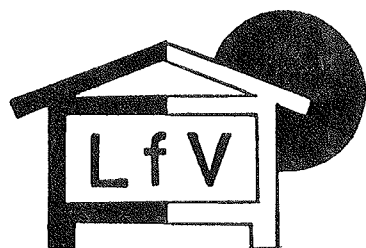


kirkevarmeanlæg

varmeforbrug
og indeklima
ved diskontinuert
opvarmning
af store rum



jens nørsgaard
thomas lund madsen

laboratoriet for varmeisolering

meddelelse nr. 181

december 1986

Indholdsfortegnelse

	<u>Side</u>
Forord	2
1. Sammenfatning	3
2. Indledning	5
3. Beskrivelse af varmeanlæggene	7
3.1. Luftvarme	9
3.2. Bænkevarme	9
3.3. Rørovnene ved gulv eller under bænkesæde	10
3.4. Kommentarer til anlæggene	11
4. Beskrivelse af målingerne	12
4.1. Måleudstyr	13
4.2. Interviewundersøgelse	20
5. Resultater	21
5.1. Sammenligning af de vigtigste variables tids- mæssige udvikling for de 4 opvarmningssystemer.	21
5.2. Vurdering af termisk komfort	35
5.3. Lufthastighedsmålinger	41
5.4. Interviewundersøgelser	44
5.5. Energiforbrug	49
5.6. Besparelse ved isolering	58
5.7. Lodret temperaturfordeling	59
6. Simulering af opvarmningsforløb med dynamisk model ..	62
7. Konklusion	73
Summary	75

Forord

Projektet der er beskrevet i denne rapport indgår i Energiministeriets energiforskningsprogram 84 i programområdet bygninger.

Projektet sigter især på at undersøge effektiviteten af forskellige opvarmningsanlæg, der anvendes til opvarmning af store rum, primært kirker, som kun opvarmes en enkelt eller nogle få gange om ugen. Projektets resultater må antages også at kunne finde anvendelse ved valg af opvarmningsanlæg til andre typer forsamlingslokaler, som kun benyttes lejlighedsvis.

Selv om de mulige energibesparende virkninger af nærværende projekt umiddelbart kan synes beskedne, må det betænkes, at der her i landet findes mere end 2000 kirker, hvoraf mange har uhensigtsmæssige varmeanlæg såvel med hensyn til effektivitet og komfort som i andre henseender, som det nærmere omtales i indledningen. Kirkevarmeanlæg udskiftes erfaringsmæssigt ca. hvert tyvende år, hvorfor der er gode muligheder for at udnytte projektets resultater.

Målingerne på de fire forskellige typer varmeanlæg, som er prøvet, er foretaget i samme kirke, Sct. Jørgensbjerg kirke ved Roskilde. Denne kirke blev valgt, dels fordi den bygningsmæssigt svarer ret godt til en typisk landsbykirke, dels fordi den som en af de meget få kirker har varmefolier indbygget i stolestadernes sæder og ryglæn, hvilket var en af de opvarmningsmåder, som ønskedes undersøgt. De tre andre typer varmeanlæg, som er prøvet, blev installeret interimistisk.

Projektet takker herved menighedsrådet, fordi det velvilligt har stillet kirken til rådighed for undersøgelserne.

Projektets medarbejdere har været:

- Lektor, civ.ing. Thomas Lund Madsen (projektleder)
- Teknikumingeniør Jens Nørgaard (hovedmedarbejder)
- Civ.ing. Allan Aasbjerg Nielsen (kap. 6. Dynamisk model)
- Cand.scient. Ove Mørck (redigering)
- Assistent Vibeke B. Nielsen (tekstbehandler)

Laboratoriet for Varmeisolering

December 1986

Vagn Korsgaard

1. Sammenfatning

I perioden februar til marts 1985 blev 4 forskellige opvarmningssystemer afprøvet i Sct. Jørgensbjerg Kirke i Roskilde. De 4 systemer var hhv. et luftvarmesystem, et bænkevarmesystem med varmemotter samt to rørovnanslæg, hvor rørovnene var placeret under bænkerne ved gulvet og umiddelbart under bænkesædet. For hver opvarmningsperiode tilstræbtes ensartede måleserier, idet formålet var at sammenligne effektiviteten af de 4 systemer, samt deres evne til at skabe termisk komfort i kirken. Desuden indbefattede forsøgene en undersøgelse af effekten af at isolere hvælvet med mineraluld. Ud over de mere tekniske målinger foretoges i forbindelse med hver opvarmningsperiode en interviewundersøgelse blandt kirkegængerne.

Ved vurderingen af varmeanlæggene fokuseredes dels på middellufttemperaturen i skibet og dels på den såkaldte ækvivalenttemperatur, der sammenfatter den af mennesket registrerede påvirkning af såvel lufttemperatur, lufthastighed som middelstrålingstemperatur. Desuden sammenlignedes varmetabene fra øvre og nedre halvdel af en termisk mannequin placeret på en bæk i kirkerummet.

Resultatet af målingerne såvel som interviewundersøgelsen viste at de lokale opvarmningsanlæg var luftvarmeanlægget overlegent både med hensyn til komfort og til effektivitet. Af de lokale opvarmningsanlæg yder rørovnanslæggene den bedste komfort og er samtidigt mest effektive.

Målingerne og de efterfølgende beregninger viste at ved at isolere hvælvet med 10 cm mineraluld kunne spares mellem 3 og 6 % i energiforbrug til opvarmning - afhængigt af typen af opvarmningssystem.

Endelig opstilledes en dynamisk model som en elektrisk analog til det termiske system med henblik på at simulere opvarmningsforløbet ud fra forskellige givne starttilstande og

derved bestemme opvarmningstiden for de forskellige anlæg. Modellen viste sig brugbar til formålet, men yderligere forbedringer af modellen foreslås.

2. Indledning

Energiforbruget til opvarmning af Danmarks 2000 kirker (heraf 1800 landsbykirker) er stort i forhold til den korte benyttelsestid. Desuden er der i mange kirker klager over den termiske komfort.

En sænkning af kirkens varmetab kan af antikvariske og bygningsfysiske grunde ikke altid finde sted. En analyse af de eksisterende varmeanlæg, der ofte er utidssvarende og direkte uegnede, er således påkrævet ikke alene ud fra et økonomisk synspunkt, men også ud fra et komfortmæssigt synspunkt.

Gennemsnitslevetiden for kirkevarmeanlæg i Danmark er på 15-20 år, hvilket vil sige at der udskiftes ca. 100 anlæg årligt. Dette betyder at eventuelle forbedringer relativt hurtigt vil slå igennem. Økonomi og termisk komfort er imidlertid ikke de eneste faktorer man bør fokusere på, idet bevarelsen af de gamle kulturhistoriske værdier i kirkerne også har en høj prioritet. Ideelt set ville det her være bedst, at gøre som før i tiden: ikke at opvarme kirken. Inden for de sidste 60-70 år, hvor der har været foretaget opvarmning i danske kirker, har der været et uforholdsmæssigt stort slid og en stor belastning på kalkmalerier, træværk og orgler. Der vil i sidste ende blive tale om en afvejning af hensynet til de forskellige interesser, men et mål i sig selv er, at temperaturforskellen mellem den opvarmede og den uopvarmede situation bliver mindst mulig, da der så vil være et minimum af variation i den relative luftfugtighed.

På fig. 1 ses en skematisk anskueliggørelse af de forskellige parametre og deres indbyrdes afhængighed og indflydelse på det termiske klima i kirken. Heri indgår dog ikke bevaringshensynet til kirkens træinventar.

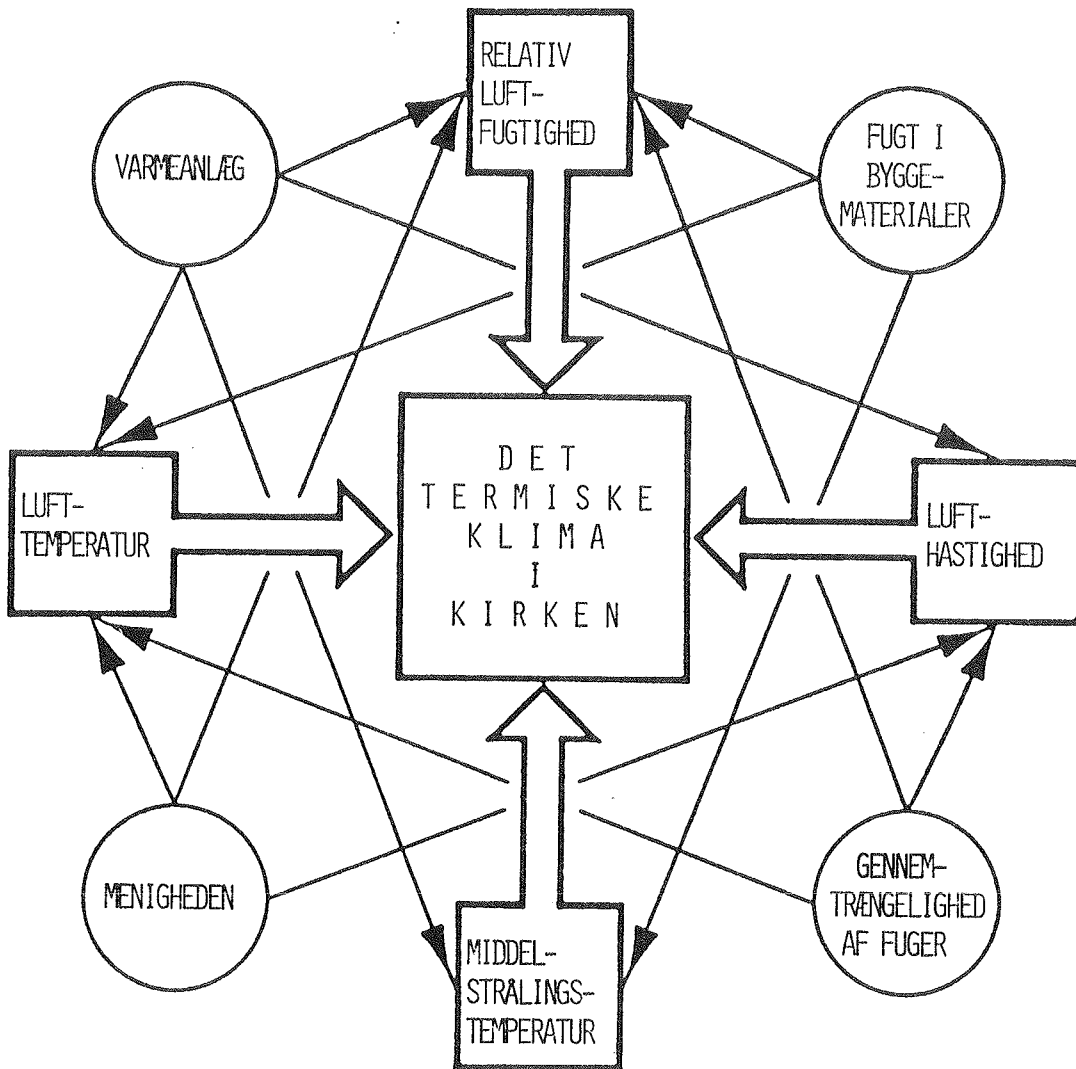


Fig. 1. De termiske parametres samspil i kirken.

Varmeanlægget i en typisk dansk landsbykirke betjenes oftest manuelt. Det betyder f.eks., at hvis kirketjeneren tænder for varmeanlægget lørdag aften, vil opvarmningstiden blive 10-11 timer. De fleste varmeanlæg kan imidlertid klare denne opvarmning på 5-7 timer, hvilket vil sige at en unødigt opvarmning finder sted i 3-6 timer. Efterhånden monteres dog programmerbare ugeure til start og stop af anlæggene i en del kirker især på el-varmeanlæg. Det optimale starttidspunkt før en kirkelig handling er afhængig af den termiske fortid før

opvarmningen: Temperaturen af de indvendige muroverflader. Hvad er udetemperaturens gennemsnit over en periode, hvor meget varme er der akkumuleret i kirkens indre konstruktioner o.s.v. Ved en analyse af disse faktorer ville det være muligt at danne grundlag for programmering af en mikroprocessor, som styrer starttidspunktet for opvarmningen ud fra en række variable og parametre i kirken samt udetemperaturen.

Ved vurdering af et varmeanlæg er det nødvendigt at foretage forskellige varmetekniske målinger. Et supplement hertil er interviewundersøgelser blandt menigheden, der kan afsløre andre problemer.

Målet med projektet har været at undersøge 4 forskellige varmeanlæg i den samme kirke: Sct. Jørgensbjerg kirke i Roskilde, for de ovenfor nævnte egenskaber. Målingerne har fundet sted i perioden primo januar 1985 til ultimo marts 1985.

I Sct. Jørgensbjerg kirke fandtes et varmemefolie-baseret opvarmningssystem for skabelse af lokal termisk komfort for den enkelte kirkegænger. Desuden installeredes et rørovningsanlæg samt et luftvarmeanlæg. Målingerne foretaget for de forskellige anlæg kunne derved umiddelbart sammenlignes.

På baggrund af de første pilotforsøg i januar måned formuleredes et måleforløb for de anvendte varmeanlæg.

3. Beskrivelse af varmeanlæggene

Afprøvningen omfattede 4 forskellige varmesystemer. Figur 2 på følgende side viser en grundplan af kirken, hvorpå de forskellige opvarmningssystemer er indtegnet.

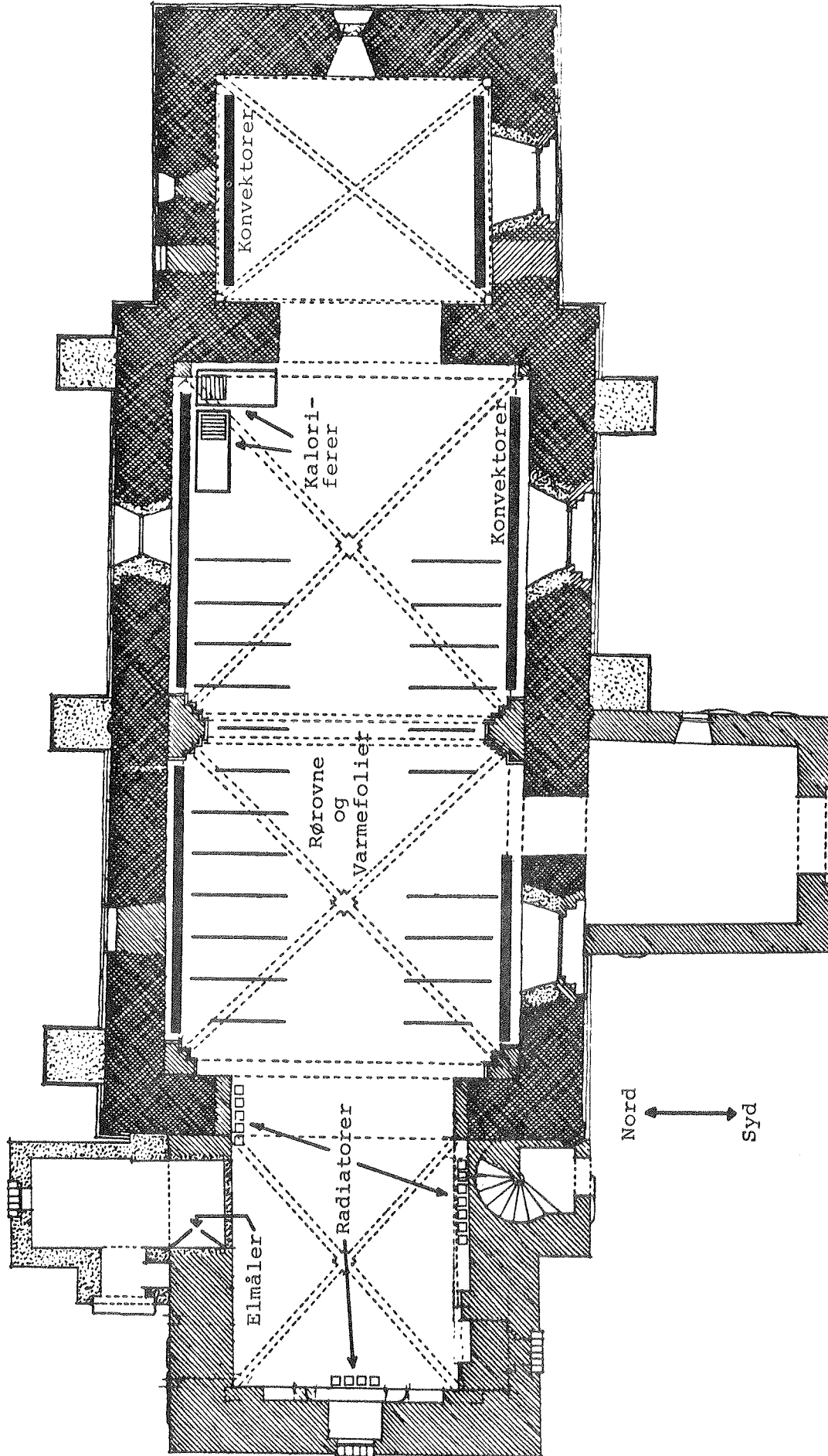


Fig. 2. Grundplan af kirken.

3.1. Luftvarme

Luftvarmeanlægget består af 2 transportable kaloriferer. Hver af disse blæser med stor lufthastighed varmen fra et el-varmelegeme på 16 kW ud i rummet. De blæser begge i deres egen længderetning med luftstrømmen 60 grader fra vandret og i retning væk fra de 2 vægge. De to kaloriferer er indtegnet i skibets nord-østlige hjørne på fig. 2. Figur 3 er et foto af de to kaloriferer.



Fig. 3. Placering af varmluftkaloriferer.

3.2. Bænkevarme

Kirkens eget varmeanlæg består af dels konvektorer placeret langs skibets og korets ydervægge (markeret med en tyk streg på fig. 2), dels varmefolier placeret hhv. på sædets underside og på ryggens bagside, og dels radiatorer placeret perifert i tårnrummet.

3.3. Rørovne ved gulv eller under bænkesæde

Ved målingerne af disse to anlæg afbrydes ovennævnte varmefolier og erstattes af rørovne placeret under bænkene i en af to højder: ved gulvet eller umiddelbart under bænkesædet. Figur 4 og 5 viser rørovnens placering hhv. ved gulvet og oppe under bænken. For at forhindre en for stor varmestrøm op gennem sæderne er der under disse placeret aluminiumsfolie som reflekterer varmestrålingen fra rørovnene.

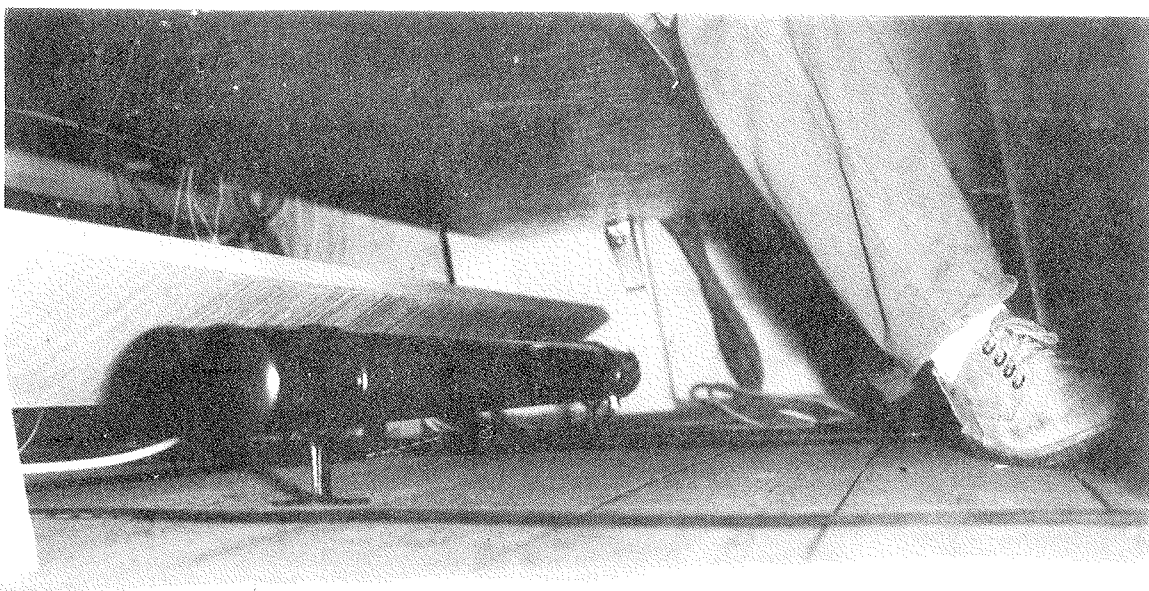


Fig. 4. Rørovne ved gulv.

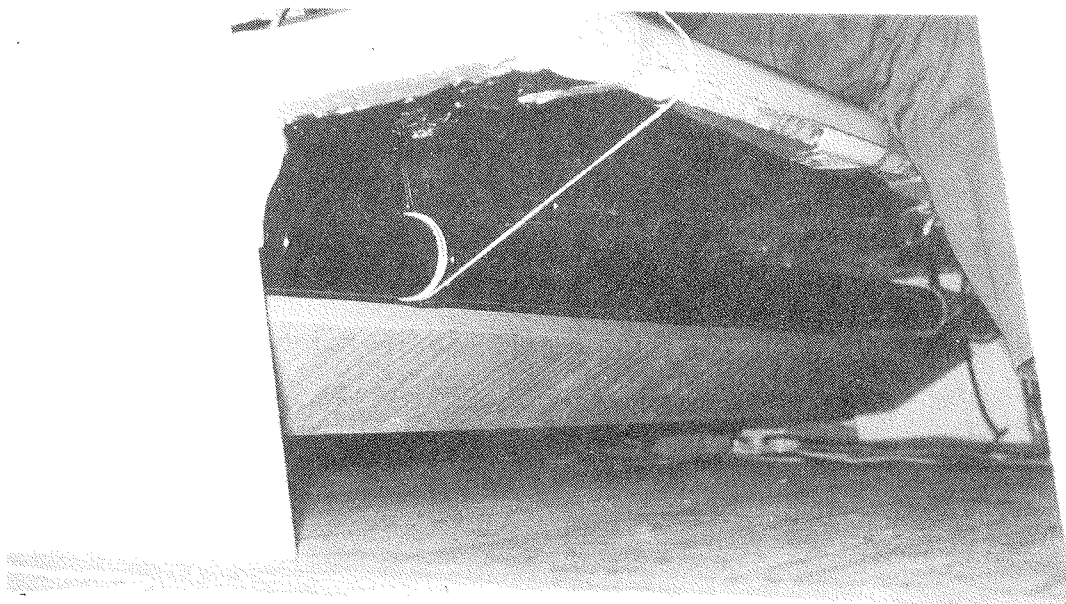


Fig. 5. Rørovne under bænkesæde.

3.4. Kommentarer til anlæggene

Alle anlæg er el-baserede, og forbruget kan direkte aflæses på kirkens el-måler. I følgende tabel ses effektfordelingen for de enkelte varmemedier, som de forskellige varmeanlæg består af.

	Luftvarme	Bænkevarme	Rørovnsvarme
Kor: Konvektorer		15 kW	
Skib: Konvektorer		25 kW	25 kW
Folier		8 kW	
Rørovne			15 kW
Kaloriferer	32 kW		
Sum	32 kW	48 kW	40 kW

Tabel 1. Effektforbrug i kirken ved brug af de forskellige varmesystemer.

Et problem med anvendelse af kaloriferer er, at varmfordelingen bliver ringe, idet varmen skabes i et enkelt punkt. Samtidig vil varmen lægge sig som en pude oppe under loftet (her hvælvet), hvilket bevirker et uforholdsmæssigt stort varmetab herigennem.

Bænkevarmeanlægget og anlægget med rørovne har et stort tilskud af varme fra konvektorgravene langs skibets nordlige og sydlige side. Disse grave har desværre så uheldig en udformning, at der ikke finder nogen virkningsfuld konvektion sted. Varmeafgivelsen sker blot ved en træg opdrift af luften. Dette indebærer, at en stor del af varmen oplagres i den nederste del af væggen samt i gulv og fundament.

4. Beskrivelse af målingerne

Måleforløbet for de 4 forskellige opvarmningssystemer var planlagt således: Først forløber ca. et døgn med nogenlunde stationære tilstande i kirken. D.v.s. at kirkens varmeanlæg sørger for at holde en konstant lufttemperatur på lavt niveau: 9 °C. Ved hjælp af målingerne fra denne periode er det muligt at vurdere kirkens generelle varmetab ved lav reguleringsstemperatur. Herefter startes et opvarmningsforløb hvor temperaturen hæves fra de ca. 9 °C til ca. 19 °C målt i bænkehøjde. Umiddelbart herefter afbrydes varmen, og afkølingsperioden forløber i ca. 1 døgn. D.v.s. en forsøgsperiode på ca. 3 døgn.

Man kunne have valgt at foretage målinger på de forskellige varmeanlæg under forhold, hvor en regulering ved fast temperatur ville finde sted, men dette var svært, idet reguleringsudstyret på stedet var dårligt, d.v.s. for stor hysteres, hvilket især under komfortsammenligningerne ville forvirre billedet. Desuden var der ikke mulighed for at regulere på det ene af varmeanlæggene.

I Sct. Jørgensbjerg kirke fandt der mange kirkelige handlinger sted, så det viste sig vanskeligt at finde disse perioder på 3 døgn uden kirkelige aktiviteter. Det lykkedes for 2 af varmeanlæggene, men kunne ikke nås for de sidste. Dette betød at der ikke var en stabil varmestrøm ud gennem kirken inden starten på opvarmningen. Det har dog ikke haft afgørende betydning for målingerne.

4.1. Måleudstyr

Registreringen af de forskellige parametre foregik v.h.a. en datalogger, med hvilken det er muligt at foretage dataopsamling på 30 analoge kanaler. De registrerede data lagredes på magnetkassettebånd. Ved at scanne og lagre med følgende tidsintervaller:

Før opvarmning	10 min.
Start opvarmning (1 time)	1 min. (kraftig stigning i temp.)
Resten af opvarmning	5 min.
Afkøling	10 min.,

kunne hver forsøgsperiode indeholdes på eet kassettebånd.

På fig. 6 er vist alle variable, som forklares i flg. tabel:

T_{gulv}	er overfladetemperaturen på stengulvet i den vestlige del af skibet
T_{vest1}	er lufttemperaturen i 10 cm's højde over gulvet i vestskibet
T_{vest2}	er lufttemperaturen i 60 cm's højde over gulvet i vestskibet
T_{vest3}	er lufttemperaturen i 110 cm's højde over gulvet i vestskibet
T_{vest4}	er lufttemperaturen i 400 cm's højde over gulvet i vestskibet
T_{vest5}	er lufttemperaturen 10 cm under loftet i vestskibet (højde 690 cm)
T_{loft}	er overfladetemperaturen på loftet i vestskibet
$T_{\text{hvæl v}}$	er overfladetemperaturen på oversiden af hvælvet
$T_{\text{øst1}}$	er lufttemperaturen i 10 cm's højde over gulvet i østskibet
$T_{\text{øst2}}$	er lufttemperaturen i 60 cm's højde over gulvet i østskibet
$T_{\text{øst3}}$	er lufttemperaturen i 110 cm's højde over gulvet i østskibet

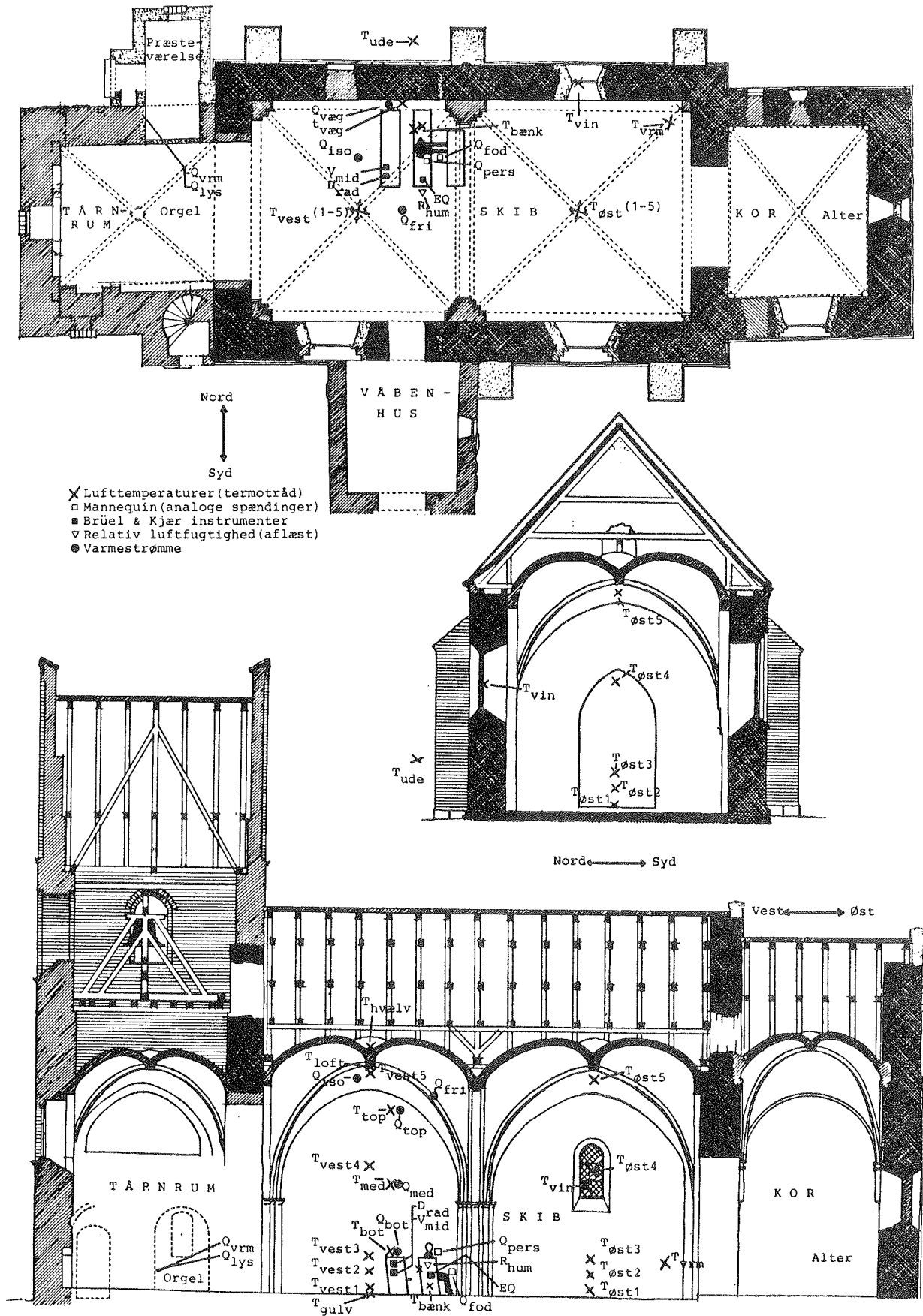


Fig. 6. Placering af målepunkter.

$T_{\emptyset st4}$	er lufttemperaturen i 400 cm's højde over gulvet i østskibet
$T_{\emptyset st5}$	er lufttemperaturen 10 cm under loftet i vestskibet (højde 690 cm)
T_{ude}	er udelufttemperaturen på nordsiden i ca. 1 m's højde
T_{vin}	er overfladetemperaturen på nordvinduetts inderside
Q_{top}	er varmemstrømmen gennem skibets nordvæg ved loftet (højde 580 cm)
Q_{med}	er varmemstrømmen gennem skibets nordvæg i midten (højde 335 cm)
Q_{bot}	er varmemstrømmen gennem skibets nordvæg ved gulvet (højde 130 cm)
T_{top}	er overfladetemperaturen ved øverste varmemstrømsmåler
T_{med}	er overfladetemperaturen ved midterste varmemstrømsmåler
T_{bot}	er overfladetemperaturen ved nederste varmemstrømsmåler
$T_{sæde_o}$	er overfladetemperaturen på sædets overside under 3 cm's skumgummihynde
$T_{sæde_u}$	er overfladetemperaturen på sædets underside
T_{ryg_f}	er overfladetemperaturen på ryggens forside
T_{ryg_b}	er overfladetemperaturen på ryggens bagside
EQ	er ækvivalenttemperaturen målt i en siddende persons tyngdepunkt målt med Brüel & Kjær Thermal Comfort Meter type 1212
PMV	er gennemsnits-votering om indeklimaet (Predicted Mean Vote) målt med Brüel & Kjær Thermal Comfort Meter type 1212
Q_{pers}	er den gennemsnitlige varmeafgivelse fra hele kroppen på den termiske mannequin, W/m^2
Q_{fod}	er varmeafgivelsen fra nederste del af kroppen på den termiske mannequin, W/m^2
T_{vrm}	er overflade- og lufttemperaturen på hhv. rørovnene og kalorifereudgang

Alle ovenstående parametre er registreret på datalogger, mens de følgende er målt manuelt eller registreret på anden måde (se fig. 6).

- R_{hum} er den relative fugtighed i %
- V_{mid} er middellufthastigheden ved bænken i 110 cm's højde
- V_{std} er standardafvigelsen på middellufthastigheden
- T_{rad_o} er strålingstemperaturen fra oven
- T_{rad_n} er strålingstemperaturen fra neden
- Q_{fri} er varmemstrømmen gennem hvælvet i W/m^2 i det vestlige skib
- Q_{iso} er varmemstrømmen gennem en lille isoleret del af hvælvet i W/m^2 i det vestlige skib
- Q_{vrm} er el-forbruget til opvarmning
- Q_{lys} er el-forbruget til lys.

Af specielt måleudstyr kan nævnes at den termiske mannequin TM2 har været benyttet under forsøgene. TM2 er termisk set konstrueret som et menneske, og kan bringes til at have den samme varmeafgivelse som et gennemsnitsmenneske ved et sikret aktivitetsniveau. TM2 iføres et almindeligt sæt tøj med bomuldsbukser, skjorte, trøje og jakke med en ca. clo-værdi på 1,4. Aktivitetsniveauet sættes til 1,2 met. Se fig. 7.

TERMISK MANNEQUIN: OVERFLADEAREALER OG HOVEDDIMENSIONER

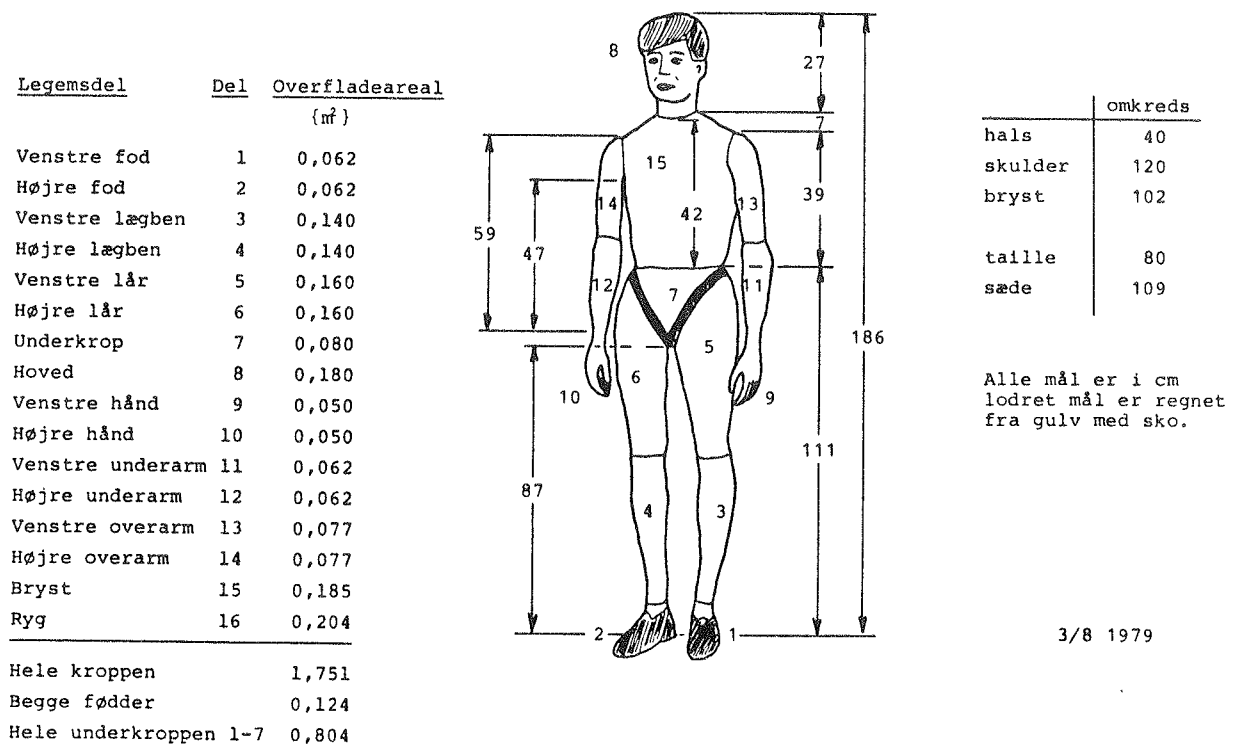


Fig. 7. Den termiske mannequins fysiske parametre.

Desuden har der under forsøgene været benyttet de to indeklimaanalyseapparater: komfortmåler (1212) og klimaanalysator (1213) fra Brüel og Kjær. Komfortmåleren kan benyttes til at bestemme dels ækvivalenttemperaturen, EQ, som er den af mennesket opfattede samlede påvirkning af middelstrålingstemperatur, lufttemperatur og lufthastighed, dels PMV-værdien (ref. 2), som er et mål for gennemsnitsmenneskets votering om det termiske indeklima ud fra en skala gående fra -3 til +3 og hvor 0 er idealtilstanden. Komfortanalysatoren kan bl.a. benyttes til at bestemme dels strålingsasymmetri, hvilket vil sige forskellen i strålingstemperatur fra 2 modsatte retninger, og dels lufthastigheden.

Den relative fugtighed måles manuelt med et Asmann's aspirationspsykrometer.

På grundlag af de to temperatursøjler i skibet, $T_{\text{øst}}$ og T_{vest} beregnedes middeltemperaturen i skibet, T_{mid} , som et gennemsnitstal. Desuden beregnedes T_{midvest} og $T_{\text{midøst}}$ som gennemsnitstemperaturen af termosøjlerne i skibets hhv. vestlige og østlige ende.

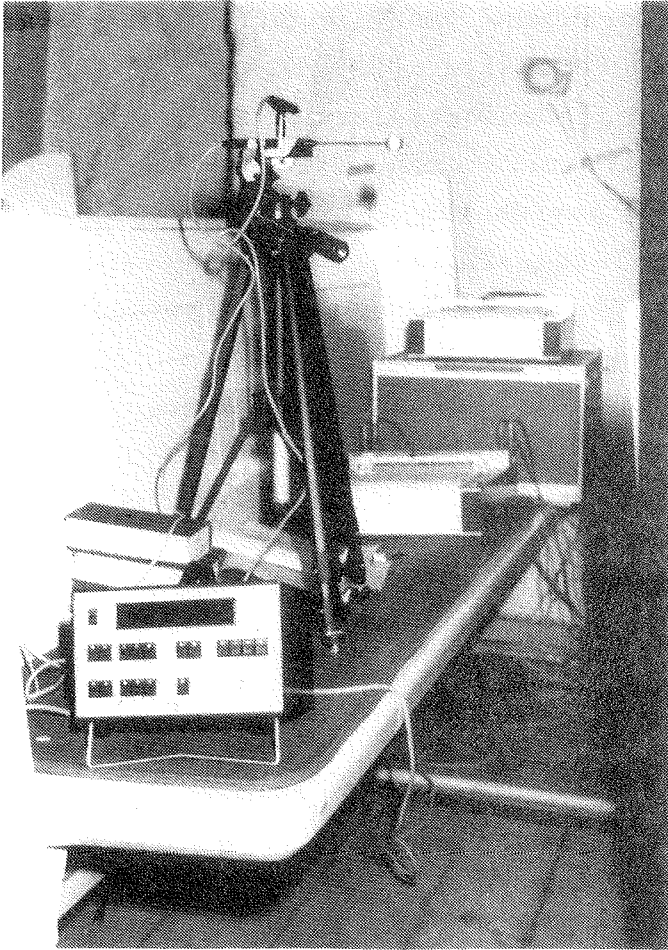


Fig. 8.a. Klimaanaly-
sator (1213) med strålings-
asymmetritransducer og
anemometerplacering. I
baggrunden styreenhed til
TM2.

Fig. 8.b. Komfortmåle-
ren (1212) med føleren
placeret på bænken.
I baggrunden den ter-
miske manikin (TM2).



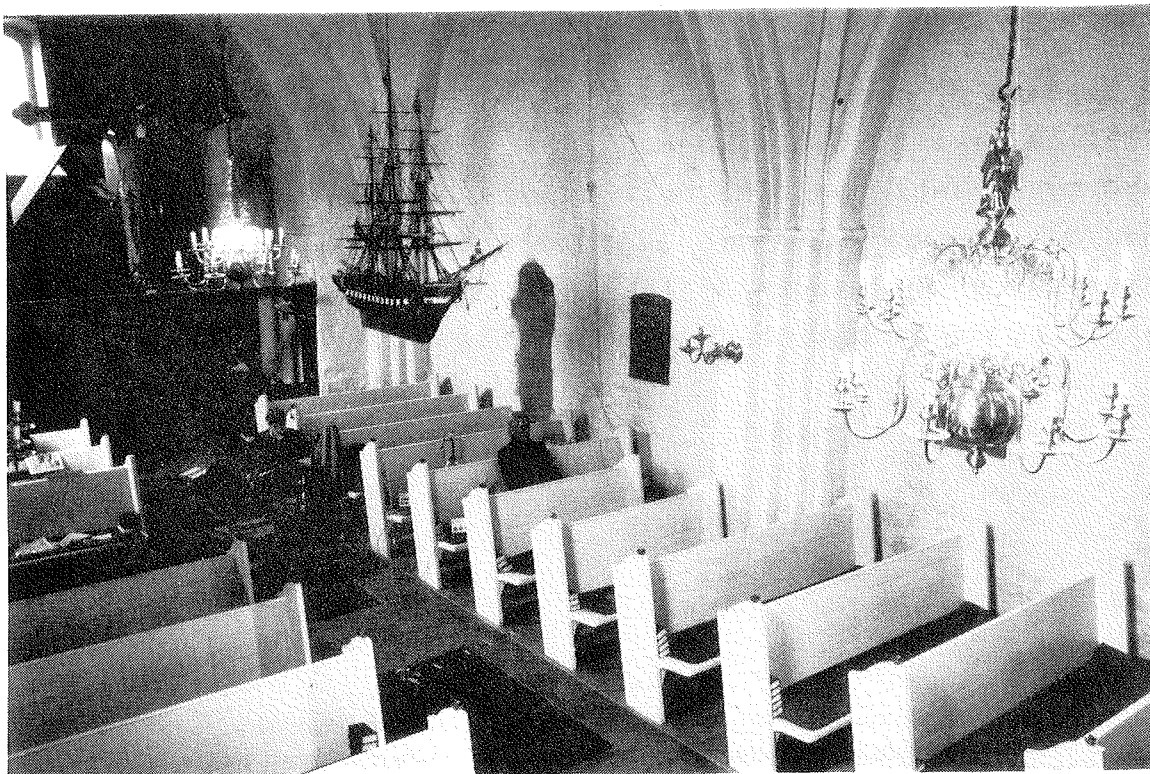


Fig. 9. Placering af den termiske mannequin og de 2 måleinstrumenter fra fig. 8. på hhv. bæk nr. 7 og 8 fra højre.

For at iagttage virkningen af at isolere oversiden af hvælvet er der placeret en extra varmestrømsmåler på undersiden af hvælvet i det vestlige skib. Over hvælvet er der på en ca. 3 m² stor flade placeret 100 mm mineraluld. Q_{varm} og Q_{lys} er forbruget af el til opvarmning og lys. Under opvarmningen registreres dette ved manuel aflæsning i el-skabet hver halve time. Den relative luftfugtighed registreres ligeledes hver halve time under opvarmningen.

Som et forsøg benyttedes laboratoriets nye termovisionsudstyr til fotografering af væggenes temperatur-fordeling under afprøvningen af de forskellige varmeanlæg. Resultaterne af disse undersøgelser gav ikke nye oplysninger i forhold til de andre undersøgelsesmetoder.

4.2. Interviewundersøgelse

3 søndage i januar og februar måned foretoges en interviewundersøgelse i forbindelse med gudstjenesten, og på fig. 10 ses spørgeskemaet, som blev delt rundt i kirken. Ved udarbejdelsen af skemaet blev der lagt vægt på at spørgsmålene skulle være enkle og letforståelige og ikke indeholde for mange forskellige svarmuligheder.

SPØRGESKEMA

I forbindelse med en undersøgelse af varmeanlægget i Sct. Jørgensbjerg Kirke bedes De besvare følgende spørgsmål (sæt x)

1. Hvordan føles temperaturen ved gudstjenestens start?

For høj
Passende
For lav

2. Hvordan føles temperaturen ved gudstjenestens afslutning?

For høj
Passende
For lav

3. Er der nogen steder på kroppen, hvor De føler det specielt koldt/varmt?

	varmt	koldt
Fødder	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ben	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Hænder	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fig. 10. Spørgeskema, anvendt ved interviewundersøgelserne.

5. Resultater

Opvarmningsforsøgene fandt sted i følgende perioder:

Luftvarme:	5/2 kl. 12.00 -	7/2 kl. 12.00
Bænkevarme:	11/2 kl. 12.00 -	13/2 kl. 12.00
Rørovne (gulv):	5/3 kl. 12.00 -	7/3 kl. 08.00
Rørovne (bænk):	7/3 kl. 08.00 -	7/3 kl. 17.30.

Ved forsøget med rørovne ved gulvet var der, som nævnt, ikke nogen stabil varmetabsperiode inden opvarmningsstarten, idet der havde været en kirkelig handling dagen før, og afkølingsperioden for denne var optakten til dette forsøg.

Ved forsøget med rørovne ved bænken måtte forsøget afbrydes efter opvarmningen, idet dataloggeren var defekt. P.g.a. sygdom i perioden med rørovnforsøgene blev reguleringen i kirken anvendt under opvarmningen. Dette har dog ikke skabt de helt store problemer, for anvendelsen af rørovne minder i høj grad - varmeteknisk - om bænkevarmetilfældet. Komfortmæssigt er der tilstrækkeligt med data til sammenlignende analyse.

5.1. Sammenligning af de vigtigste variables tidsmæssige udvikling for de 4 opvarmningsystemer

På de næste 12 sider ses den tidsmæssige udvikling af de vigtigste variable. Hele perioden er dog ikke vist, men kun selve opvarmningen og det meste af afkølingen.

Ud fra temperaturforløbene i fig. 11 ses det at forskellen mellem lufttemperatur og ækvivalenttemperatur er forskellig for de 4 opvarmningsmetoder. Især er forskellen stor i tilfældet med luftvarme. Det vil sige at en høj lufttemperatur i kirken ikke sikrer en høj temperatur for kirkegængerne.

I fig. 12 ses det at luftvarmeanlægget ikke får fordelt varmen tilstrækkeligt i det vestlige skib, idet der er op til 3 grad-

ers temperaturforskel mellem østlig og vestlig lufttemperatur (se endvidere fig. 13).

Ud fra fig. 14 ses det, at den lodrette lufttemperaturforskel gennemgående er 2-3 grader højere for luftvarmeanlægget end for de andre anlæg.

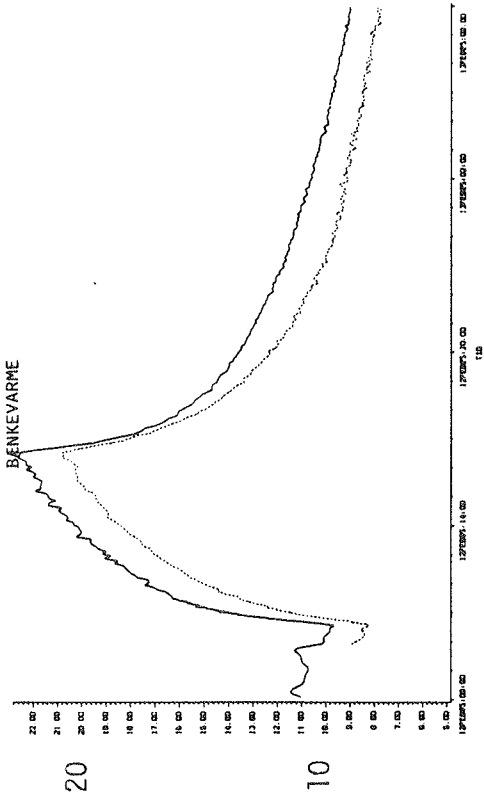
Varmestrømmen målt ud gennem væggen i forskellig højde på fig. 16 og de tilsvarende overfladetemperaturer, fig. 17, viser, at forskellen i varmemstrømmen ud gennem væggen er størst i luftvarmetilfældet, hvilket er endnu et tegn på en uhensigtsmæssig varmefordeling.

I fig. 18 er vist lufttemperaturen i udblæsningen på kalorifererne, overfladetemperaturer på bænke og rørovnene. Det ses at i begge rørovnstilfældene er der en meget høj overfladetemperatur, hvilket er nødvendigt for at sikre en tilstrækkelig varmeafgivelse fra den relativt lille overflade. Dette medfører også at afstanden mellem fx. fødder og ovn er en kritisk størrelse, som skal nøje afpasses, samt at passende afskærmning er påkrævet.

Som forventet er den lodrette strålingsasymmetri vist på fig. 19 meget stor i tilfældet med bænkevarmen. Sammenlignet med ISO STANDARD-normen for termisk indeklima er det dog tilfredsstillende.

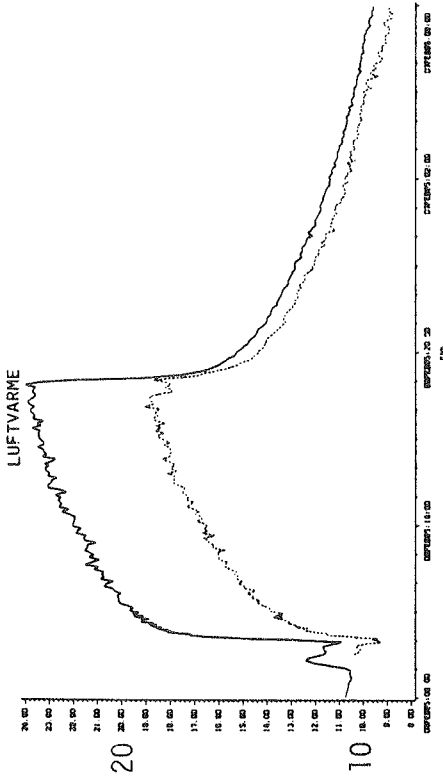
Varmeafgivelsen for mannequin'en er vist i fig. 20. Den mindste forskel mellem varmeafgivelsen fra hele kroppen og varmeafgivelsen fra benene forekommer i de to tilfælde med rørovnene. Da varmeafgivelsen fra mannequinens nederste halvdel indgår i gennemsnittet, vil en forskel på fx. 10 W/m^2 betyde, at forskellen mellem øverste og nederste halvdel er det dobbelte, 20 W/m^2 (hvilket i øvrigt ikke er acceptabelt).

Den relative fugtighed vist i de 4 opvarmningsforløb på fig. 22 varierer meget og der er desværre en ret stor usikkerhed på denne faktor, men det ses dog at den som ventet falder i opvarmningsperioden.



20

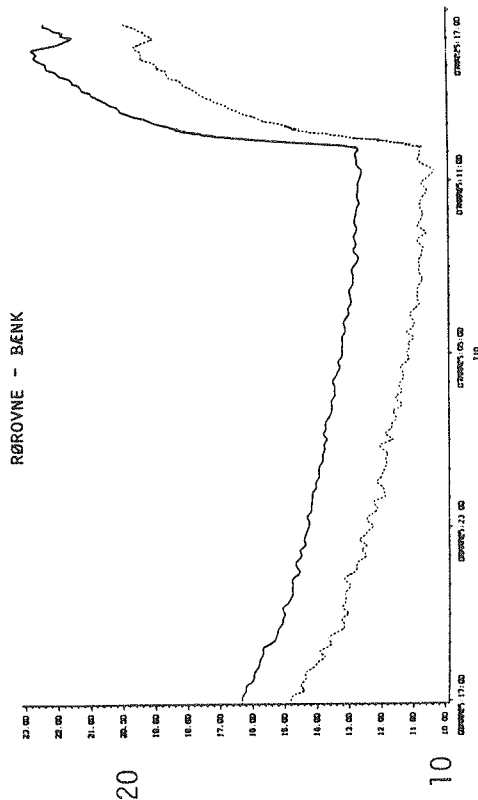
10



20

10

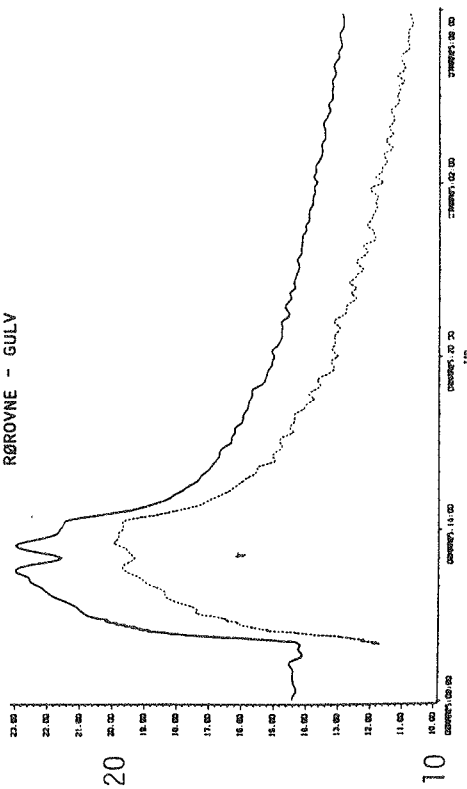
FULDT OPTRUKKET: MIDDELLUFTTEMPERATUR I SKIBET.
STIPLET: ÆKVIVALENTTEMPERATUR VED BENKEN I KROPSHØJDE.



20

10

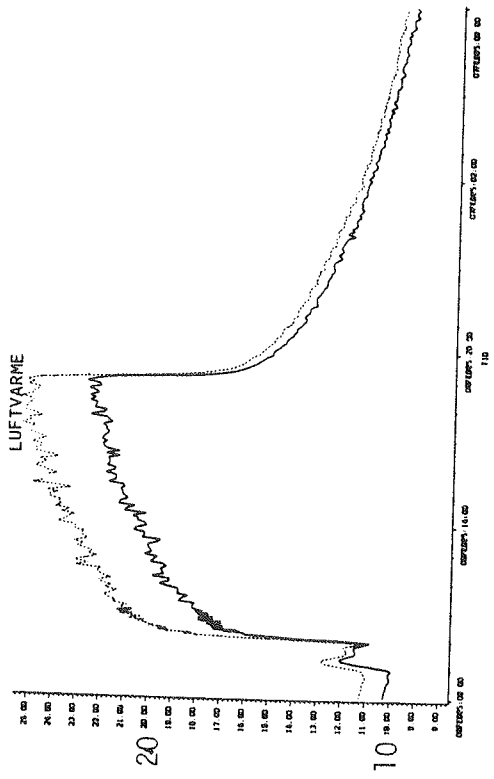
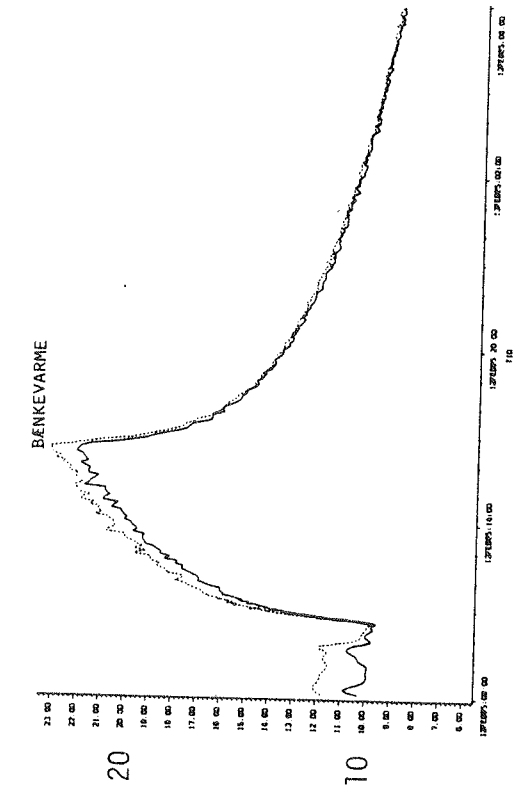
RØROYNE - GULV



20

10

Fig. 11. Middelttemperaturen som er et gennemsnit af lufttemperaturen i de 2 termosøjler i skibet; d.v.s. temperaturen i temperaturtyngdepunktet. Denne parameter er vigtig i energimæssig sammenhæng. Ækvivalenttemperaturen er et udtryk for menneskers temperaturfølelse.



FULDT OPTRUKKET: MIDDELLUFTTEMPERATUR I VESTLIG PROFIL.
STIPELET: MIDDELLUFTTEMPERATUR I ØSTLIG PROFIL.

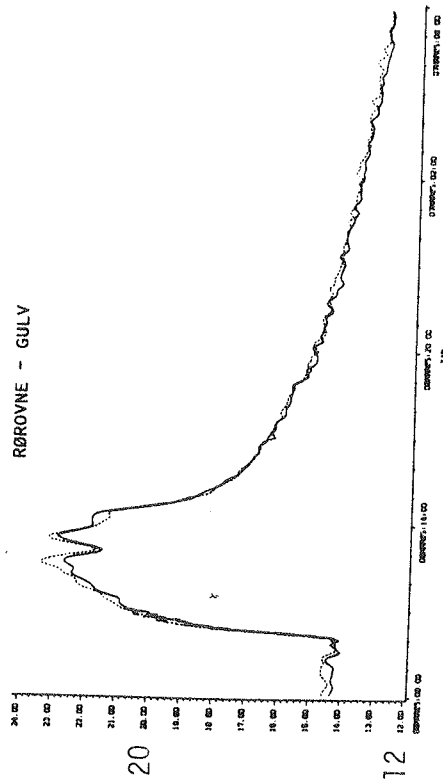
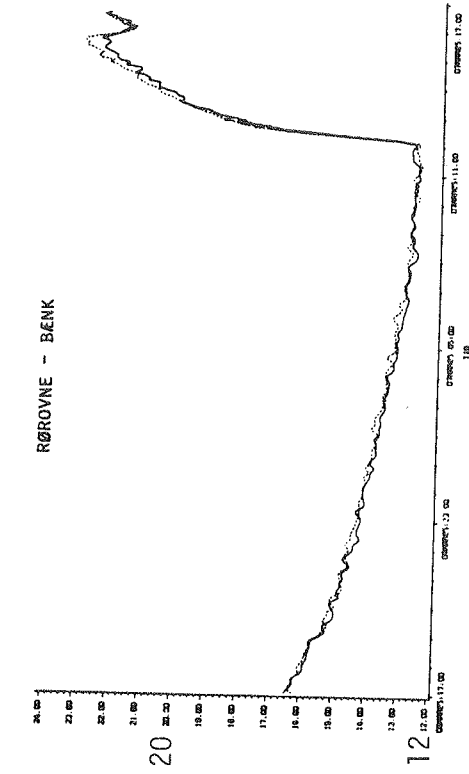
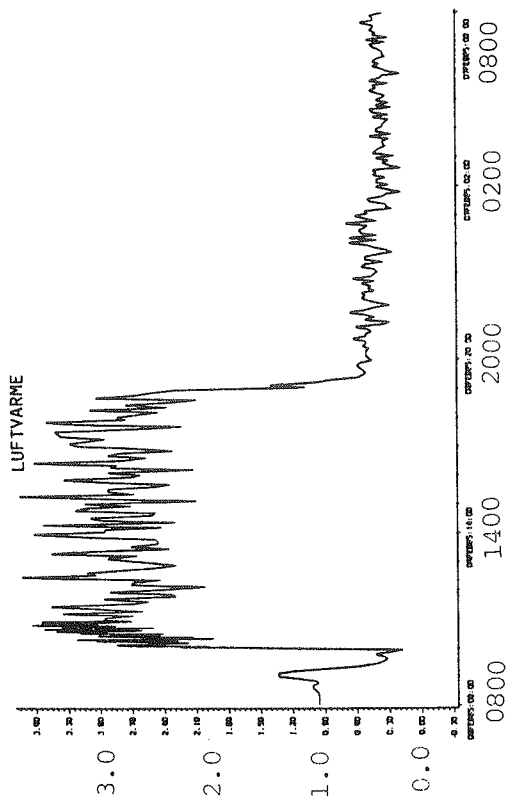
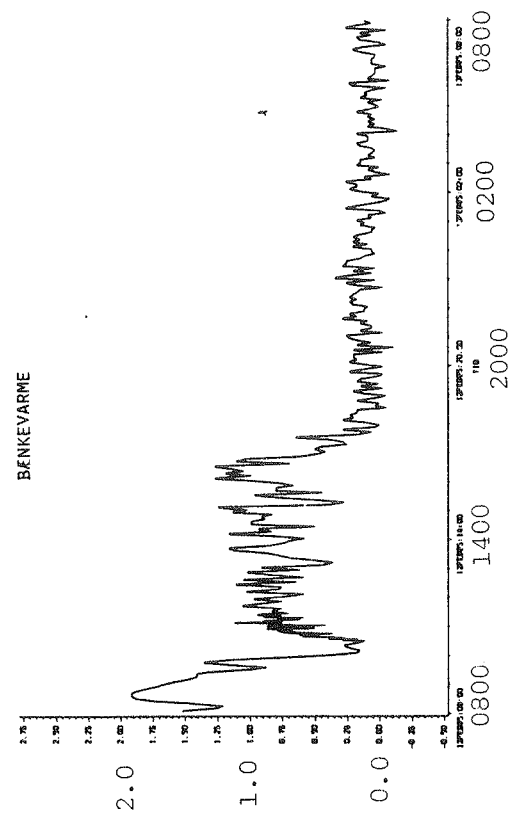


Fig. 12. Middellufttemperaturen i henholdsvis den vestlige og den østlige termosøjle.



FORSKEL MELLE M ØSTLIG OG VESTLIG MIDDELTEMPERATUR.

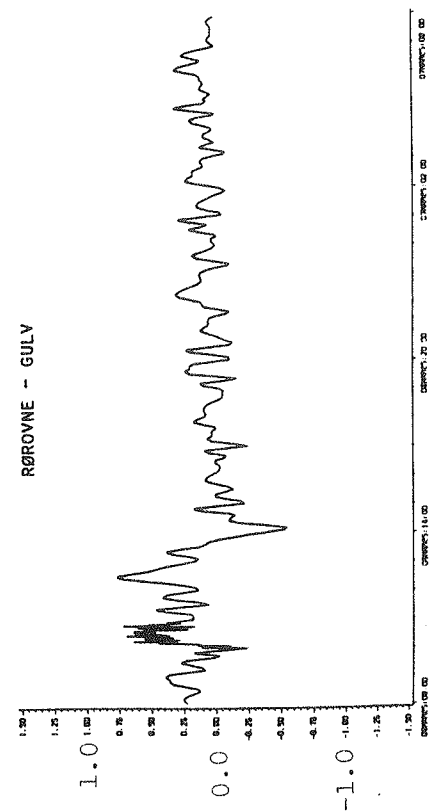
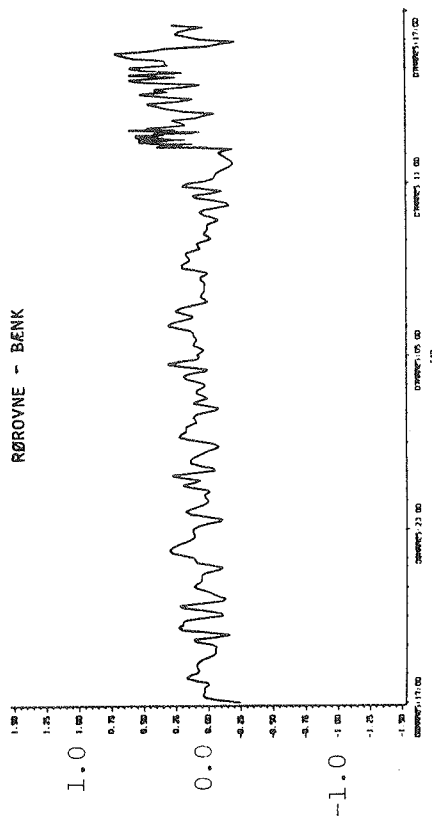
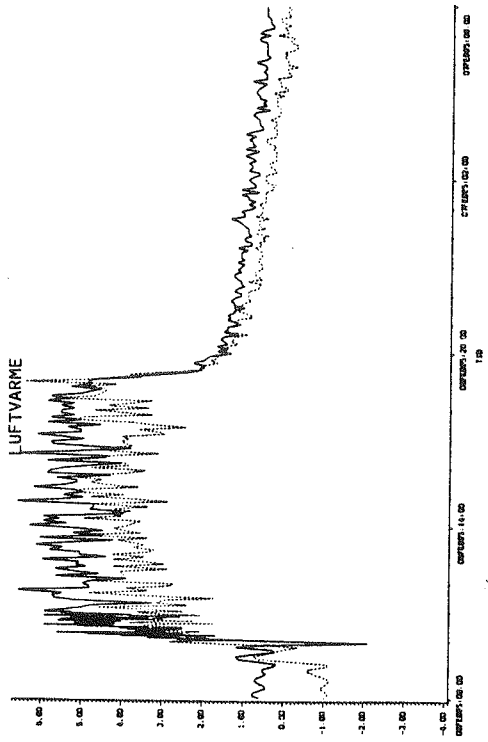
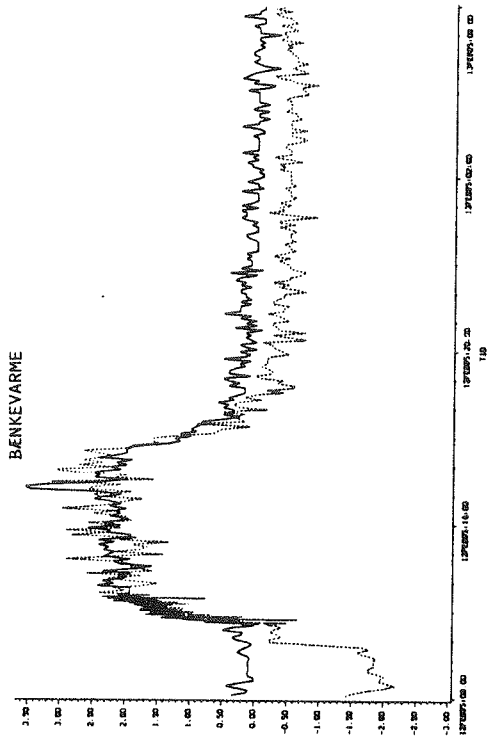


Fig. 13. Forskellen mellem $T_{\text{midøst}}$ og T_{midvest} fra fig. 12.



FULDT OPTRUKKET: LUFTTEMPERATURGRADIENT I VESTSIDEN.
STIPLET: LUFTTEMPERATURGRADIENT I ØSTSIDEN.

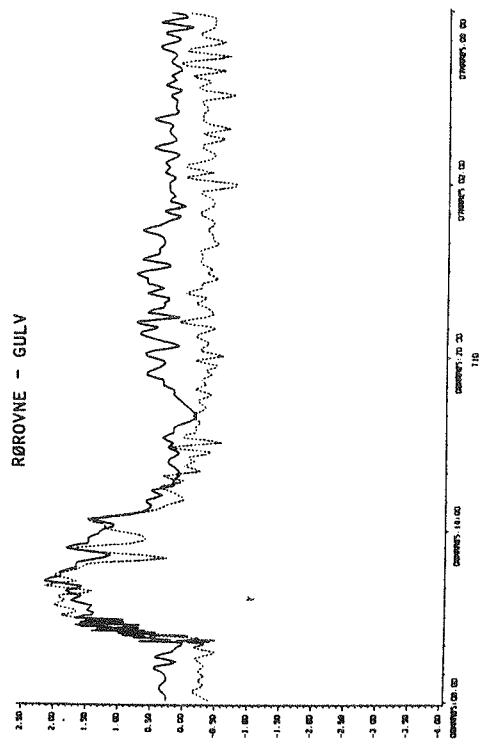
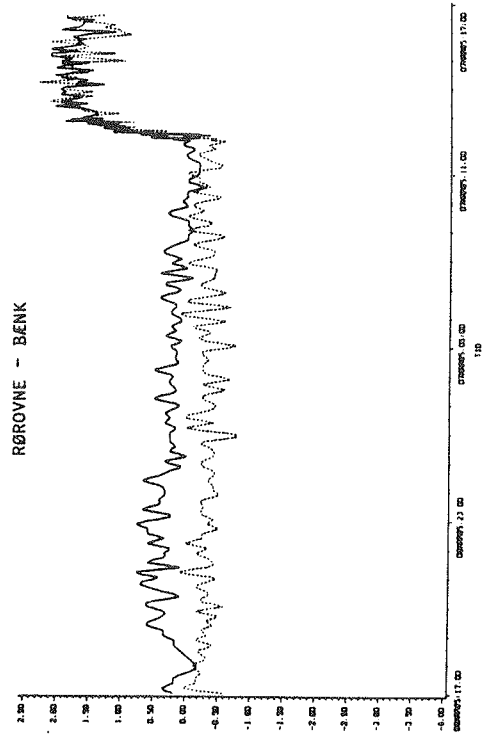
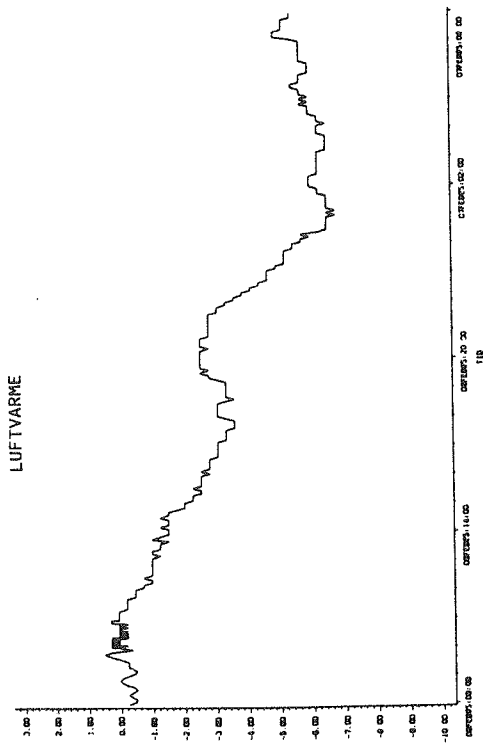
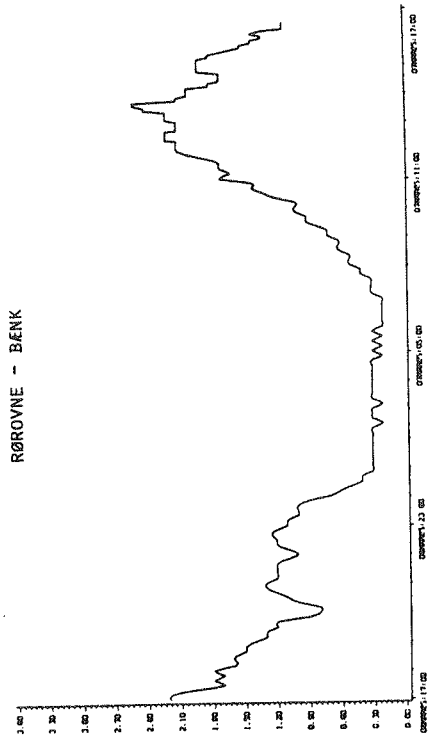
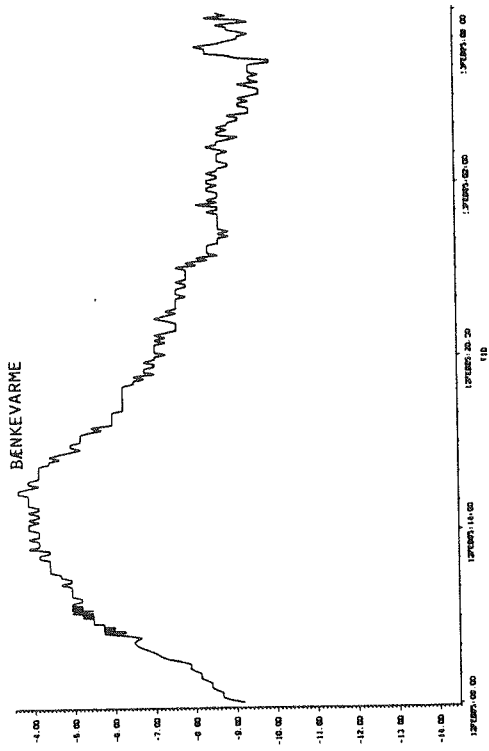


Fig. 14. Temperaturforskel mellem øverste og nederste lufttemperaturmålepunkt i henholdsvis vest- og østsiden.



UDETEMPERATUR I NORDSIDEN.

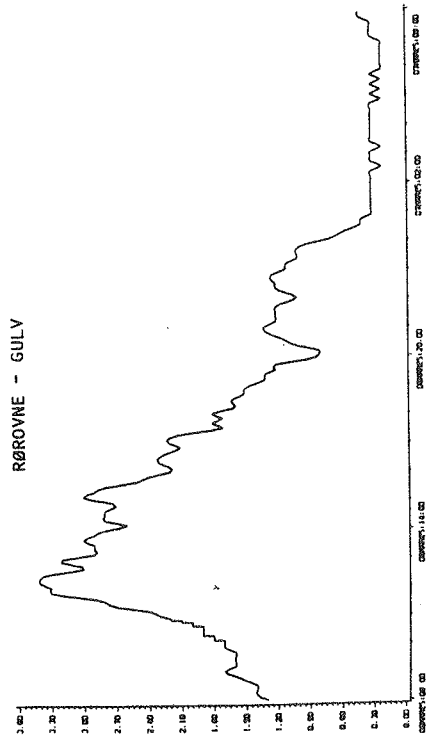
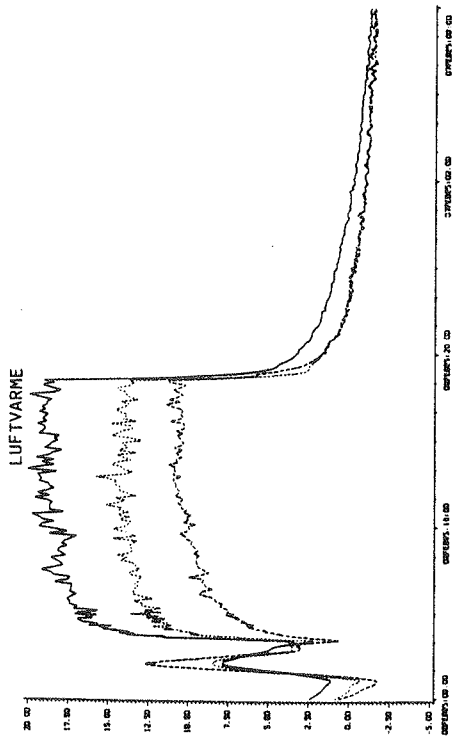
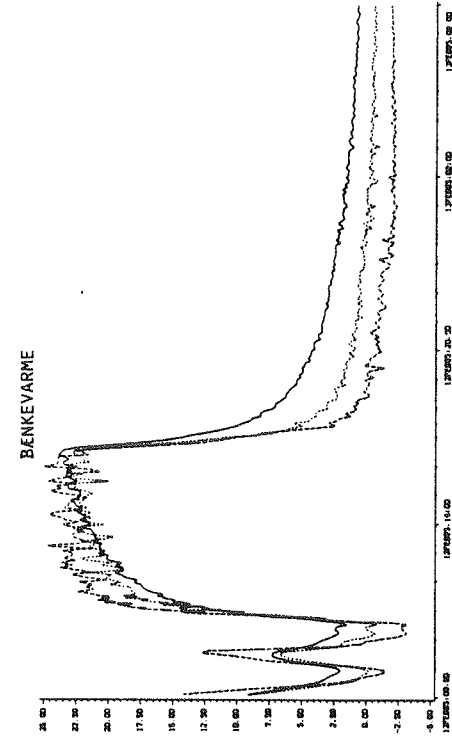


Fig. 15. Udetemperatur i nordsiden.



FULDT OPTUKKET: VARMESTRØM GENNEM VÆG ØVERST I W/M^2 .
KORT STIPELET: VARMESTRØM GENNEM VÆG I MIDTEN.
LANG STIPELET: VARMESTRØM GENNEM VÆG NEDERST.

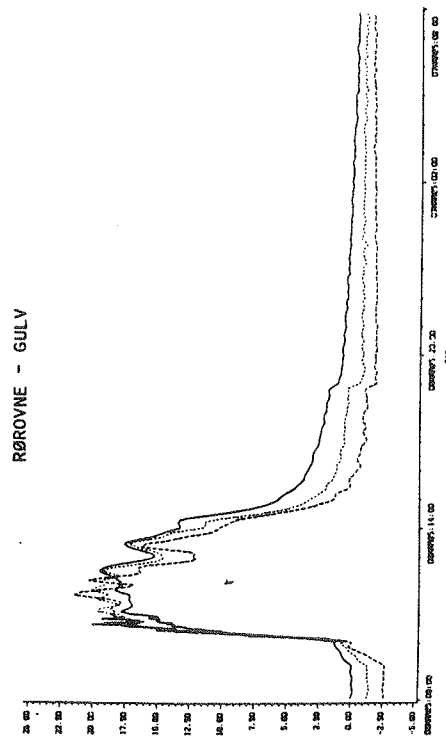
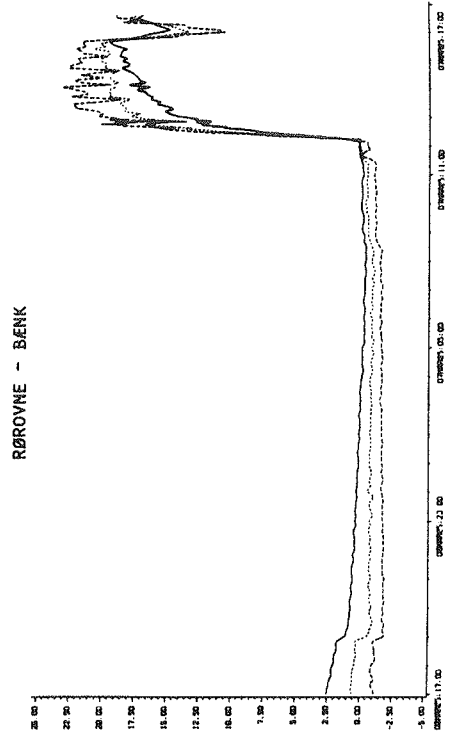
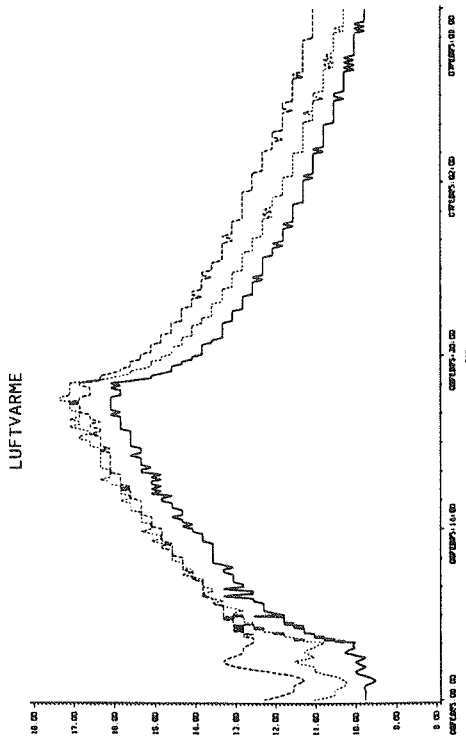
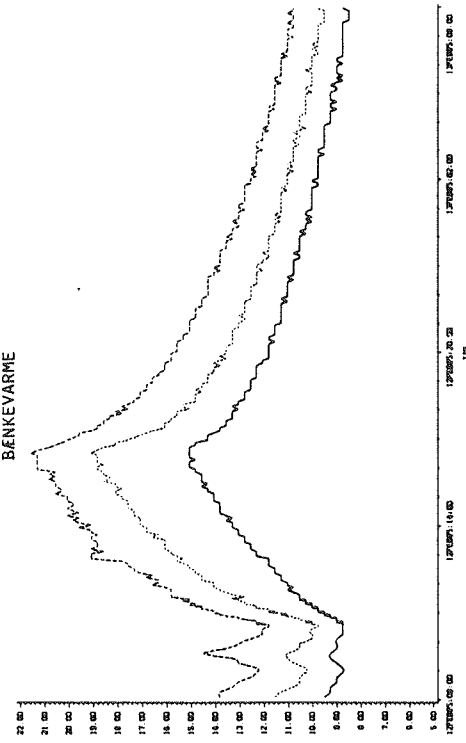


Fig. 16. Varmestrømmen igennem væggen i den østlige side af skibet i W/m^2 .



FULDT OPTRUKKET: OVERFLADETEMPERATUR PÅ VÆG ØVERST.
KORT STIPELET: OVERFLADETEMPERATUR PÅ VÆG I MIDTEN,
LANG STIPELET: OVERFLADETEMPERATUR PÅ VÆG NEDERST.

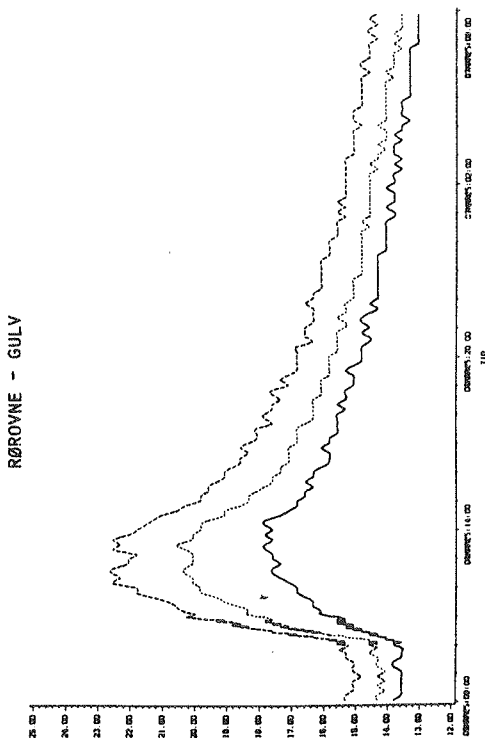
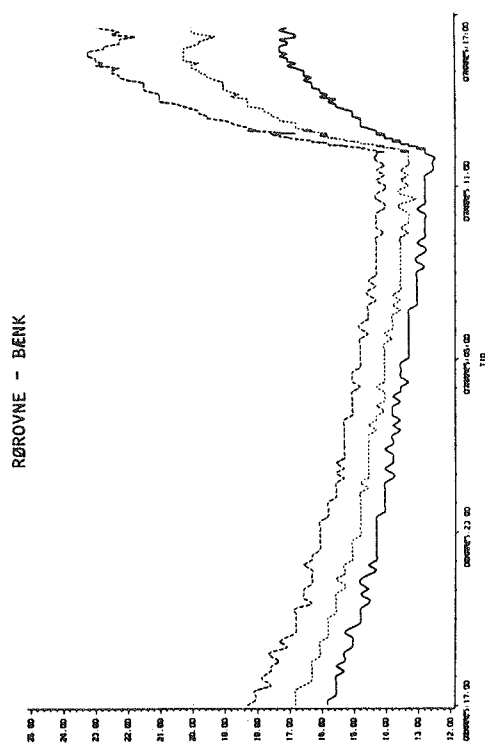
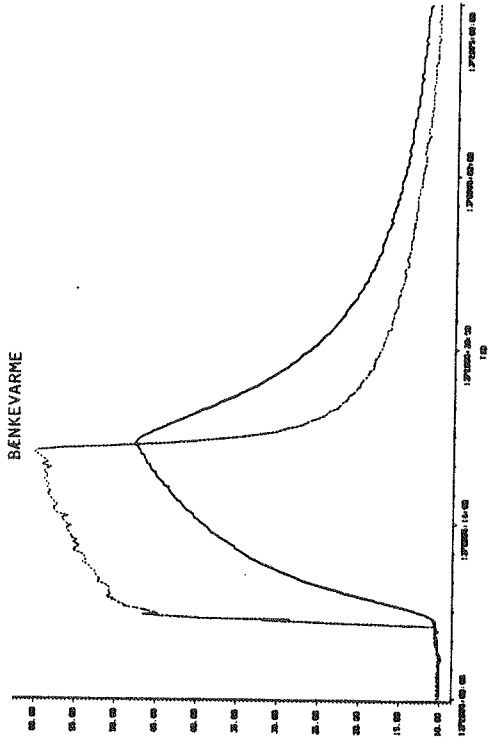
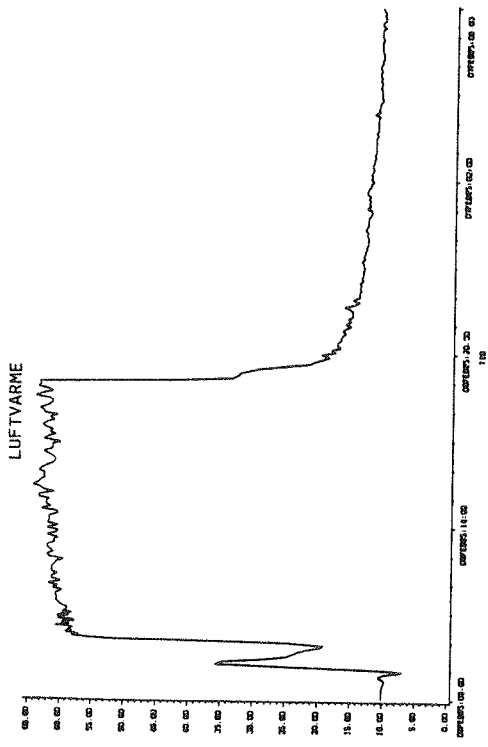


Fig. 17. De tilsvarende overfladetemperaturer i umiddelbar nærhed af varmemstrøms- målerne.



LUFTHV. OVERFLADETEMPERATUR PÅ VARMEGIVER, FOR BØNKEVARMEN ER VIST HHV, TEMPERATUR PÅ UNDERSIDE (STIPILET) OG OVERSIDE (FULDT OPTRUKKET)

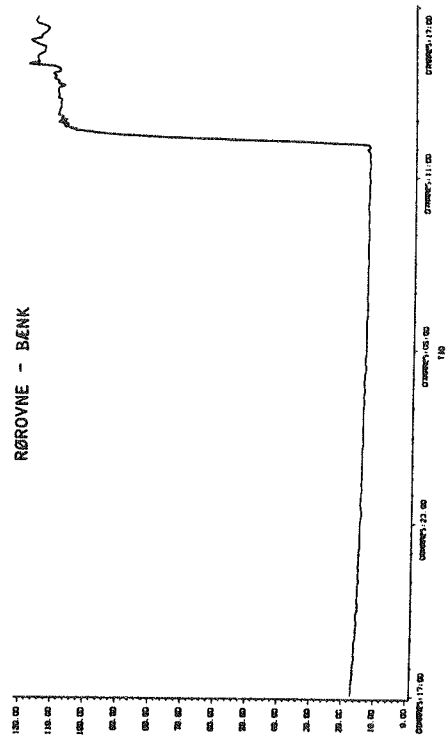
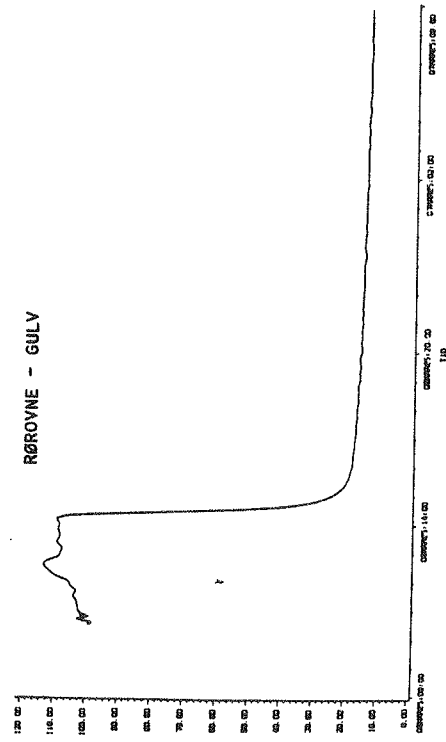
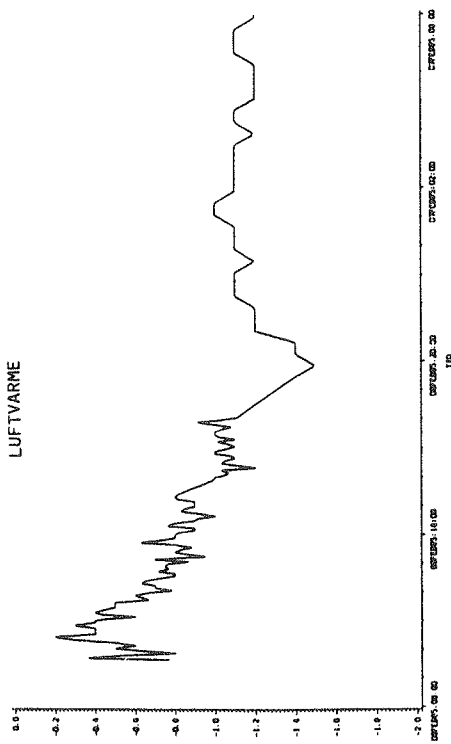
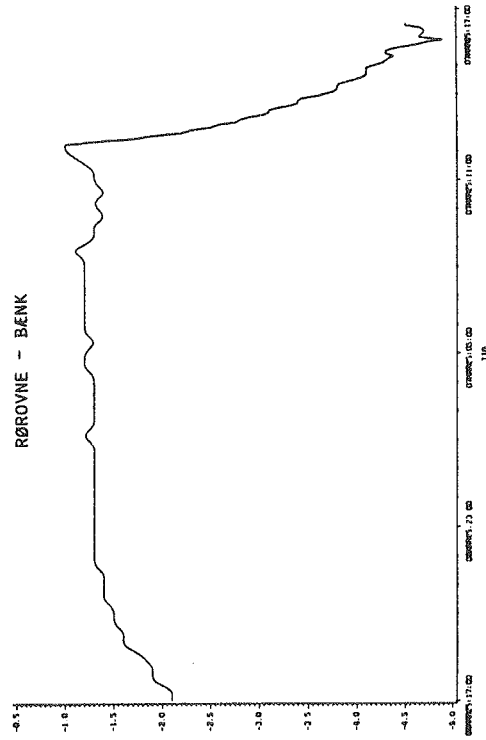
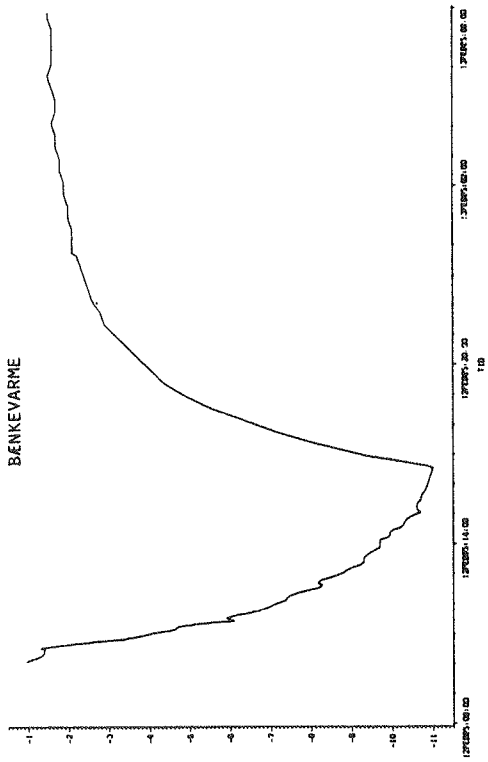


Fig. 18. Temperaturer i nærheden af varmegiverne.



STRÅLINGSASYMMETRI - POSITIV OPAD.

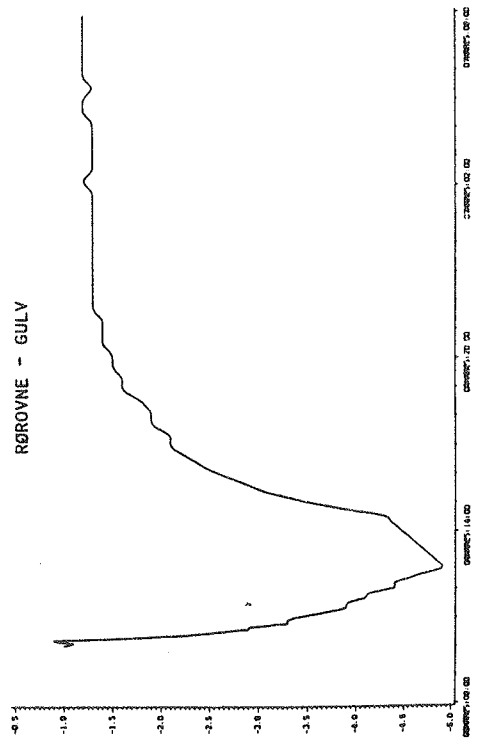
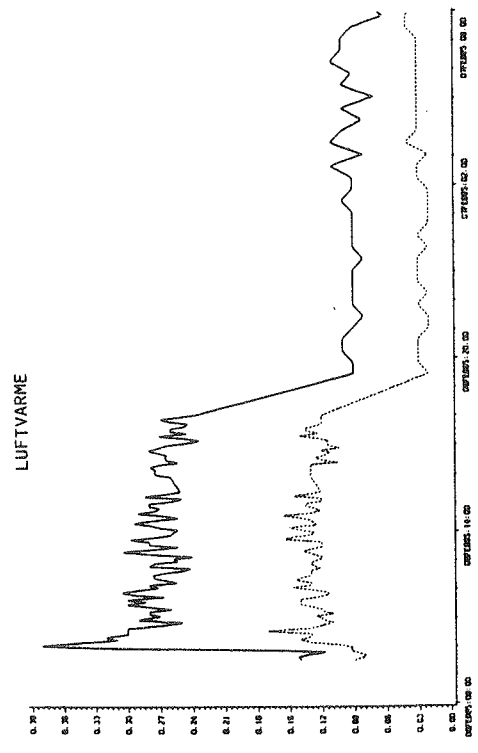
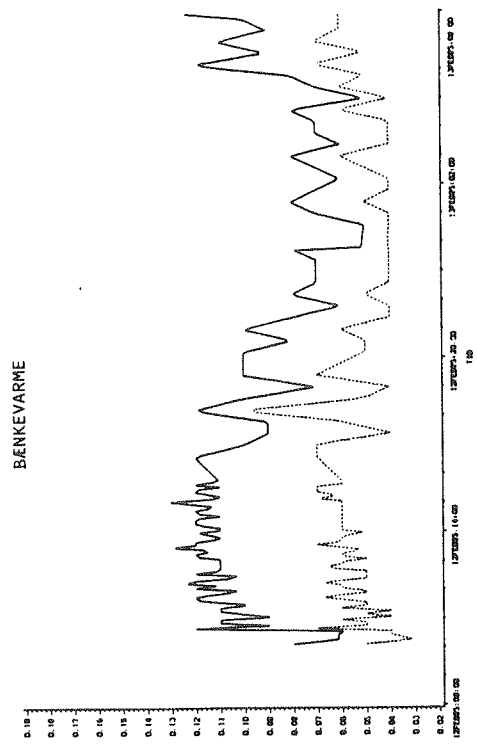


Fig. 19. Strålingsasymmetri regnet positivt opad.



FULDT OPTRUKKET: LUFTHASTIGHEDEN VED BÆNKEN I HOVEDHØJDE I M/SEK.
STIPELET: LUFTHASTIGHEDENS STANDARDAFVIGELSE I M/SEK.

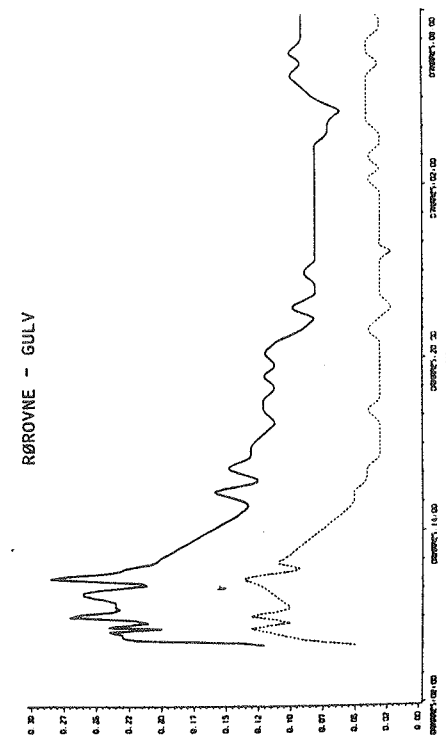
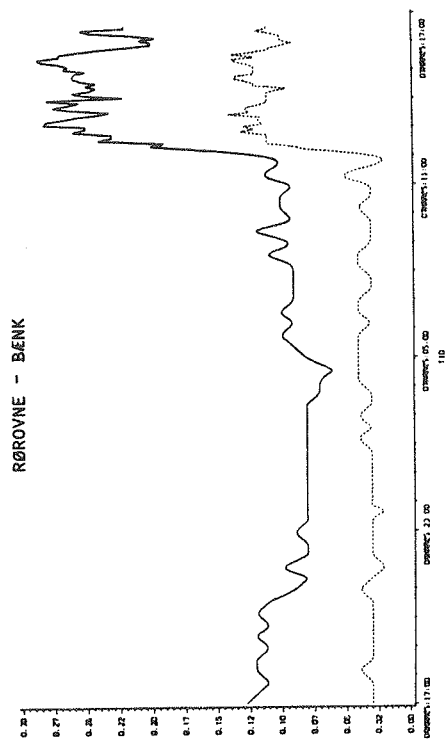
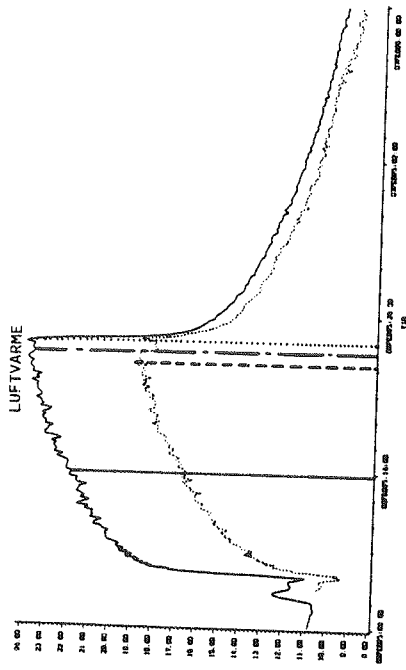
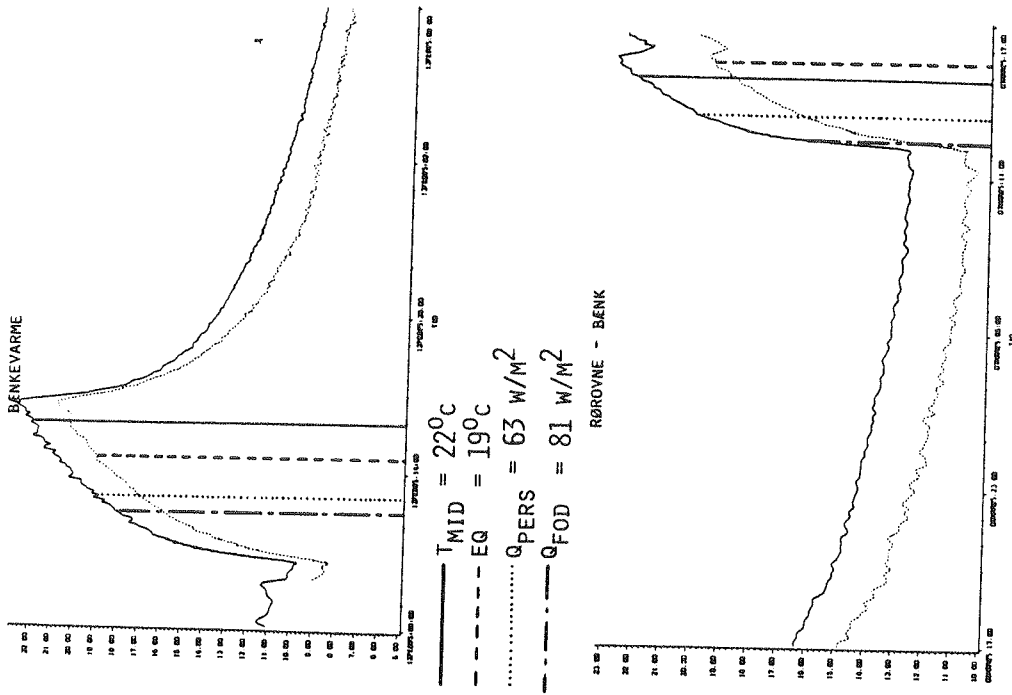


Fig. 21. Lufthastigheden og dens standardafvigelse i hovedhøjde i m/sek.

5.2. Vurdering af termisk komfort

Ved vurderingen af de forskellige varmesystemers evne til at skabe termisk komfort for kirkegængerne, indgår flere parametre. I tabellerne 2-5 er der foretaget sammenligninger af de 4 varmeanlæg på tidspunkter i opvarmningsforløbene med ens værdier for de vigtigste komfortvariable: T_{mid} , EQ, Q_{pers} og Q_{fod} . For definitioner, se afsnit 4.1. På fig. 23 ses, at tidspunkterne, på hvilke ens værdier for disse variable opnås i hvert opvarmningsforløb, varierer meget mellem de 4 varmeanlæg. Således opnås EQ = 19 °C for luftvarmeanlægget først efter ca. 8 timers opvarmning, mens de i rørovnstilfældene sker på 3 - 3,5 timer.



FULDT OPTRUKKET: MIDDELLUFTTEMPERATUR I SKIBET.
STIPLET: ÆKVIVALENTTEMPERATUR VED BÆNKEN I KROPSHØJDE.

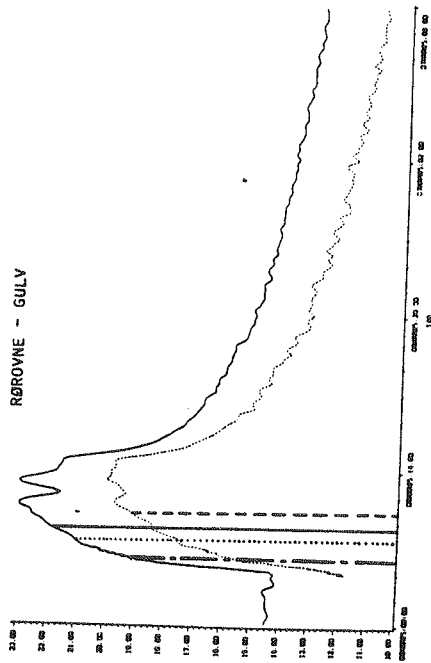


Fig. 23. Tidspunkter i opvarmningsforløbet for opnåelse af 4 komfortkriterier for de 4 varmeanlæg.

I tabellerne er foruden de 4 fastholdte parametre vist den lodrette temperaturgradient forstået som:

$$\begin{aligned} \text{Gradient} &\equiv 0,5 (T_{\text{vest5}} + T_{\text{\textcircled{O}st5}}) - 0,5 (T_{\text{vest1}} + T_{\text{\textcircled{O}st1}}) \\ &\equiv 0,5 ((T_{\text{vest5}} - T_{\text{vest1}}) + (T_{\text{\textcircled{O}st5}} - T_{\text{\textcircled{O}st1}})) \end{aligned}$$

og forskellen i varmestrøm mellem krop og ben, $Q_{\text{pers}} - Q_{\text{fod}}$. Desuden er temperaturen på bänkeryggens forside og bänkesædets overside under hynden vist, og sluttelig effekten og lufthastigheden. Alle værdier er fundet ved at tage gennemsnittet af 3 på hinanden følgende observationer.

Som det fremgår af tabel 2 er der store forskelle i komfortsituationen ved samme middellufttemperatur. EQ og Q_{pers} er et udtryk for den generelle termiske komfort, mens Q_{fod} og forskellen i Q-værdierne er et udtryk for lokale diskomfortproblemer. Det tilstræbes at forskellen mellem Q_{pers} og Q_{fod} er tæt på nul og helst lidt positiv som i gulvtilfældet med rørovne, idet fødderne er mest udsatte for træk og kulde. Det ses at forholdene er uacceptable for luftvarmetilfældet og bänkevarmen. Den samlede komfort må nok siges at være størst i tilfældet med rørovne under bänkene, idet der her er en lav varmeafgivelse generelt, og denne er lige stor for fødder og krop. Q_{pers} er en bedre indikator for den generelle komfort end EQ, idet EQ kun måler komforttemperaturen i et punkt. Det ses i denne forbindelse at komfortmåleren ikke registrerer de komfortmæssige forbedringer som skabes ved at hæve rørovnene fra gulvet op under bänkene.

Endvidere ses det at lufthastigheden for rørovnene er ret høj i hovedhøjde. Dette skyldes den varme opadstigende lufts bevægelse som ikke giver særlig anledning til trækproblemer. I tabel 3 og 4 kan man få et indtryk af komfortfølerens evne til at vurdere den generelle termiske komfort, idet EQ=konstant og $Q_{\text{pers}}=$ konstant skulle betyde det samme, men i tabel 3 ses det at Q_{pers} veksler meget selv om EQ er konstant,

og i tabel 4 at EQ ved samme Q_{pers} -værdi ikke er konstant. Ellers er hovedtrækkene de samme som i tabel 2. I tabel 5 er Q_{fod} konstant, men på et så højt niveau, at en sammenligning kun har teoretisk interesse.

Konklusionen er at komfortmæssigt set er placeringen af rørovnene lige under bænke den bedste løsning. Placering ved gulvet medfører en højere varmeafgivelse fra personen og kræver dermed en højere middeltemperatur og d.v.s. et højere energiforbrug. Af de lokale varmeanlæg er bænkevarmeanlægget mindst energikrævende, men med noget ringere komfortegenskaber end de to rørovnanslæg.

FAST VÆRDI FOR T_{MID}

		LUFTVARME	BÆNKEVARME	RØROVNE (GULV)	RØROVNE (BÆNK)
EQ	°C	16,5	20,2	18,5	18,7
T_{MID}	°C	22,0	22,0	22,0	22,0
LODRET GRADIENT	°C	8,6	3,9	3,1	3,3
Q_{pers}	W/m ²	72,5	48,7	59,8	50,8
Q_{fod}	W/m ²	91,9	57,9	56,8	51,0
FORSKEL	W/m ²	-19,3	-9,2	3,0	-0,2
T_{ryg}	°C	17,7	26,1	21,3	22,2
$T_{sæde}$	°C	14,5	45,8	18,2	22,3
P_{varme}	kW	22,0	32,0	40,0	40,0
V_{mid}	m/sec	0,26	0,11	0,25	0,26

Tabel 2. Sammenligning mellem komforttilstanden ved brug af de forskellige varmesystemer ved samme middellufttemperatur.

FAST VÆRDI FOR EQ

		LUFTVARME	BÆNKEVARME	RØROVNE (GULV)	RØROVNE (BÆNK)
EQ	°C	19,0	19,0	19,0	19,0
T_{mid}	°C	23,7	21,1	22,4	22,4
LODRET GRADIENT	°C	8,2	3,6	3,2	3,3
Q_{pers}	W/m ²	64,1	53,1	56,8	48,6
Q_{fod}	W/m ²	82,2	63,3	54,3	49,7
FORSKEL	W/m ²	-18,1	-10,2	2,5	-1,1
T_{ryg}	°C	20,2	24,8	22,0	22,7
$T_{sæde}$	°C	17,3	41,9	18,9	23,1
P_{varme}	kW	22,0	32,0	40,0	39,0
V_{mid}	m/sec	0,23	0,12	0,24	0,27

Tabel 3. Sammenligning af de fire varmesystemer ved samme ækvivalenttemperatur $EQ = 19$ °C.

FAST VÆRDI FOR Q_{PERS}

		LUFTVARME	BËNKEVARME	RØROVNE (GULV)	RØROVNE (BËNK)
EQ	°C	18,0	16,8	18,0	16,6
T_{mid}	°C	23,7	18,8	21,5	20,1
LODRET GRADIENT	°C	8,3	3,7	2,8	3,0
Q_{PERS}	W/m ²	63,0	63,0	63,0	63,0
Q_{fod}	W/m ²	80,6	75,7	59,9	61,1
FORSKEL	W/m ²	-17,8	-12,5	3,6	2,0
T_{ryg}	°C	19,9	22,0	20,6	19,4
$T_{\text{sæde}}$	°C	17,3	33,8	17,7	17,6
P_{varme}	kW	22,0	32,0	40,0	39,0
V_{mid}	m/sec	0,16	0,11	0,24	0,24

Tabel 4. Sammenligning mellem de fire varmesystemer ved konstant varmeafgivelse fra den termiske manikin.

FAST VÆRDI FOR Q_{FOD}

		LUFTVARME	BËNKEVARME	RØROVNE (GULV)	RØROVNE (BËNK)
EQ	°C	18,7	15,9	15,2	12,6
T_{mid}	°C	23,6	18,1	18,9	16,3
LODRET GRADIENT	°C	8,7	3,4	1,6	2,0
Q_{pers}	W/m ²	63,4	67,4	87,3	87,4
Q_{FOD}	W/m ²	81,0	81,0	81,0	81,0
FORSKEL	W/m ²	-17,7	-13,1	6,0	6,4
T_{ryg}	°C	20,1	21,1	17,6	15,9
$T_{\text{sæde}}$	°C	17,5	30,6	15,4	14,7
P_{varme}	kW	22,0	32,0	40,0	39,0
V_{mid}	m/sec	0,19	0,11	0,24	0,21

Tabel 5. Sammenligning mellem de fire varmesystemer ved konstant varmeafgivelse fra den termiske manikins fødder.

5.3. Lufthastighedsmålinger

For luftvarmeanlægget og bænkevarmeanlægget er der i forbindelse med opvarmningsforsøgene udført en række lufthastighedsmålinger rundt om i kirken. Disse har fundet sted lige umiddelbart før opvarmningsperiodens afslutning, og er foretaget i hhv. 110 cm og 10 cm's højde over gulvet.

Resultatet af disse målinger er anskueliggjort i Fig. 24 og 25. Det antages at forholdene i tilfældet med rørovn tilnærmelsesvis kan sammenlignes med tilfældet hvor bænkevarmen er tilsluttet.

For luftvarmeanlægget iagttages lufthastigheder på helt op til 0,8 m/s (se Fig. 24), hvilket er uacceptabelt for menigheden. Ganske vist vil lufthastighederne være halveret, idet lufthastigheden i kalorifererne halveres under gudstjeneste, men selv dette niveau vil være uacceptabelt. Det ses at lufthastighederne er ca. dobbelt så høje i østskibet som i vestskibet. I øvrigt ses det at præsten kan blive udsat for trækproblemer på prædikestolen.

I bænkevarmetilfældet er lufthastighederne betydeligt mindre. Imidlertid iagttages her lufthastigheder ved gulvet på op til 0,3 m/s, hvilket især i denne højde er betænkeligt, p.g.a. afkøling af fødder og ankler.

LUFTVARME

Fordeling af lufthastigheden
forskellige steder i kirken.
Øverst i 110 cm's højde.
Nederst i 10 cm's højde.

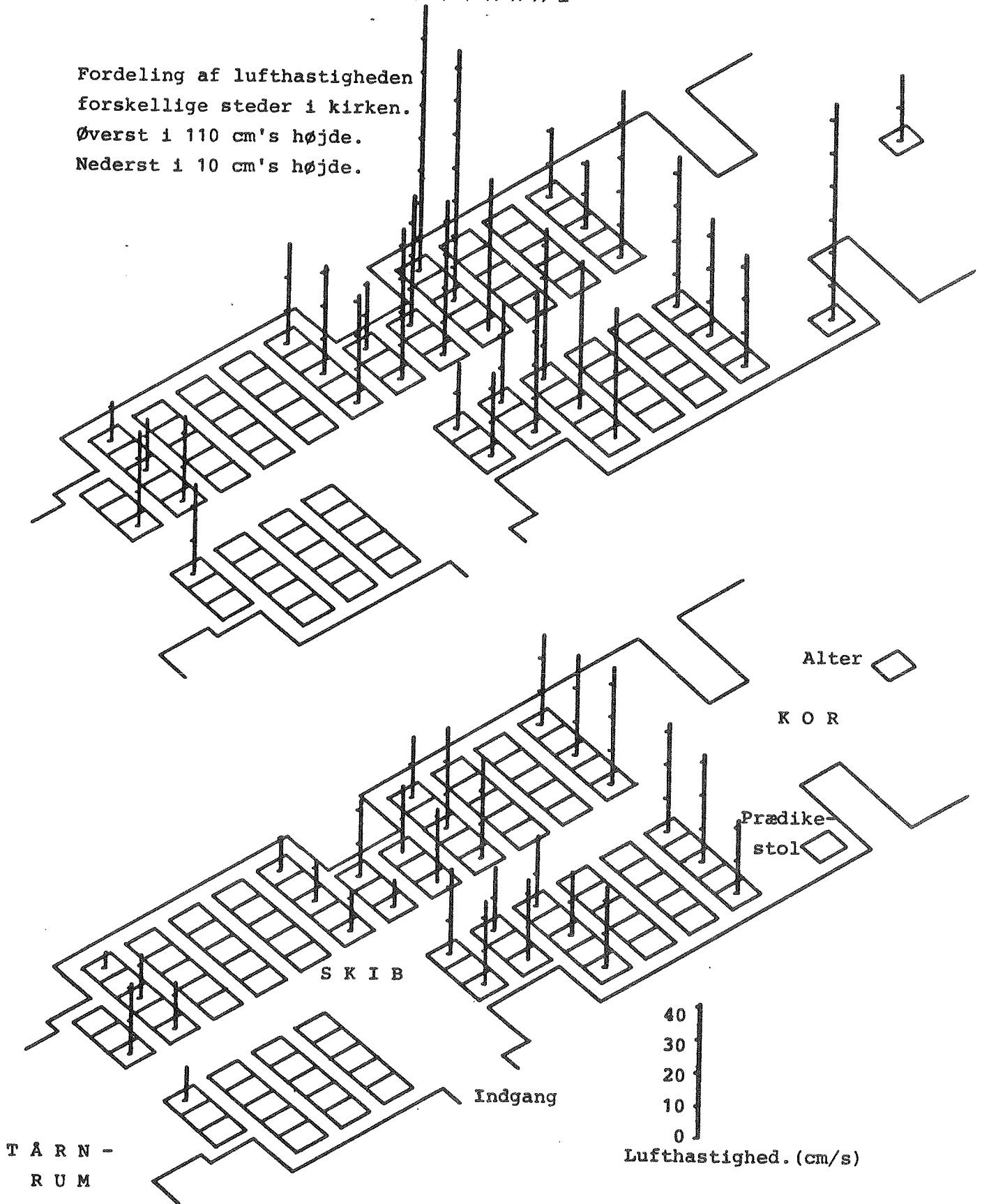


Fig. 24. Lufthastighedsfordeling i opholdszonen ved luftopvarmning.

BÆNKEVARME

Fordeling af lufthastigheden
forskellige steder i kirken.
Øverst i 110 cm's højde.
Nederst i 10 cm's højde.

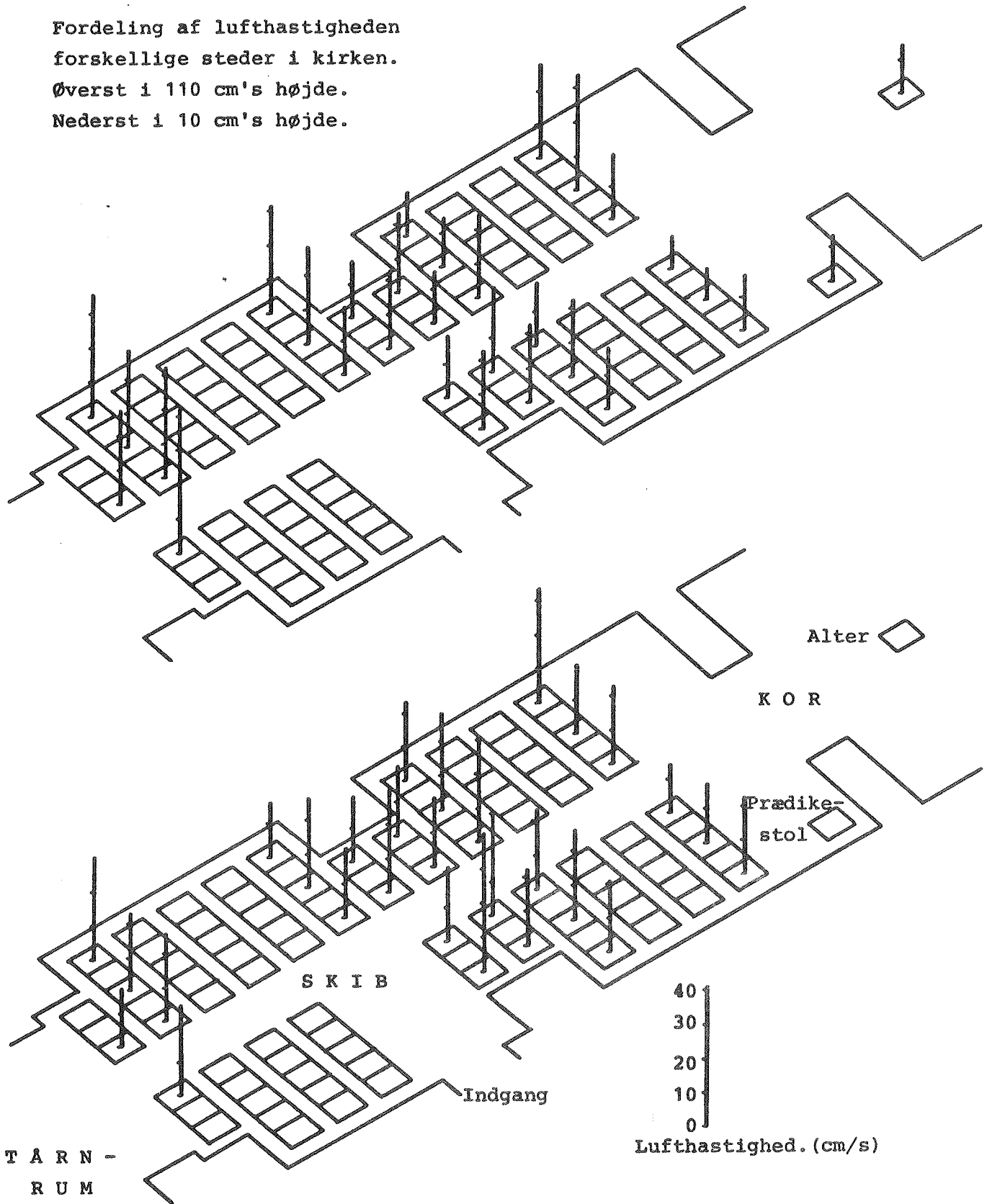


Fig. 25. Lufthastighedsfordeling i opholdszonen ved bænkevarme.

5.4. Interviewundersøgelser

I forbindelse med gudstjenester om søndagen blev der runddelt det føromtalte spørgeskema (fig. 10) som menigheden udfyldte og afleverede efter gudstjenesten. Resultaterne af disse undersøgelser ses på fig. 26, 27 og 28 og en oversigt findes på fig. 29. Statistisk var resultaterne som vist i tabel 6.

Forsøg	antal	for koldt				for varmt				fodkoldt	
		start		slut		start		slut		n	%
		n	%	n	%	n	%	n	%		
Luftvarme	42	2	5	5	12	1	2	3	7	17	40
Bænkevarme	36	4	11	3	8	0	0	1	3	8	22
Rørovne (gulv)	53	1	2	8	15	4	8	6	11	9	16

Tabel 6. Resultat af interviewundersøgelse vedr. termisk komfort.

Det er signifikant at 40% af de adspurgte føler fodkulde i forbindelse med luftvarmeanlægget, hvorimod de fleste finder at det i øvrigt hverken er for varmt eller for koldt. Set samlet giver de lokale opvarmningsanlæg ikke overraskende den mindst ringe komfortoplevelse.

INTERVIEWUNDERSØGELSE LUFTVARME

GUDSTJENESTE D. 27/1
EFFEKT 32KW

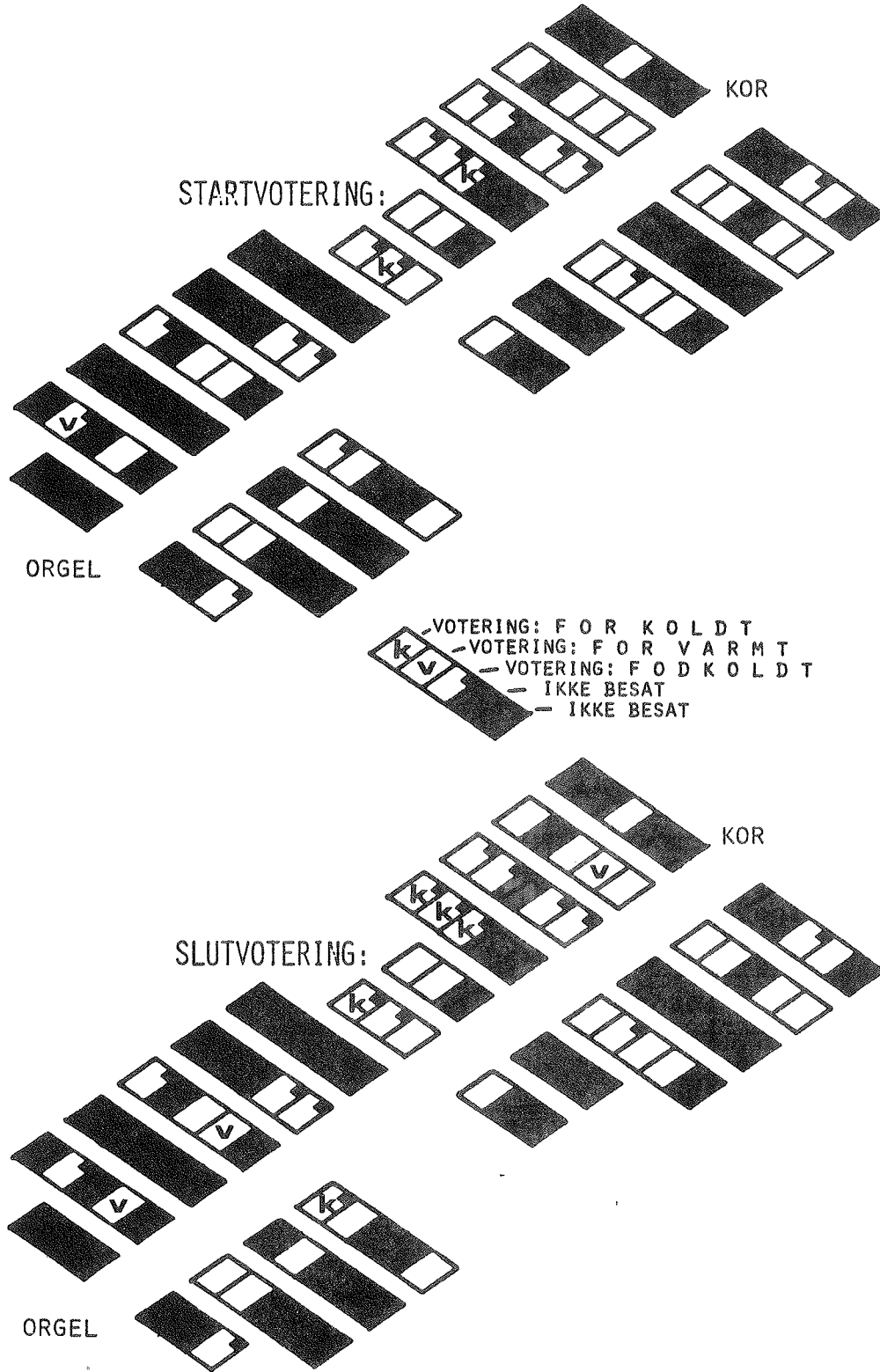


Fig. 26. Resultat af interviewundersøgelse ved gudstjenestens begyndelse og slutning. Luftvarme.

INTERVIEWUNDERSØGELSE

BÆNKEVARME

GUDSTJENESTE D. 10/2

EFFEKT 36KW

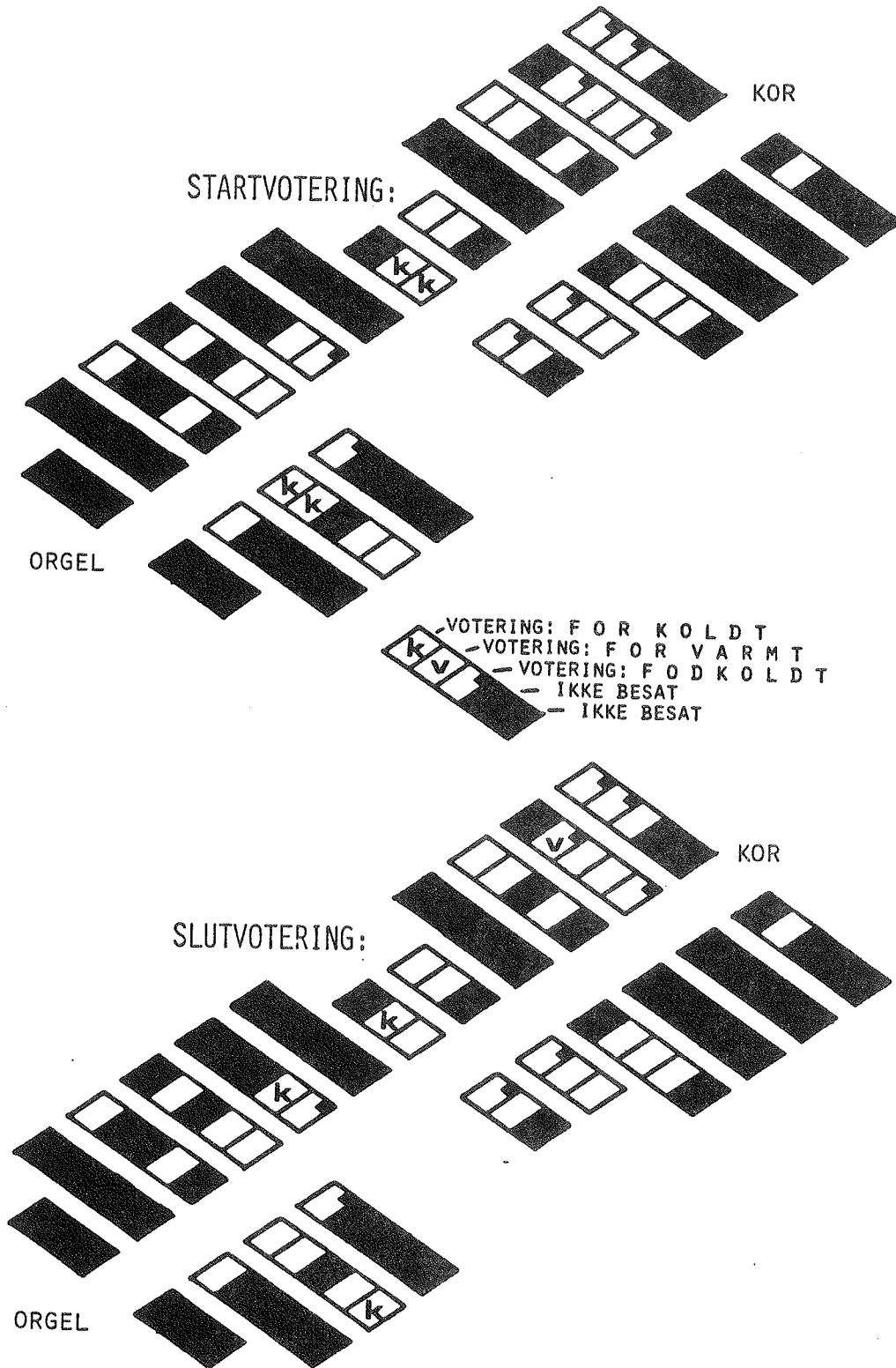


Fig. 27. Resultat af interviewundersøgelse ved gudstjenestens begyndelse og slutning. Bænkevarme.

INTERVIEWUNDERSØGELSE RØROVNE

GUDSTJENESTE D. 10/3
EFFEKT 39KW

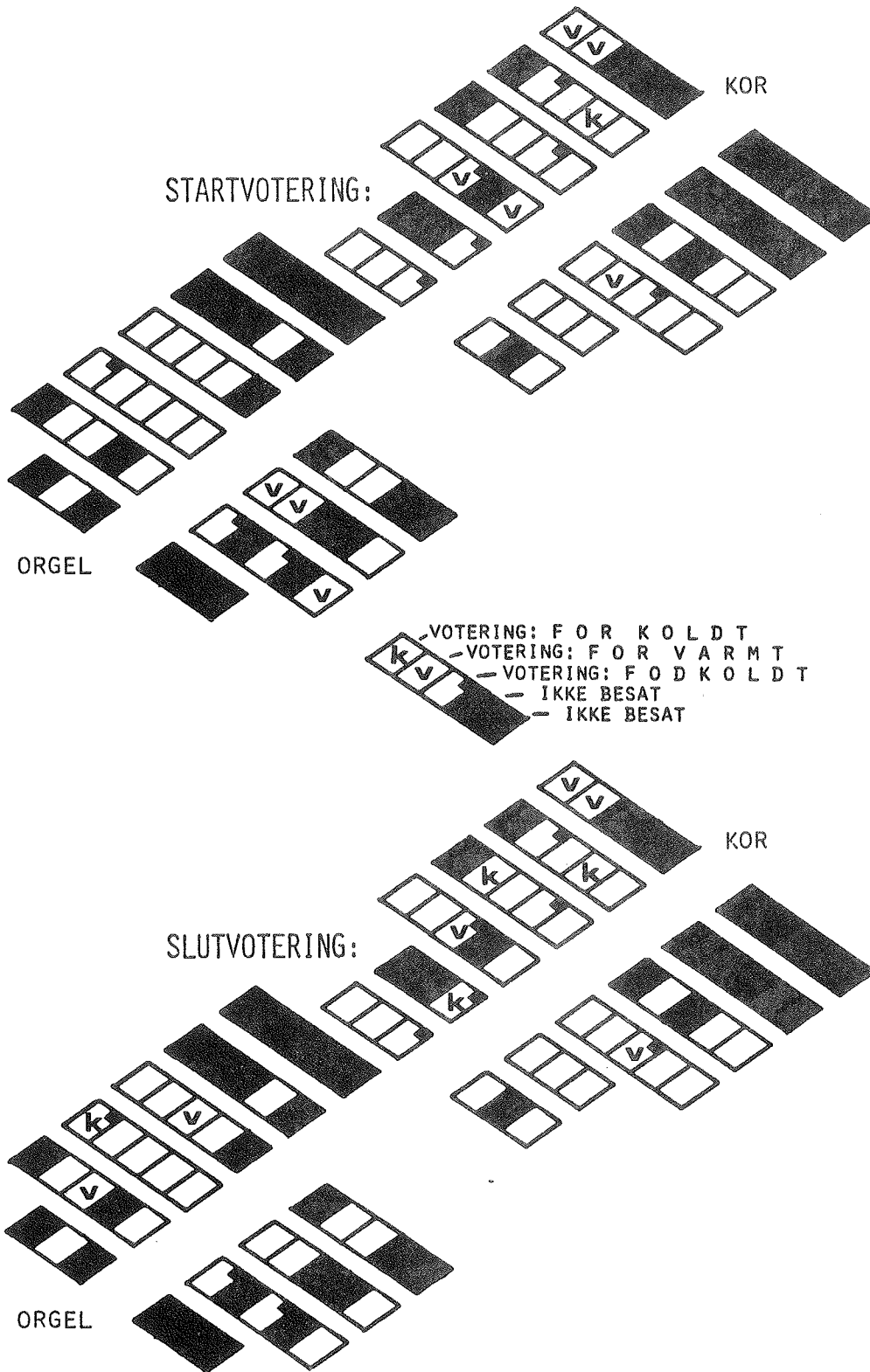


Fig. 28. Resultat af interviewundersøgelse ved gudstjenestens begyndelse og slutning. Rørovne under kirkebænke.

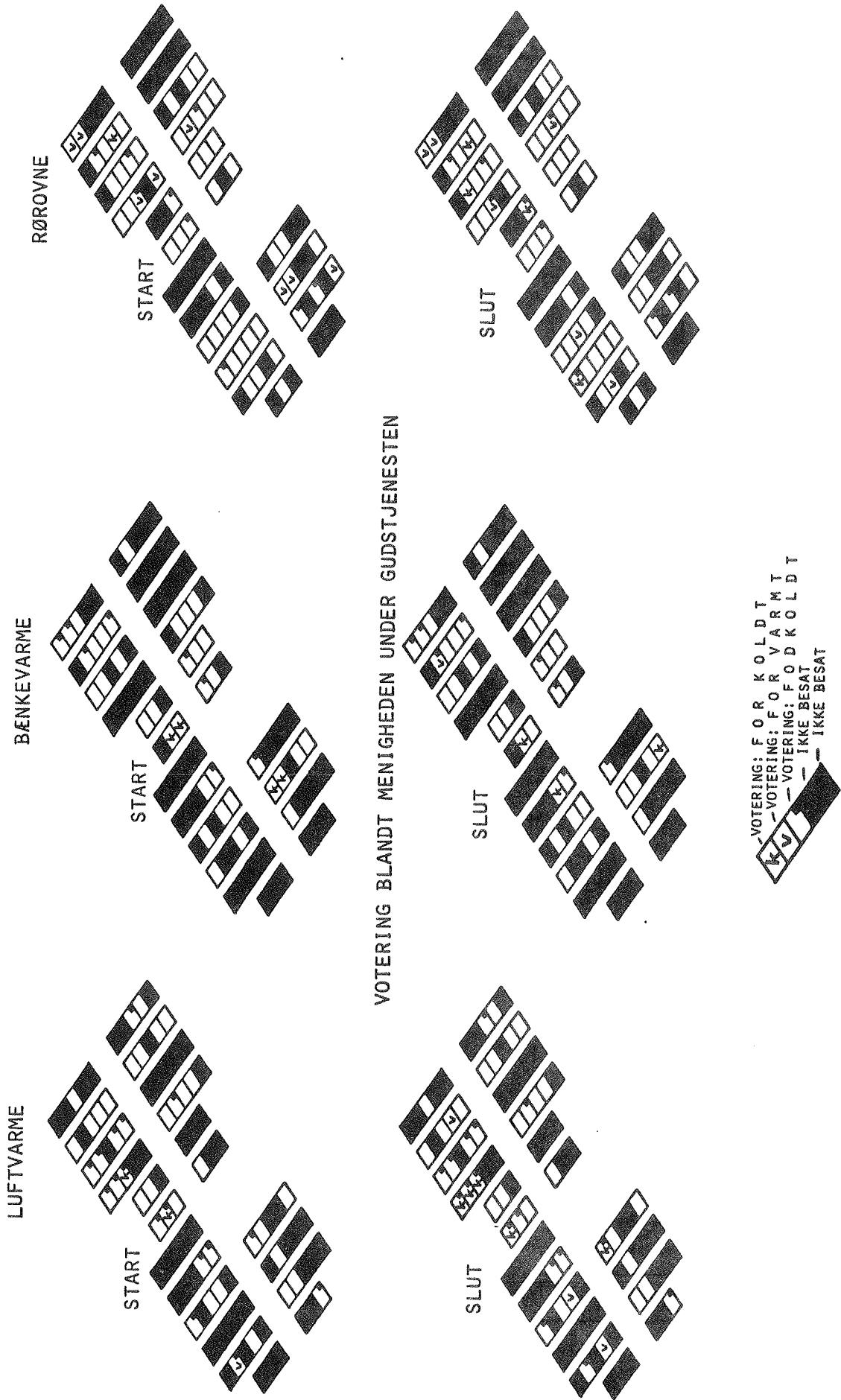


Fig. 29. Oversigt over votering om temperaturoplevelse før og efter gudstjenesten ved henholdsvis luftvarme, bænkevarme og rørovne under kirkebænke.

5.5. Energiforbrug

I hver forsøgsperiode er energiforbruget til el og lys og varme registreret, og man kan da sammenligne de forskellige varmesystemers evne til at varme kirkerummet op til en given lufttemperatur, eller til at forøge ækvivalenttemperaturen med et vist antal grader. Problemet i denne vurdering er, at der under de forskellige forsøg har været forskellige ydre betingelser d.v.s. udetemperatur, lufthastighed og solindfald. Derfor er en kompensering for disse forskelle nødvendig i selve sammenligningsfasen.

Af denne grund er det vigtigt at få en vurdering af varmetabet fra kirken i de forskellige situationer, så opvarmningseffektiviteten kan bestemmes alene ud fra energiforbruget i selve kirkerummet (d.v.s. totalt forbrug minus tab til omgivelserne).

Dette varmetab kan beregnes eller rettere estimeres på forskellig måde. I første omgang er det gjort ud fra en bestemmelse af de registrerede varmestømme ud gennem dels vægge og dels hvælvet.

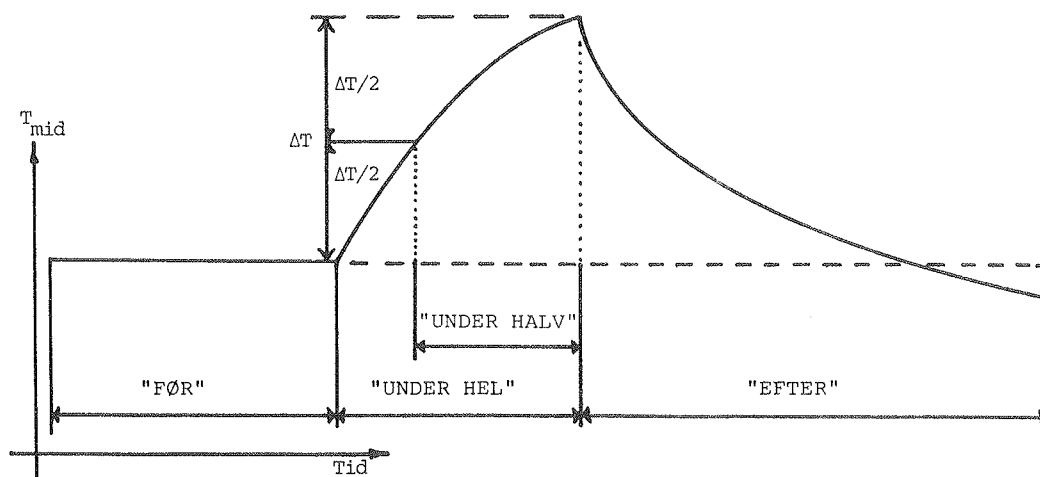


Fig. 30. Skematisk opdeling af forsøgsperioden.

På fig. 30 er vist en opdeling af forsøgsperioden i de faser, som har dannet baggrund for en midling af de enkelte varmemestrømme i de pågældende perioder. "Under 1/2" perioden er karakteriseret ved at være den periode som forløber fra det tidspunkt hvor lufttemperaturen har nået halvdelen af forskellen mellem start- og slutværdien, og til slutningen af opvarmingsperioden. "Under 1/1 perioden" er den samlede opvarmingsperiode. I tabel 7 er så vist de tilsvarende tidsmidlede værdier af de forskellige varmemestrømme samt overfladetemperaturer. Desuden er vist gennemsnittet af de 3 vægvarmestrømme og de 3 vægoverfladetemperaturer, og endvidere udelufttemperaturen (her kaldet T_{out}), vinduestemperaturen (T_{win}) og

$$D_{out} = T_{qmid} - T_{out}.$$

Ud fra disse værdier kan der laves en bestemmelse af den omtrentlige varmestrøm ud af kirken i de forskellige perioder.

	Q _{bot}	T _{bot}	Q _{med}	T _{med}	Q _{top}	T _{top}	Q _{mid}	T _{qmid}	D _{out}	T _{out}	T _{win}	Q _{iso}	Q _{fri}
FØR													
LUFVARME	3,1	12,1	3,2	10,9	3,8	9,9	3,4	11,0	10,0	0,8	6,1	3,7	12,7
BÆNKEVARME	3,8	12,6	3,7	10,8	4,6	9,2	4,0	10,9	19,5	-9,2	1,4	2,4	17,1
RØROVNE	4,9	19,0	4,9	16,9	6,3	15,3	5,4	17,1	16,7	1,2	9,7	.	.
UNDER 1/1													
LUFVARME	8,2	14,4	12,4	14,2	16,8	13,3	12,5	13,9	21,8	-1,2	8,1	21,0	30,8
BÆNKEVARME	17,7	16,4	15,9	14,0	15,6	11,3	16,4	13,9	21,6	-4,9	5,4	21,5	33,6
RØROVNE	13,2	18,1	13,1	16,8	11,5	15,0	12,6	16,6	16,7	2,1	11,1	17,8	24,0
UNDER 1/2													
LUFVARME	8,8	14,6	13,1	14,5	17,5	13,5	13,1	14,2	22,4	-1,3	8,2	21,5	31,6
BÆNKEVARME	22,7	18,9	21,1	16,5	20,9	13,0	21,6	16,1	24,2	-4,3	7,2	27,6	39,0
RØR	17,3	19,2	17,1	17,7	14,9	15,6	16,4	17,5	17,9	2,3	11,7	19,3	25,2
EFTER													
LUFVARME	-0,3	12,5	-0,3	11,9	0,5	11,3	-0,0	11,9	17,2	-5,5	0,8	-3,2	10,8
BÆNKEVARME	-0,7	13,3	1,0	11,6	3,1	10,2	1,1	11,7	19,1	-7,7	1,7	3,9	11,4
RØROVNE	-1,1	16,0	-0,2	14,9	0,9	14,2	-0,2	15,1	13,3	1,1	8,7	3,5	7,0

Tabel 7. Varmestrømme og overfladetemperaturer i de på fig. 6 side 13 viste målepunkter før, under og efter en opvarmning med de forskellige varmesystemer.

Ved vurdering af udetemperaturens indflydelse kan man ikke regne med temperaturforskellen over væggen som et proportionalt udtryk for varmestrømmen, idet der ikke på noget tidspunkt optræder stationære tilstande i væggen, varmedynamisk set. Som et udtryk for udetemperaturens virkning introduceres her en formodet beskrivelse på følgende måde: Hvis man i en tilnærmet model ækvivalerer varmetabet udadtil fra kirken med temperaturforskellen mellem væggens inder- og yderside, skal udetemperaturen opfattes som en midling af temperaturen inden for de seneste 14 dage før det aktuelle tidspunkt:

$$T_{ude} = 1/4 T_{ude}(ugex) + 1/2 T_{ude}(ugex-1) + 1/4 T_{ude}(ugex-2),$$

Da en registrering af T_{ude} ikke har fundet sted, beregnes $T_{ude}(ugex)$ ud fra graddagetallet for de forskellige uger:

$$T_{ude}(ugex) = 1/7 \text{ graddaget}(ugex), + 17 \text{ } ^\circ\text{C}. (*)$$

Alle forsøg finder sted mandag-tirsdag-onsdag i uge x, og følgende værdier fås:

Forsøg	uge (x)	graddaget			T_{ude} beregnet (*)
		x	x-1	x-2	
Luftvarme	6	158,8	124	124	-1,5 °C
Bænkevarme	7	178,7	158,8	124	-5,2 °C
Rørovne	10	110,0	115,3	151,6	-0,6 °C

Nu fås ud fra tabel 7 og ovenstående udetemperaturer et mål for et tilnærmet varmetab og en tilnærmet k-værdi for bygningen. Disse resultater er vist i tabel 8, hvor kirkens volumen og arealtal er benyttet:

Rumfang:	Luft	1003 m ³
	Vægge	51 m ³
	Loft	38 m ³
Arealer:	Sider	440 m ²

Vinduer	9 m ²
Loft	190 m ²
Gulv	145 m ²

hvor specielt arealerne af siderne og loftet er benyttet. I tabel 8 ses at den tilnærmede k-værdi for luft- og bænkevarmesituationen er næsten ens, hvilket kunne tyde på at beskrivelsen af varmetabsforholdene ikke er helt ved siden af, da disse 2 situationer er ens i forsøgsbetingelser (kirkens eget varmesystem regulerer ved lav temperatur).

Beskrivelsen er unøjagtig af flere grunde:

- a) vinduer ikke regnet med,
- b) gulvtab ikke regnet med,
- c) intet hensyn til forskellige temperaturer i skib, kor og tårnrum.

Det forventes at punkt b og c vil opveje hinanden, idet varmetabet i koret og tårnrummet er for stort, da der vil være en lavere temperatur her, mens gulvtabet ikke regnes med. Dette er dog også betydeligt lavere end de andre tabsfaktorer. Vinduestabet regnes heller ikke med. Tabellen er beregnet på følgende måde (Q_{mid} og Q_{fri} er taget direkte fra tabel 7):

$$Q_{væg} = \text{vægareal} \times Q_{mid}$$

$$Q_{hvælv} = \text{loftareal} \times Q_{fri}$$

$$Q_{sum} = Q_{væg} - Q_{hvælv}$$

D_{out} er taget fra tabel 7 direkte og er den aktuelle temperaturforskell over ydervæggen. D_{ude} er temperaturfaldet over ydervæggen ved benyttelse af den estimerede udetemperatur T_{ude} . Endvidere er

$$k \cdot A = \frac{Q_{sum}}{D_{ude}} \quad (W/^\circ C)$$

k^* er en speciel k-værdi, hvor der tages hensyn til at temperaturforskellen mellem den østlige og vestlige del af skibet er

forskellig. Dette får især betydning ved vurderingen af luftvarmeanlægget. Hvis der er en forskel mellem øst- og vesttemperaturen på

$$\Delta T = T_{\text{midøst}} - T_{\text{midvest}} \text{ (se fig. 13)}$$

Da forøges D_{ude} med $1/2\Delta T$, så den forøgede varmeafgivelse fra østrummet medregnes. Dette er gjort i kolonnen med Q_{tab} .

En anden vurdering af varmetabene kan foretages ud fra en enkel og simplificeret beregning på bygningsfysikken.

I en grov tilnærmelse antages λ -værdien at være konstant $0.7 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ så følgende isolanser iagttages:

$$M_{\text{væg}} = \frac{d}{\lambda} = \frac{1,2}{0,7} = 1,714$$

$$M_{\text{hvælv}} = \frac{0,2}{0,7} = 0,286$$

Da er

$$k_{\text{væg}} = \frac{1}{1,714} = 0,58$$

$$k_{\text{hvælv}} = \frac{1}{0,286} = 3,5$$

Da er

$$\begin{aligned} Q_{\text{total}} &= (k_{\text{væg}} \cdot \text{vægareal} + k_{\text{hvælv}} \cdot \text{loftareal}) D_{\text{ude}} \\ &= 425 D_{\text{ude}} \text{ [W]} \end{aligned}$$

Hvor D_{ude} findes i tabel 8.

Før	Q_{mid} (W/m ²)	$Q_{væg}$ W	Q_{fri} (W/m ²)	$Q_{hvælv}$ W	Q_{sum} W	D_{out} °C	D_{ude} °C	A·k W/°C	A·k* W/°C	Q_{tab} W
Luftvarme	3,4	1495	12,7	2431	3926	10,0	12,5	314	314	3926
Bænkevarme	4,0	1758	17,1	3273	5031	19,5	16,1	312	312	5031
Rørovn	5,4	2374	-	-	(2374)	16,7	17,7	(134)	(134)	(2374)
Under 1/1										
Luftvarme	12,5	5495	30,8	5895	11390	21,8	15,4	740	807	12432
Bænkevarme	16,4	7209	33,6	6431	13640	21,6	19,1	714	729	13923
Rørovn	12,6	5539	24,0	4594	10133	16,7	17,2	590	597	10266
Under 1/2										
Luftvarme	13,1	5759	31,6	6048	11807	22,4	15,7	752	819	12859
Bænkevarme	21,6	9495	39,0	7465	16960	24,2	21,3	796	811	17273
Rørovn	16,4	7209	25,2	4823	12032	17,9	18,1	665	672	12170
Efter										
Luftvarme	-0,0	0	10,8	2067	2067	17,2	13,4	154	156	2094
Bænkevarme	1,1	484	11,4	2182	2666	19,1	16,9	157	158	2666
Rørovn	-0,2	-88	7,0	1340	1252	13,3	15,7	80	80	1252

Tabel 8. Tidsmidlede værdier af varmestømme, udetemperaturer og fiktive k-værdier.

Dette giver følgende 3 varmetab for selve opvarmningsperioden:

$$Q_{\text{luft}} = 15500 \text{ W}$$

$$Q_{\text{bænk}} = 18000 \text{ W}$$

$$Q_{\text{rør}} = 16100 \text{ W}$$

Herefter dannes nedenstående tabel, som viser energiforbruget for de 3 opvarmningsmetoder, når varmetabene er fraregnet.

Forsøg	Q_{vrm} kW	Q_1 kW	Q_2 kW	F_1	F_2
Luftvarme	33,5	21,0	18,0	1,0	1,0
Bænkevarme	39,0	25,0	21,0	1,19	1,16
Rørovne	40,0	30,0	23,9	1,41	1,33

hvor Q_1 er korrigeret ud fra varmestromsmålernes, og Q_2 er korrigeret ud fra λ -værdien på 0,7. Her er D_{ude} forøget med $1/2\Delta T$ som før nævnt.

I vurderingen af Q_1 og Q_2 må man huske at Q_1 fortæller om energiforbruget når man kompenserer for den umiddelbare varmestrom ved overfladen af muren og hvælvet. Q_2 antager at der er stationære forhold i væggen hvad angår varmetransport, og denne betingelse er ikke opfyldt. I øvrigt er forholdene mellem de 2 udregningsmetoder anskueliggjort ved faktoren F_1 og F_2 , hvor de relative effektforbrug er vist, og begge metoder viser en vis lighed - de enkelte opvarmningsformer sammenlignet.

Det er nu på sin plads at undersøge effektiviteten af de 3 varmeanlæg.

Opvarmningsperioderne har givet anledning til både en stigning i T_{mid} og EQ , og energiforbruget pr. grads temperaturstigning fortæller da om effektivitetsegenskaberne. Dette er anskue-

liggjort i følgende to tabeller (den første med varmemestrømskompensation, den næste med $\lambda = 0,7$ beregningen).

FORSØG	Opvarmings- tid Δt_{id}	Effekt kW	Indeeff. \dot{Q} W	Inde- energi E kWh	ΔT_{mid} $^{\circ}C$	ΔEQ $^{\circ}C$	Eff.T kWh/ $^{\circ}C$	Eff.EQ kWh/ $^{\circ}C$
LUFTVARME	9h	33,5	21068	189,6	10,7	8,6	17,7	22,0
BÆNKEVARME	6h	39,0	25077	150,5	12,8	12,4	11,8	12,1
RØROVNE	2h37min.	40,0	29734	77,8	8,7	7,2	8,9	10,8

FORSØG	Opvarmings- tid Δt_{id}	Effekt kW	Indeeff. \dot{Q} W	Inde- energi E kWh	ΔT_{mid} $^{\circ}C$	ΔEQ $^{\circ}C$	Eff.T kWh/ $^{\circ}C$	Eff.EQ kWh/ $^{\circ}C$
LUFTVARME	9h	33,5	17960	161,6	10,7	8,6	15,1	18,8
BÆNKEVARME	6h	39,0	21009	126,1	12,8	12,4	9,9	10,1
RØROVNE	2h37min.	40,0	23905	62,6	8,7	7,2	7,2	8,7

Det ses her ganske klart at effektiviteten

$$\text{Eff.T} = \frac{\text{energiforbrug}}{\Delta T_{mid}} \quad [\text{kWh}/^{\circ}\text{C}]$$

og

$$\text{Eff.EQ} = \frac{\text{energiforbrug}}{\Delta EQ} \quad [\text{kWh}/^{\circ}\text{C}]$$

er bedst for lokalvarmeanlæggene, og jo større en effekt der afsættes ved personerne, des bedre effektivitet opnår man. Vurderer man tallene relativt ses det i følgende tabel at der kræves op til 100% mere energi ved opvarmning med luftvarme frem for rørovne. Desuden ses det at rørovnene igen er mere effektive end bænkevarmeanlægget.

Forsøg	Eff _{T1}	N ₁	Eff _{T2}	N ₂	Eff _{EQ1}	M ₁	Eff _{EQ2}	M ₂
Luftvarme	17,7	1,99	15,1	2,10	22,0	2,04	18,8	2,16
Bænkevarme	11,8	1,32	9,4	1,37	12,1	1,12	10,1	1,16
Rørovn	8,9	1,00	7,2	1,00	10,8	1,00	8,7	1,00

5.6. Besparelse ved isolering

Under forsøgene blev der som nævnt foretaget en isolering af en lille del af hvælvet. Ud fra den målte varmestrøm kan besparelsen ved at isolere vurderes.

Nu ændres tabel 8 til følgende: (kun opvarmningsperioden medtages)

Forsøg	Q _{mid} W/m ²	Q _{væg} W	Q _{iso} W/m ²	Q _{hvælv} W	Q _{sum} W	D _{out} °C	D _{ude} °C	k W/°C	k* W/°C	Q _{tab} W
Luftvarme	12,5	5495	21,0	4019	9514	21,8	15,4	618	674	10382
Bænkevarme	16,4	7209	21,5	4115	11324	21,6	19,1	593	604	11534
Rør- ovne	12,6	5539	17,8	3407	8946	16,7	17,2	520	524	9048

Nu iagttages tabene fra kirken med og uden isolering i følgende tabel:

FORSØG	$Q_{\text{tab}} \text{ (fri)}$ W	$Q_{\text{tab}} \text{ (isol)}$ W	for- skel W	forsøgstid W	besp. kWh	forbr. ialt kWh	besp. %
Luft- varme	12432	10382	2050	4h	18,5	301,5	6%
Bænke- varme	13923	11534	2389	6h	14,3	234,0	6%
Rør- ovne	10266	9048	1218	2h 37 min.	3,2	104,0	3%

5.7. Lodret temperaturfordeling

Ud fra lufttemperaturmålingerne i de forskellige højder over gulvet har det været muligt at bestemme forholdene for stratifikation eller den lodrette temperaturgradient.

I tabel 9 er vist forholdene på samme måde som i sidste afsnit; ved midling af de enkelte lufttemperaturer over de forskellige perioder. "FØR"-perioden er her undtaget idet forholdene her er ens. Foruden selve middellufttemperaturen (T_{mid}) er vist forskellen mellem østlig og vestlig middeltemperatur i de 2 søjler (D_{mid}). Herefter er selve middeltemperaturen i de enkelte punkter vist ($T_{\text{øst1}}-T_{\text{øst5}}$ og $T_{\text{vest1}}-T_{\text{vest5}}$), og nedenunder er der med kursivskrift vist afvigelsen fra T_{mid} .

Forskellen i tabellen er anskueliggjort på fig. 31, hvor man ser temperaturfordelingen vertikalt i rummet både for øst- og vestskipet i 3 faser af opvarmingsperioden. Den vertikale akse skæring med den horisontale er et udtryk for T_{mid} .

Der iagttages her for de forskellige opvarmningssystemer følgende gradienter:

FORSØG	UNDER HEL		UNDER HALV		EFTER	
	ØST	VEST	ØST	VEST	ØST	VEST
LUFTVARME	5,0	7,9	5,2	9,1	0,7	2,0
BÆNKEVARME	4,1	3,0	5,2	3,7	0,6	0,5
RØROVNE	2,7	1,7	3,5	2,2	0,3	0,6

og det ses at for luftvarmesystemet er der alt for store forskelle mellem loft og gulv, d.v.s. at en uforholdsmæssig stor del af varmen er unyttiggjort. For de 2 andre varmesystemer ses det at varmen er koncentreret længere nede i kirken.

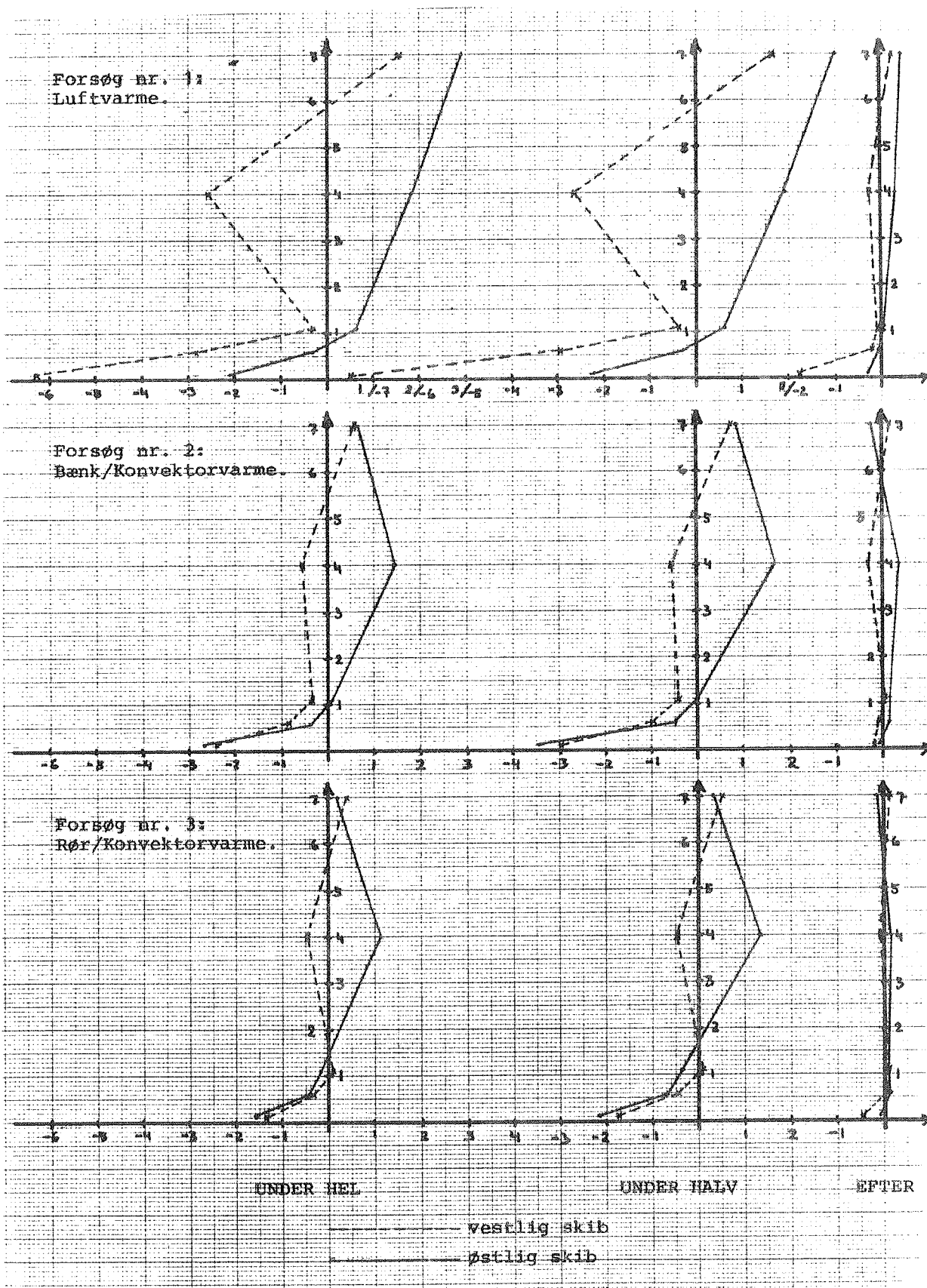


Fig. 31. Lodret temperaturfordeling i vest- og østende af skibet ved brug af de tre varmesystemer henholdsvis under og efter en opvarmning.

6. Simulering af opvarmningsforløb med dynamisk model

I dette afsnit opstilles en dynamisk model for kirken opfattet som varmeteknik system. Modellen anvendes derpå til at beregne opvarmningstiden ud fra en given starttilstand. Systemligningerne opstilles v.h.a. den traditionelle termisk-elektriske analogi. I modsætning til den i simulation ofte anvendte fremgangsmåde, hvor man ud fra kendskab til bygnings konstruktion og de anvendte materialer beregner komponentstørrelser i et komplekst analogt kredsløb, vil vi her, ud fra kendskab til faktisk registrerede temperatur- og effekttilførselsforløb, estimere størrelsen af nogle få komponenter i et simpelt analogt kredsløb.

Den her anvendte analoge kreds er

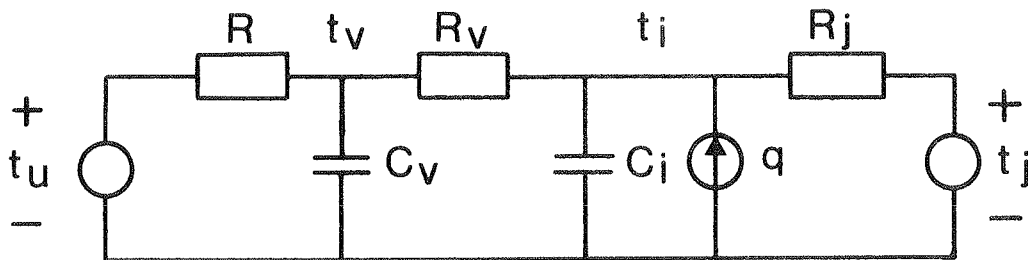


Fig. 32. El-analog model af det varmetekniske system.

hvor

- t_u er udetemperaturen [$^{\circ}\text{C}$],
- t_v er overfladetemperaturen på væggen [$^{\circ}\text{C}$],
- t_i er indelufttemperaturen [$^{\circ}\text{C}$],
- t_j er jordtemperaturen [$= 8^{\circ}\text{C}$],
- q er effekttilførsel til kirken [kW],
- R er varmemodstanden mellem væggen indre overflade og udeluften [$^{\circ}\text{C}/\text{kW}$],
- R_v er overgangsmodstanden mellem væggen indre overflade og indeluften [$^{\circ}\text{C}/\text{kW}$],
- R_j er overgangsmodstanden mellem jorden og indeluften [$^{\circ}\text{C}/\text{kW}$],
- C_v er varmeakkumuleringssevnen i væggene [$\text{kWh}/^{\circ}\text{C}$] og

C_i er varmeakkumuleringsevnen af kirkens indre [kWh/°C].

Systemligningerne fremkommer ved at opskrive strømbalanceligninger for de to knudepunkter med spændingen t_i og t_v , Kirchhoff's lov:

$$\frac{t_i - t_v}{R_v} + c_i \dot{t}_i - \dot{q} + \frac{t_i - t_j}{R_j} = 0 \quad (1a)$$

$$\frac{t_v - t_u}{R} + c_v \dot{t}_v + \frac{t_v - t_i}{R_v} = 0 \quad (1b)$$

eller omskrevet til den såkaldte "state-space" formulering

$$\begin{bmatrix} \dot{t}_i \\ \dot{t}_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{R_v C_i} - \frac{1}{R_j C_i} & \frac{1}{R_v C_i} \\ \frac{1}{R_v C_v} & -\frac{1}{R C_v} - \frac{1}{R_v C_v} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_i \\ t_v \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_j C_i} & \frac{1}{C_i} \\ \frac{1}{R C_v} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_u \\ t_j \\ \dot{q} \end{bmatrix} \quad (2)$$

eller

$$\dot{\bar{x}} = \bar{A} \cdot \bar{x} + \bar{B} \cdot \bar{u}$$

hvor elementerne i \bar{x} , \bar{u} , \bar{A} og \bar{B} fremgår af (2). Systemets tidskonstanter er de negative, reciprokke egenverdier til \bar{A} . - Den anvendte model negligerer infiltration samt varmekapacitet i opvarmningssystemet.

Ud fra to i forhold til de forventede tidskonstanter meget korte måleperioder med hver sit opvarmningsanlæg er komponenterne i den analoge kreds og altså elementerne i matricerne \bar{A} og \bar{B} estimeret v.h.a. en ikke-lineær, mindste kvadraters metode. I det ene tilfælde er kirken opvarmet v.h.a. to kaloriferer, (se s. 9), som blæser med en samlet effekt på 32 kW. I det andet tilfælde foregår opvarmningen v.h.a. kirkens eget varmeanlæg støttet af i alt 48 kW opvarmning på undersiden af bænke og bagsiden af ryglænene, (se s. 9). Under begge målinger forekommer kun en opvarmningspuls, og afkølingsforløbet er afskåret så at det får samme længde som opvarmningsforløbet. De i modellen indgående størrelser er målt hvert 10. minut. T_i er et gennemsnit af 10 temperaturer målt i forskellig højde i hver sin ende af kirken. t_v er et gennemsnit af tre temperaturer målt på skibets nordvæg i en højde på 1,30, 3,35 og 5,80 m over gulv.

Resultatet af estimationerne skal ikke bringes her, blot skal vi konstatere, at estimaterne for komponenterne i modellen ikke er ens for de to måleserier. Ideelt skulle dette jo være tilfældet, men dels er modellen meget simpel, dels vil forskellige opvarmningssystemer "se" forskellige aktive varmekapaciteter og dels er det problematisk at finde en rimelig repræsentant for inde- og overfladetemperaturer i et varmeteknisk så kompliceret system som en landsbykirke.

Den estimerede model forklarer 99,84 % hhv. 99,65 % af variationen i indetemperaturen og 98,90 % hhv. 99,32 % af variationen i overfladetemperaturen for de to opvarmningsformer kirkens eget varmeanlæg støttet af bænkevarme hhv. kalorifer opvarmning. Den estimerede matrix \bar{A} har egenverdier på $-0,06480 \text{ h}^{-1}$ og $-2,4270 \text{ h}^{-1}$ hhv. $-0,04061 \text{ h}^{-1}$ og $-2,5238 \text{ h}^{-1}$ svarende til tidskonstanter på 15,4 h og 25 min. hhv. 24,6 h og 24 min. for de to varmesystemer. De normerede egenvektorer bliver

(0,7284; 0,6852) og (0,2317; -0,9728)

hhv.

(0,7309; 0,6825) og (0,0594; -0,9982)

Enhver tilstand $\bar{x} = (t_i, t_v)$ kan beskrives i vektorrummet udspændt af de to egenvektorer. Man ser, at den lange tidskonstant knytter sig til den situation, at rumtemperaturen og overfladetemperaturen er næsten ens, hvorimod den korte tidskonstant er knyttet til en situation hvor de to temperaturer har modsat fortegn. Det skønnes umiddelbart, at de estimerede tidskonstanter er for små, opvarmningsforløbet er for kort. På figur 33 og 34 er optegnet de målte og de modellerede inde-temperaturer for hhv. kalorifer-opvarmning og kirkens eget varmeanlæg støttet af bænkevarme. Det ses at modellen har en god forklaringsgrad. En nærmere analyse af residualerne (d.v.s. differensen mellem målte og modellerede temperaturforløb) viser dog, at de ikke er ukorrelerede og at de indeholder mere information.

Man kunne opnå en bedre model ved at forlænge måletiden til ca. 1 uge, evt. introducere endnu et knudepunkt i væggen (hvis temperatur man ikke behøver at måle) og ved at anvende "maximum likelihood" estimation i kontinuert tid under antagelse af, at modellens styrende variable er konstante i tidsrummet mellem to målinger.

Anvendes den estimerede model til en dynamisk simulation af indetemperaturen fås forløbene vist på figur 35 og 36 for de to opvarmningsformer. Det ses, at modellen beskriver den væsentligste dynamik i systemet.

Modellen kan nu anvendes til simulation af forskellige situationer. Her er valgt at studere to typiske opvarmningsforløb med henblik på at finde en opvarmningstid fra en givet starttilstand til en ønsket sluttilstand.

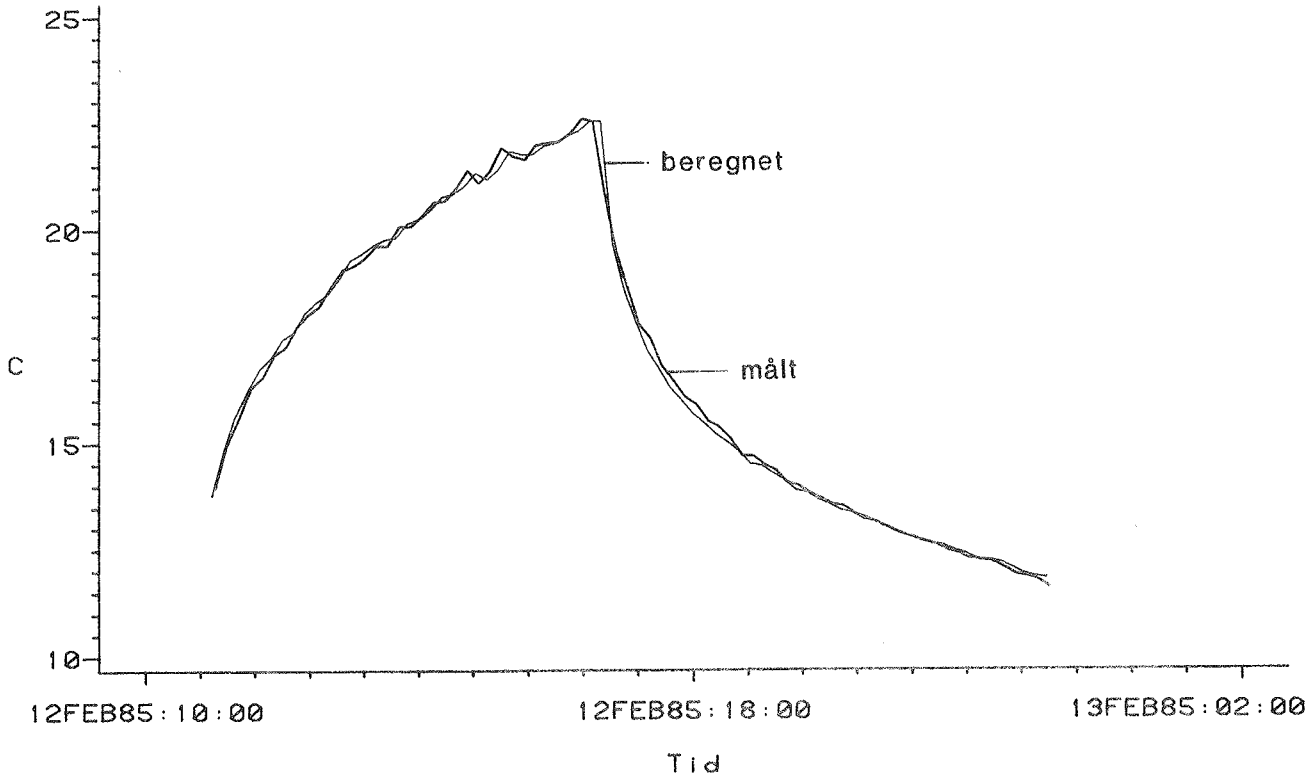
På figur 37 og 38 ses forløbet af inde- og overfladetemperaturerne for de to opvarmningsformer når starttilstanden er inde-temperatur lig med overfladetemperatur lig med 12 °C, hvilket antages at repræsentere en ofte forekommende situation, hvis kirken i en periode med $T_u = 6$ °C bruges 3-4 gange om ugen. På kurverne aflæses opvarmningstiden til ca. 3,5 h hhv. 1,8 h.

På figur 39 og 40 ses forløbet af inde- og overfladetemperaturerne for de to opvarmningsformer når starttilstanden er inde-temperatur lig med overfladetemperatur lig med $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, hvilket antages at repræsentere en situation, hvor kirken i en kold periode med $T_u = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ bruges mindre end 2-3 gange om ugen. På kurverne aflæses opvarmningstiden til ca. 7,7 h hhv. ca. 9,7 h (bænk).

Det ses, at forløbene i figur 37 til 40 alle repræsenterer situationer, hvor den operative temperatur ved anvendelse af de anførte opvarmningstider vil være mindre end $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Hvis man i stedet simulerer forløbet af den operative temperatur (sat lig gennemsnittet af lufttemp. og overfladetemp.) i de to nævnte situationer, fås for de to varmesystemer med starttemperatur på 12° de i figur 41 og 42 viste opvarmningstider på 5,0 h med bænkevarme og 6,7 h med kalorifer-opvarmningen. Ved en starttemperatur på $+6\text{ }^{\circ}$ fås de i figur 43 og 44 viste kurver og en opvarmningstid på henholdsvis 9,2 h ved bænkevarme og 16,5 h ved kalorifer opvarmning.

Det ses af simulationerne i figur 35 og 36, at de nævnte opvarmningstider er ret "konservativt" bedømte. Det faktisk registrerede temperaturforløb når hurtigere end det simulerede op på det ønskede niveau.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

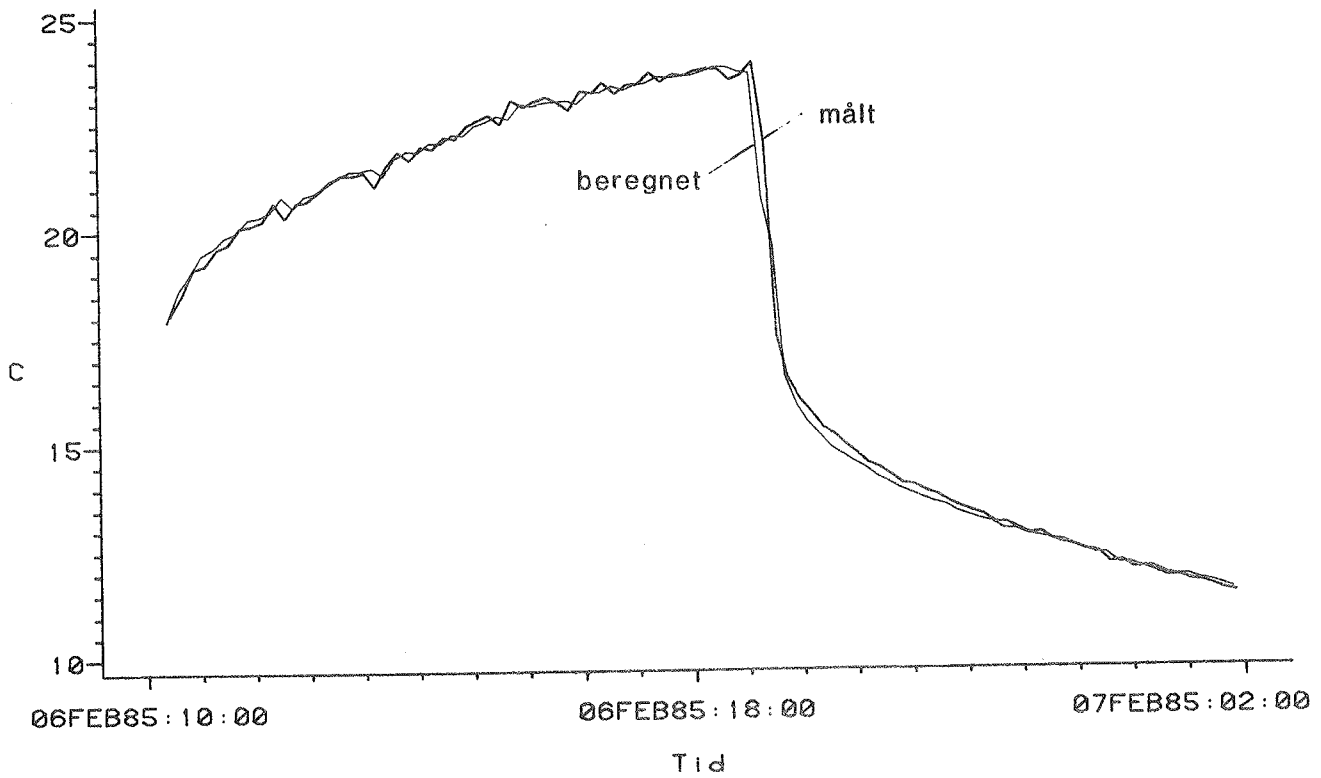
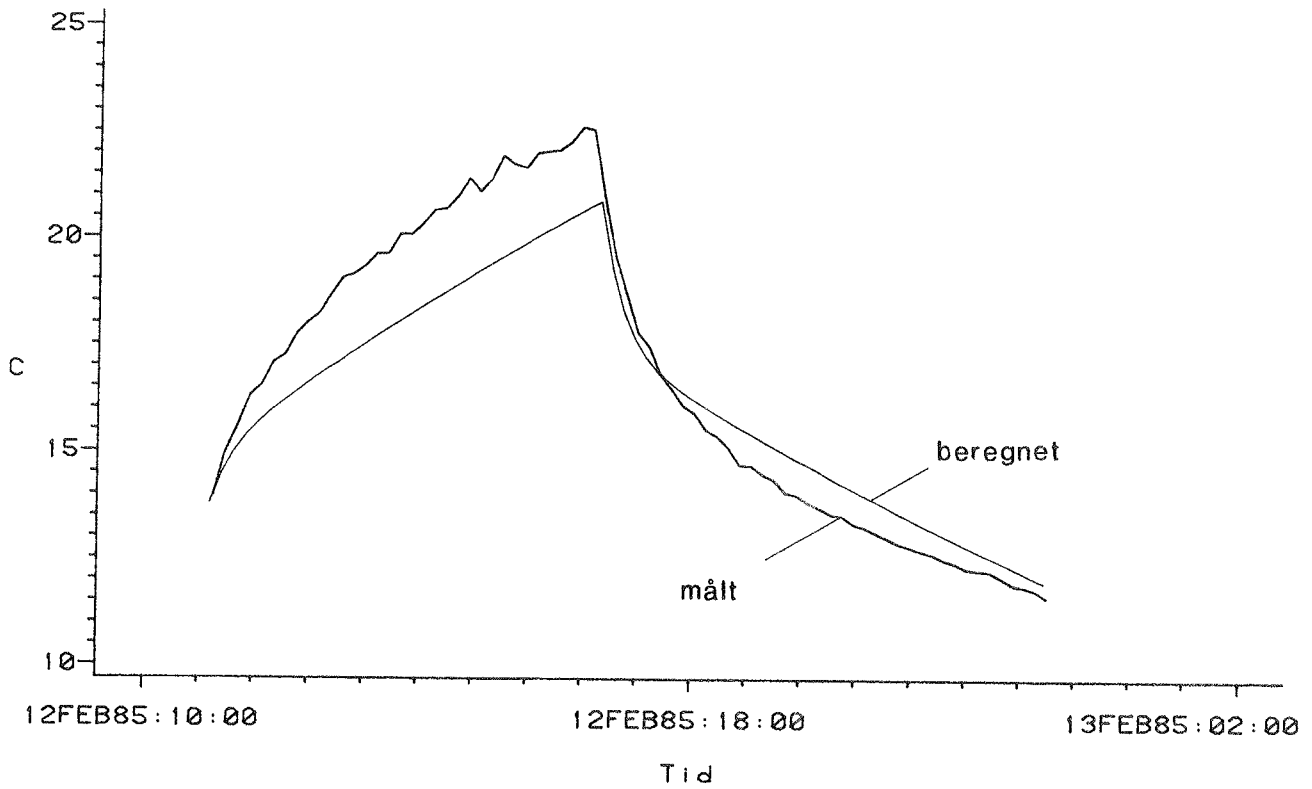


Fig. 33 og 34. De målte og de modellerede opvarmningsforløb ved anvendelse af henholdsvis det eksisterende varmeanlæg og varmluftkaloriferer.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

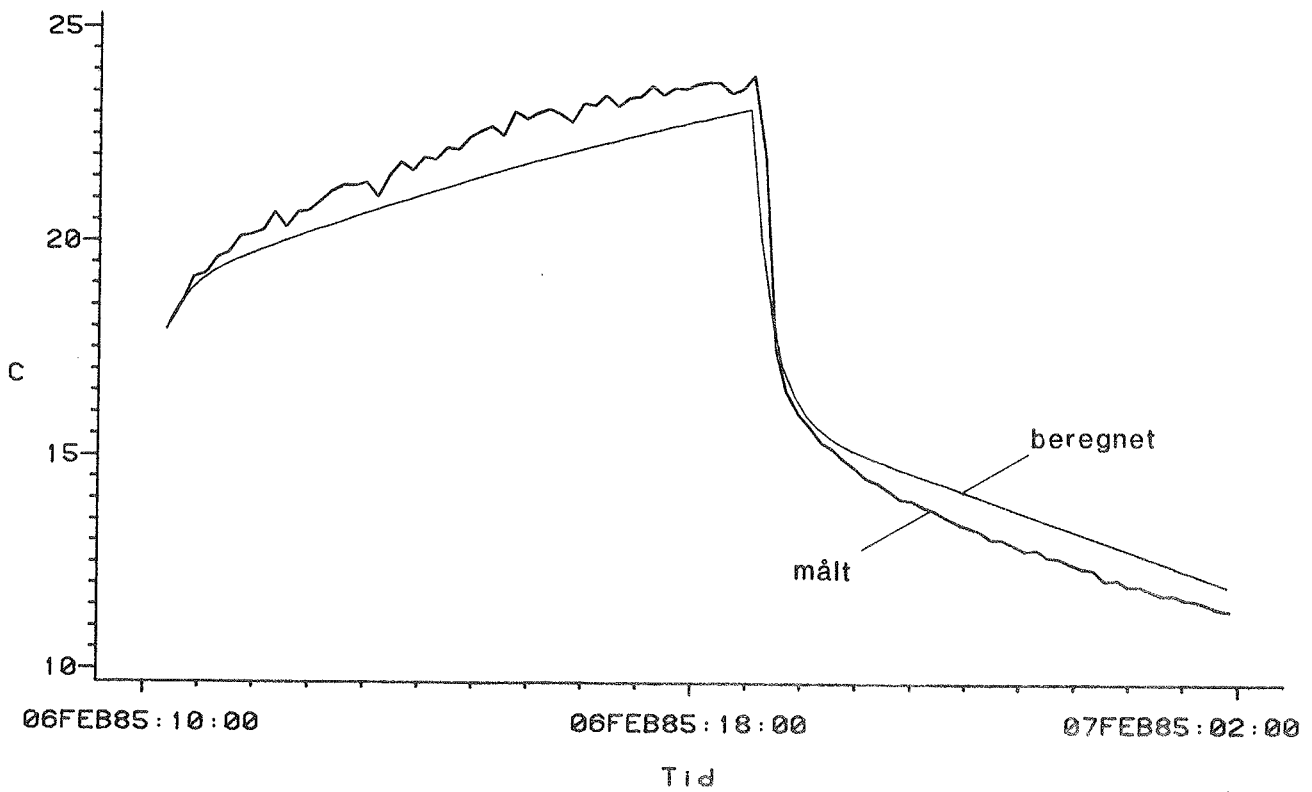
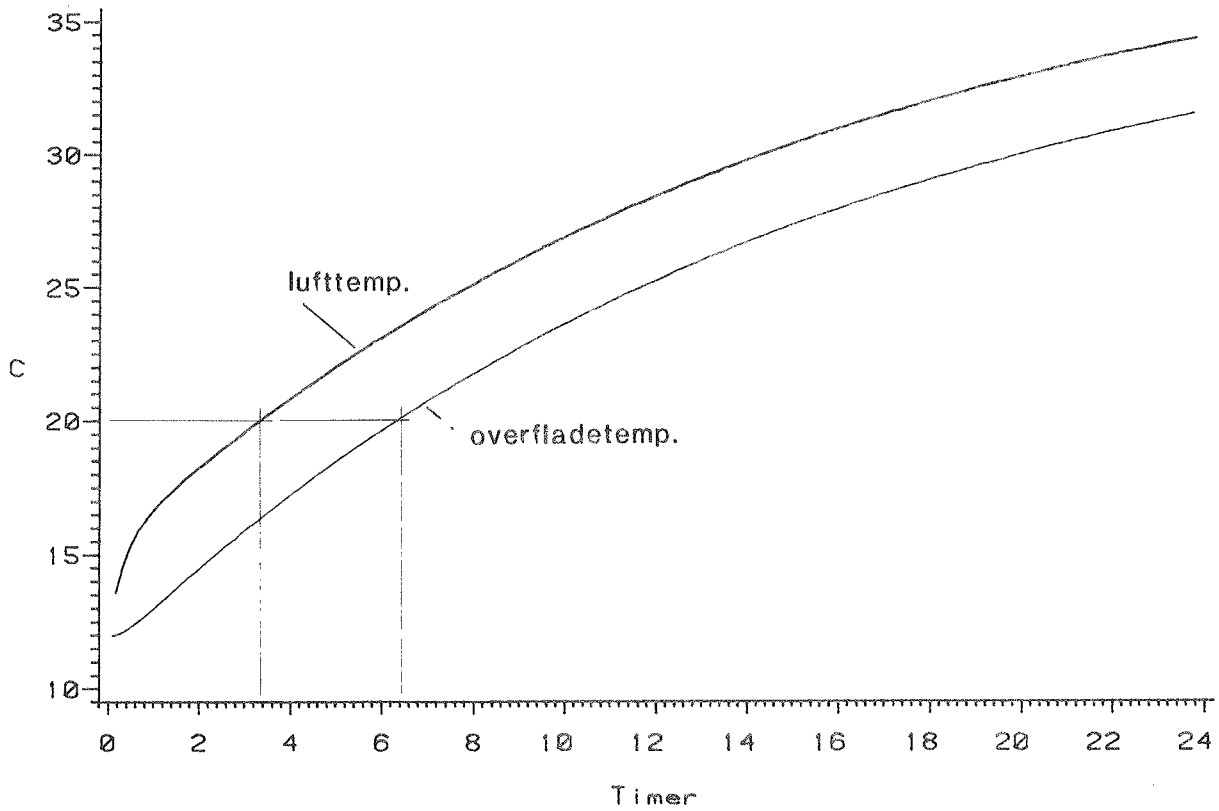


Fig. 35 og 36. Anvendelse af den estimerede model til dynamisk simulation af et opvarmningsforløb sammenlignet med de målte forløb.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

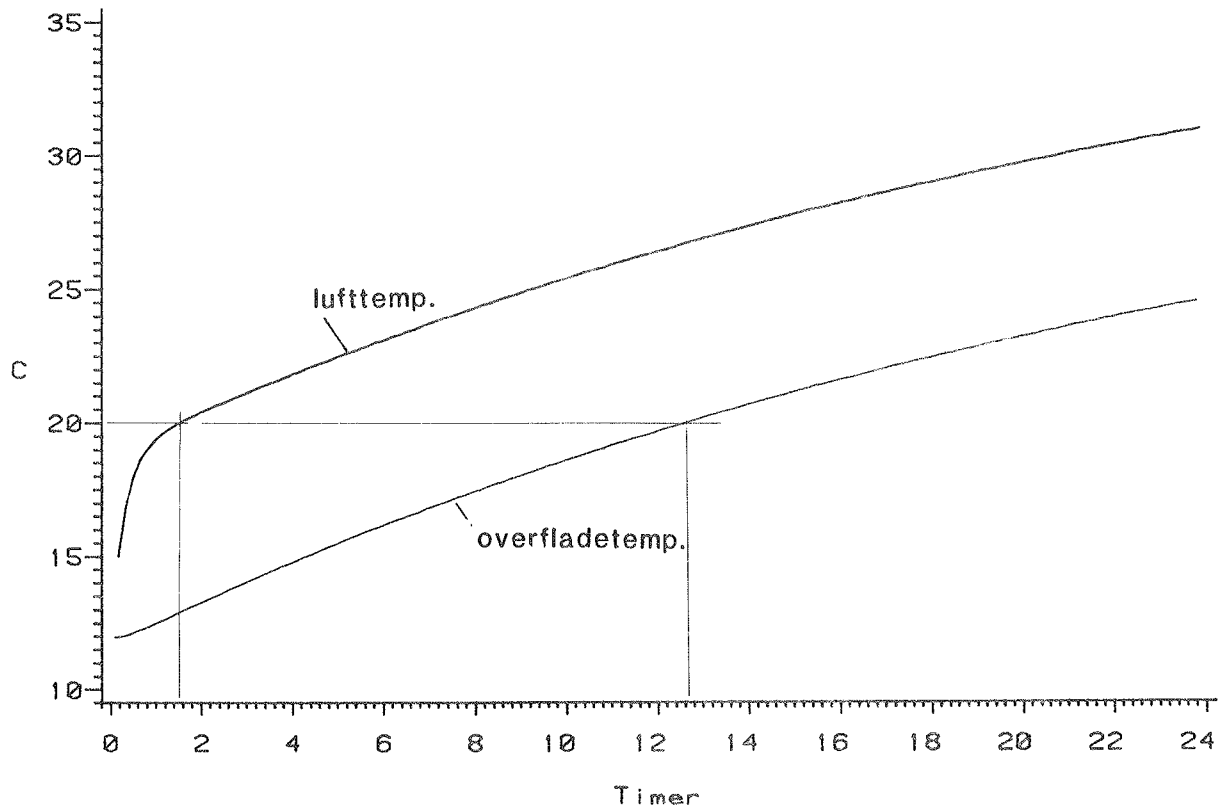
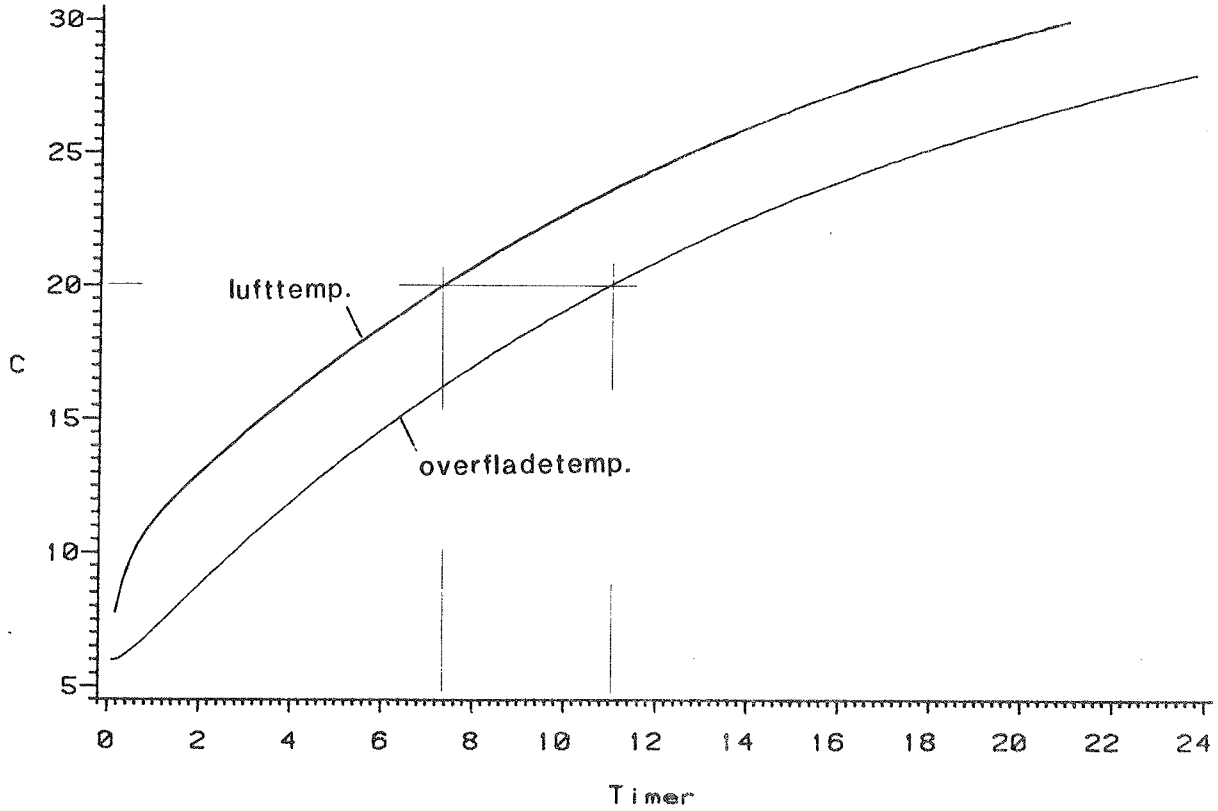


Fig. 37 og 38. Simuleret opvarmningsforløb for henholdsvis lufttemperatur og overfladetemperatur ved anvendelse af de to varmesystemer. Begyndelsestemperaturen er valgt til at være +12 °C.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

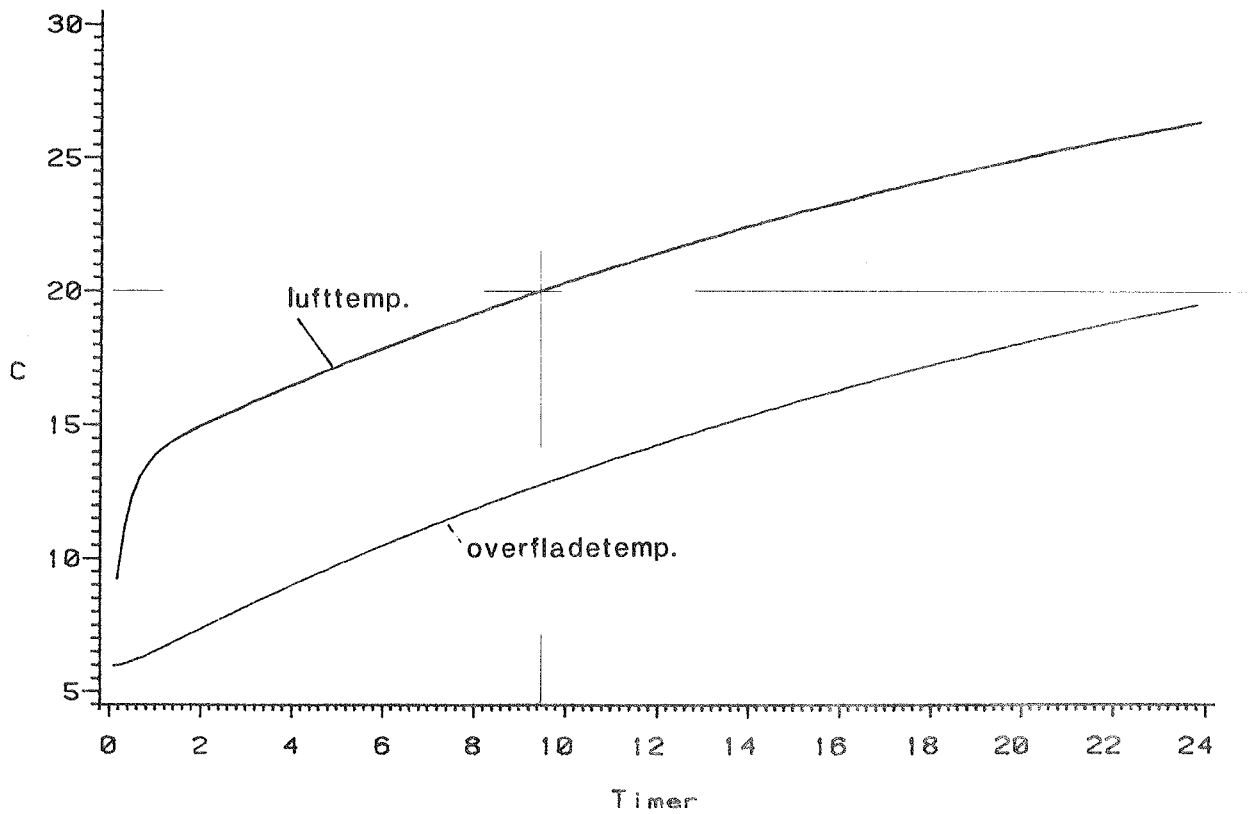
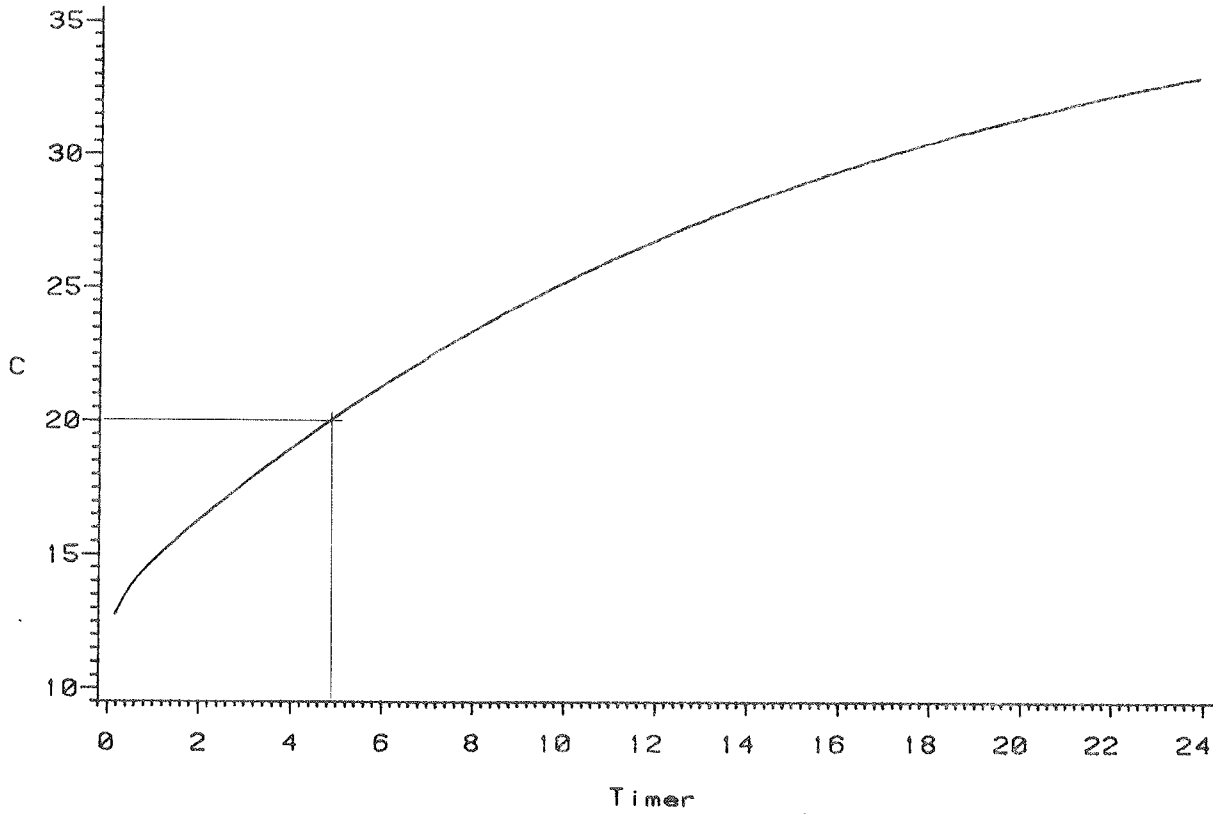


Fig. 39 og 40. Simuleret opvarmningsforløb for henholdsvis lufttemperatur og overfladetemperatur ved anvendelse af de to varmesystemer. Begyndelsestemperaturen er sat til +6 °C.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

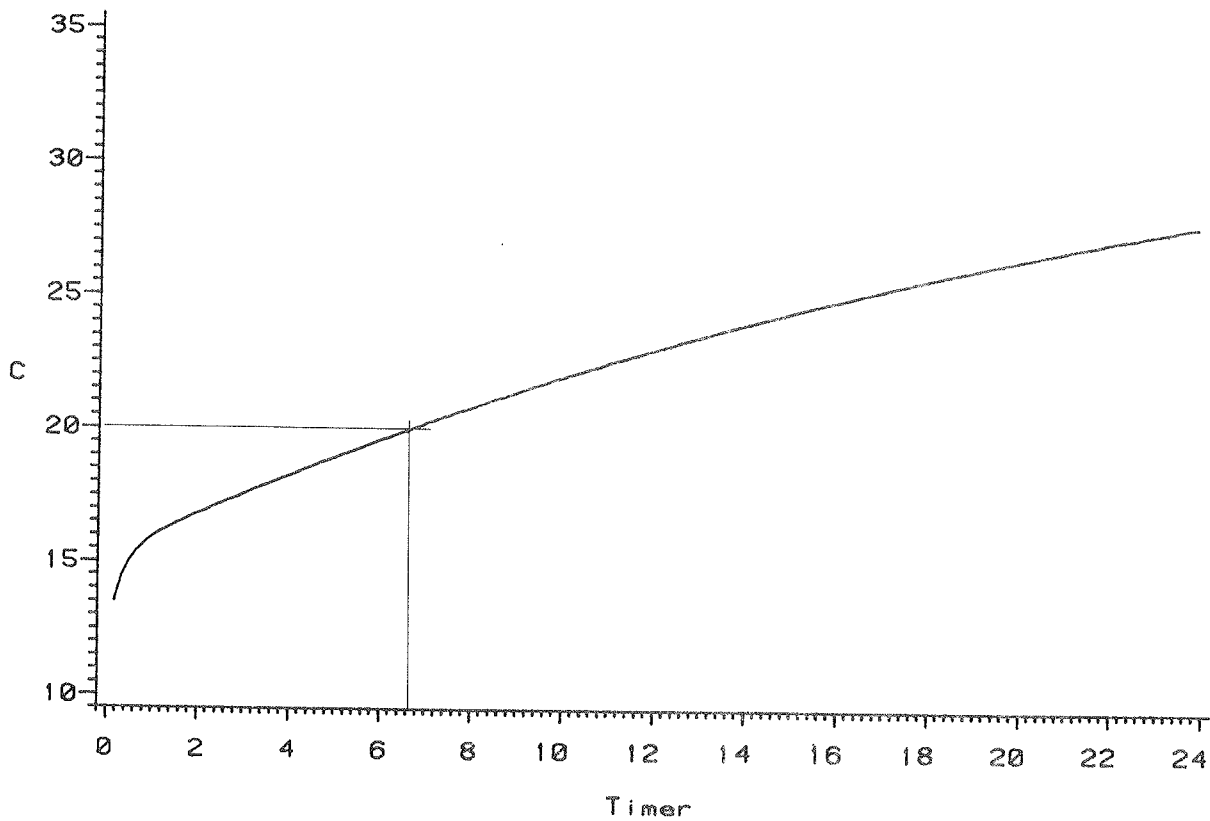
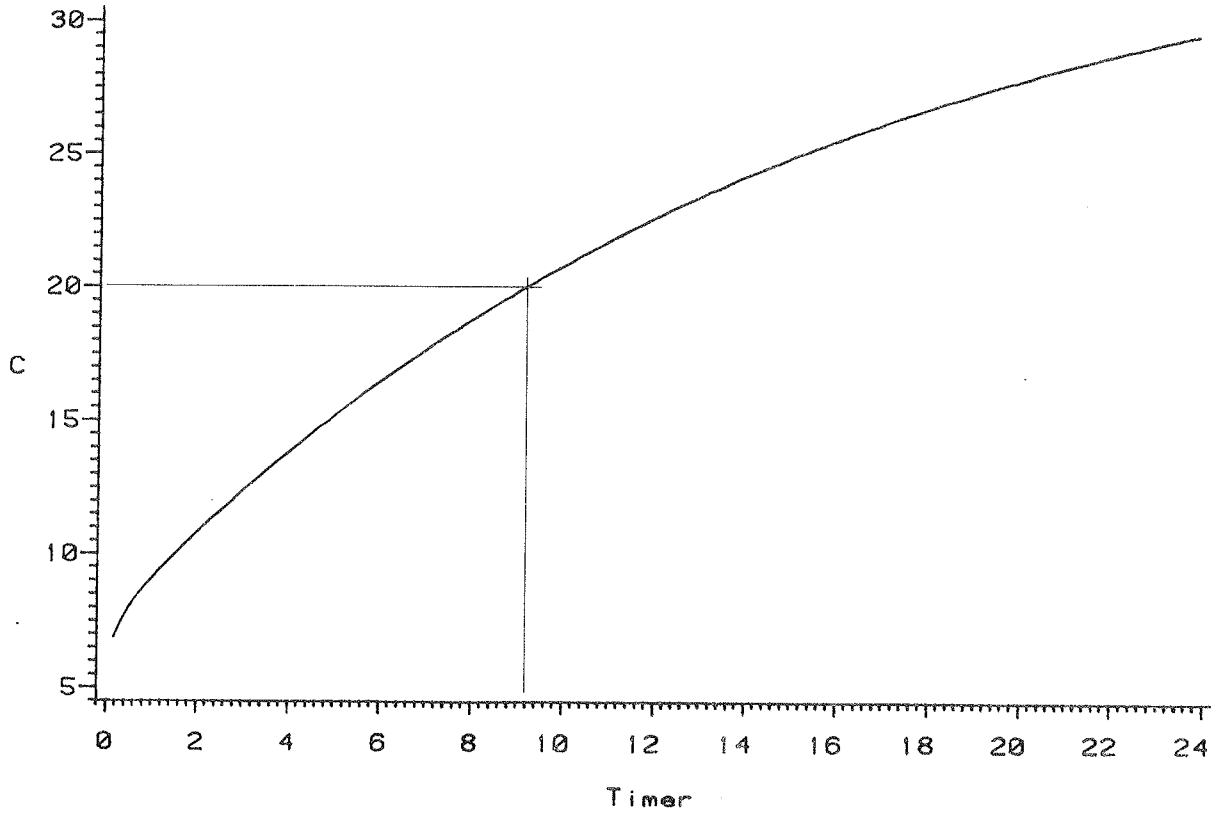


Fig. 41 og 42. Simuleret forløb af den operative temperatur ved brug af de to varmesystemer. Starttemperatur = +12 °C.

Kirkens eget varmesystem med bænkevarme



Varm luft opvarmning

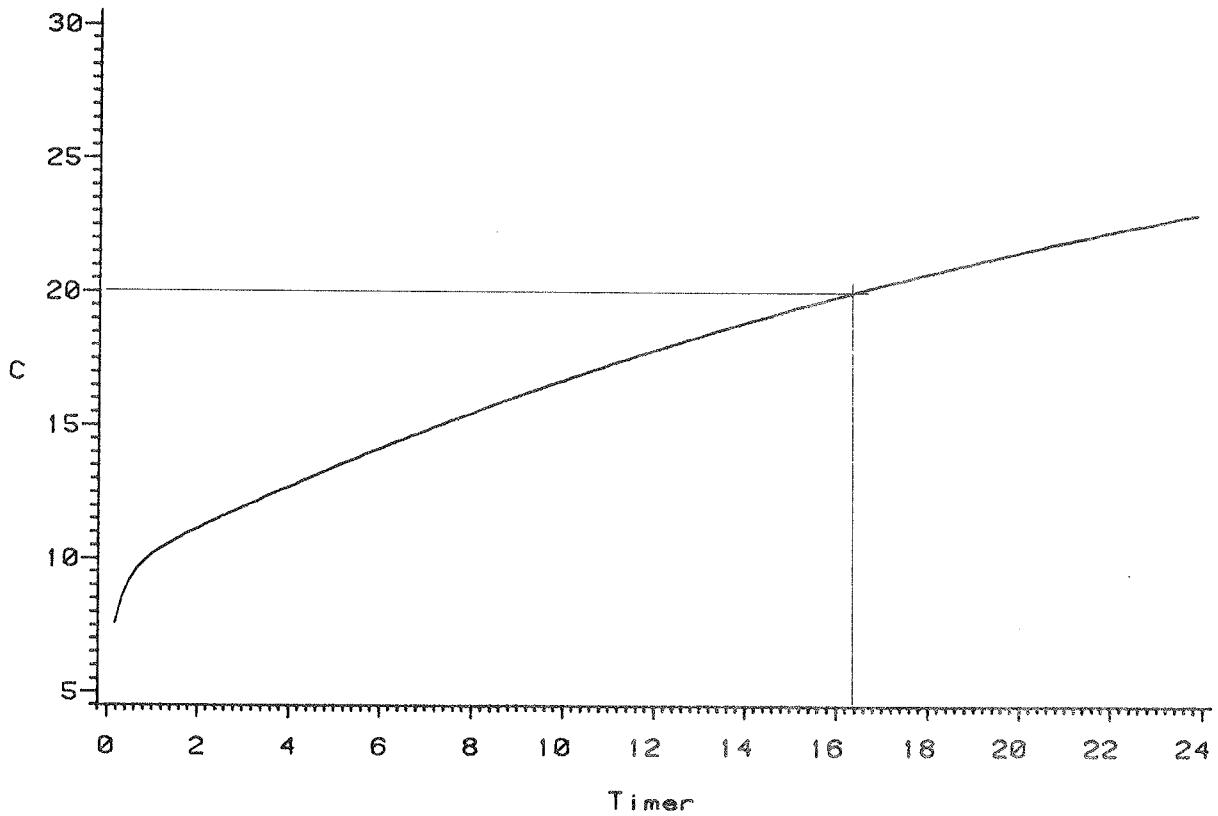


Fig. 43 og 44. Simuleret forløb af den operative temperatur ved brug af de to varmesystemer. Starttemperatur = +6 °C.

7. Konklusion

For hver af de 4 varmeanlæg er der foretaget en serie målinger med henblik på at sammenligne deres effektivitet samt evne til at skabe termisk komfort. Desuden er en teoretisk model anvendt til at beregne opvarmningstiderne for anlæggene ud fra givne startbetingelser. Herunder opsummeres resultaterne af de foretagne sammenligninger og undersøgelser.

Benyttes som udtryk for anlæggenes effektivitet den energimængde, som er nødvendig for at nå op på en ønsket brugstemperatur fra en kold kirke med udnyttelse af det enkelte varmeanlægs fulde effekt i opvarmningsperioden, viser målingerne, når der korrigeres for forskelle i kirkebygningens termiske tilstand ved opvarmningens begyndelse, at luftvarmeanlægget bruger ca. dobbelt så mange kWh som rørovnslæggene og bænkevarmeanlægget ca. 15% mere. Ifølge sagens natur er såvel målinger som beregninger behæftet med en betydelig usikkerhed.

Benyttes som udtryk for anlæggenes effektivitet den energimængde, som er nødvendig for at nå op på en ønsket brugstemperatur fra en kold kirke med udnyttelse af de enkelte varmeanlægs fulde effekt i opvarmningsperioden, viser målingerne, når der korrigeres for forskelle i kirkebygningens termiske tilstand ved opvarmningens begyndelse, at luftvarmeanlægget bruger ca. dobbelt så mange kWh som rørovnslæggene og bænkevarmeanlægget ca. 15% mere. Ifølge sagens natur er såvel målinger som beregninger behæftet med en betydelig usikkerhed.

Kurverne for de målte temperaturers udvikling under opvarmningsforløbene viser at luftvarmeanlægget giver klart større temperaturforskelle mellem forskellige steder i kirken både vandret og lodret og dermed ringere komfort end de lokale opvarmningsanlæg.

Der registreredes en meget høj overfladetemperatur på rørovnene. Korrekt placering af rørovn samt anvendelse af passende afskærmning er således særdeles vigtigt. Disse anlæg yder den bedste komfort og er samtidigt mest effektive.

Målingerne af lufthastigheder forskellige steder i kirken viser uacceptabelt høje hastigheder for luftvarmeanlægget med risiko for at præsten kan blive udsat for træk på prædikestolen. Lufthastighederne for rørovnsløbet er betydeligt mindre, men dog betænkeligt høje i gulvniveau.

Interviewundersøgelserne faldt også ud til fordel for de lokale opvarmningsanlæg. Hele 40% af de adspurgte følte fodkulde ved anvendelsen af luftvarmeanlægget.

Målingerne og beregninger viste at ved at isolere hvælvet med 10 cm mineraluld kan der spares mellem 3 og 6% i energiforbrug til opvarmning - afhængigt af opvarmningssystem.

Ved anvendelse af en simpel elektrisk analog-model af kirken som termisk system var det muligt at simulere forskellige opvarmningsforløb og dermed bestemme opvarmningstiden udfra givne startbetingelser. Estimerne for komponenterne i modellen foretoges på baggrund af de foretagne måleserier og gav ikke ens størrelser for de to udvalgte serier. Der foreslås en metode til at opnå en forbedring af modellen. Det skønnes dog ud fra de opnåede resultater at modellen med rimelighed kan anvendes i denne sammenhæng og resultaterne af forskellige opvarmningsforløb er illustreret ved optegnelsen af temperaturforløb ud fra en begyndelsestilstand på hhv. 12 °C og 6 °C i kirkerummet.

Det har ikke været muligt inden for projektets økonomiske rammer på grundlag af de foretagne målinger og den opstillede model at foretage en økonomisk optimering af de forskellige opvarmningssystemer under hensyntagen til såvel anlægs- som driftsudgifter, som grundlag for udarbejdelse af projektering-svejledninger for kirkevarmeanlæg.

Summary

From February to March 1985 four different heating systems were tested in the Sct. Jørgensbjerg Church at Roskilde: The existing permanent system with electrical resistance foils placed in the seat and back of the pew and additional ribbed heaters in pits along the walls. A provisional, forced warm air electrical heating system. Two provisional systems with tubular radiators in the pew, positioned directly under the seat respectively near the floor. It is attempted to create a series of measurements for each heating period as similar as possible as the purpose was to compare the efficiency of the four systems as well as their ability to create thermal comfort in the church. The investigations further comprised testing the effect of insulating the vaulted ceiling with mineral wool. To get an idea of how the various heating systems influenced the thermal comfort interviews were made among the churchgoers for each heating period.

When evaluating the heating systems especially the mean air temperature in the nave and the so-called equivalent temperature were examined. The equivalent temperature comprises the sensation felt by a person of both the air temperature, air velocity and the mean radiation temperature. The heat loss from the upper and lower part of a thermal manikin, placed in the pew was measured and compared.

The result of the investigations, both measurements and interviews, was that the local electrical heating both concerning thermal comfort and efficiency, was far better than the air heating systems; and among the local heating systems the best thermal comfort and the highest efficiency were obtained by the tubular radiators in the pew. There was no significant difference between the two tested positions of the radiators.

The measurements and the calculations proved that by insulating the vaulted ceiling with 10 cm mineral wool a reduction of 3-6% of the energy consumption for heating could be

attained - to some extent dependent on the type of heating system used.

An electrical analogue model was set up to simulate the total dynamic thermal system. The model was used to determine the heating up period for various starting conditions. The model has proved to be useful but improvements are suggested.