to termoaktive konstruktioner, en pumpe og en tidsstyring. De to termoaktive konstruktioner udveksler ind- og uddata med bygningsmodellens 3 zoner.

Arbejdet med modelvalideringen har vist, at det er nødvendigt at modellere en zone på begge sider af den termoaktive konstruktion. Det er ikke tilstrækkeligt at anvende faste randbetingelser som input til den termoaktive konstruktion. Derfor indeholder modellen også en zone for hhv. det øvre og nedre guardområde. Valideringen samt sammenligning med DTUs beregninger har vist, at forholdene på begge sider af den termoaktive konstruktion er væsentlige. Tilsvarende vil den efterfølgende kontormodel også indeholde zoner, der beskriver kontoret hhv. over loftsdækket og under gulvdækket.

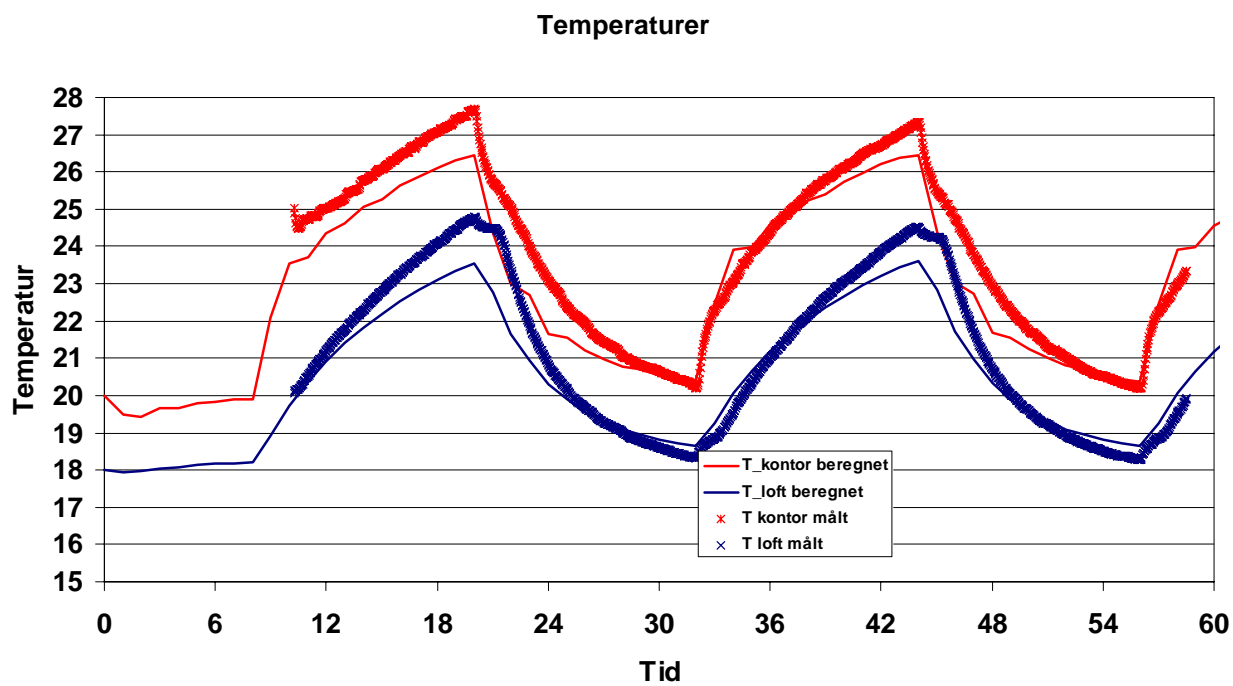
Derudover har modelvalideringen vist, at der kan opnås god overensstemmelse mellem de målte og de beregnede resultater. Det gælder både for den køleeffekt, der kan opnås med de termoaktive konstruktioner, og for overfladetemperaturerne. God overensstemmelse kan opnås for både stationære og dynamiske forsøg og beregninger.



Figur 1 Forsøg og beregninger af loftets køleeffekt



Figur 2 Forsøg og beregninger af køleeffekt gulv



Figur 3 Overfladetemperaturer samt temperatur i kontor ved dynamisk forsøg

Sammenligning med DTUs beregninger viser ligeledes god overensstemmelse. Dog er DTUs beregninger sandsynligvis bedre til at simulere de umiddelbare konsekvenser af en pludselig ændring af forholdene. Dette skyldes, at resultaterne fra TRNSYS beregningerne er integrerede over en times værdier. Derfor bliver peak-værdier til dels udjævnede. Der er i DTUs beregninger sandsynligvis anvendt et mindre tidsskridt til beregningerne på enten 5 eller 10 minutter.