DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
LABORATORIET FOR VARMEISOLERING

Meddelelse nr. 8

Vagn Korsgaard og Thomas Lund Madsen

ISOLERINGSEVNEN AF NOGLE TYPISKE YDERVÆGGE UDSAT FOR DET NATURLIGE KLIMA

Resultatet af tre års målinger i laboratoriets prøvehus

THE THERMAL INSULATION OF SOME TYPICAL DANISH OUTER WALLS EXPOSED TO THE NATURAL CLIMATE

AKADEMISK FORLAG
KØBENHAVN
1964

Meddelelser fra Laboratoriet for Varmeisolering

nr. 1 Vagn Korsgaard: Laboratoriet for Varmeisolering, 4 s. Særtryk af Ingeniørens Ugeblad 24. juni 1960.

nr. 2 Vagn Korsgaard: Termisk ækvivalente ydervægge, 8 s. Særtryk af Ingeniøren nr. 11, 1961.

nr. 3 Vagn Korsgaard: Den principielt rigtige opbygning af en ydervæg, 26 s. Særtryk af Husbygningsteknik 1961, udg. af Teknisk Forlag, Kbhvn.

nr. 4 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Solafskærmning af vinduer og måling af solindfaldet gennem forskellige typer varmeisolerende vinduesruder. Udsolgt. Særtryk af Ingeniøren nr. 3, 1962.

nr. 5 Vagn Korsgaard og Th. Lund Madsen: Registrering af sol- og himmelstråling gennem vinduer. Særtryk af Ingeniøren nr. 9, 1962.

nr. 6 Vagn Korsgaard, Jørgen S.R. Nielsen og Jens R. Jensen: Krydsvarmevekslers dynamik og regulering, 174 s. Udgivet sammen med Servolaboratoriet 1962 i kommission hos Akademisk Forlag, København.

nr. 7 Axel Rubinstein: Metoder til bestemmelse af varmeledningstal, med særlig vægt på teorien for de instationære metoder samt nogle målinger med en termosonde af egen konstruktion, 100 s. Licentiatafhandling 1963, i kommission hos Akademisk Forlag, København.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD

1. INDLEDNING

2. PRØVEHUSETS OPBYGNING
   - 2.1. Beliggenhed
   - 2.2. Den bærende konstruktion
   - 2.3. Valg og udførelse af prøvevægge
   - 2.4. Husets opvarmning

3. KLIMAMÅLINGER
   - 3.1. Måleprincip
   - 3.2. Måling af vindhastighed og -retning
   - 3.3. Måling af nedbør og slagregn

4. MÅLING AF PRØVEVÆGGENES VARMEMODSTAND
   - 4.1. Varmestrømsmåling
   - 4.2. Kalibrering af varmestrømsmålere
   - 4.2.1. Kalibrering i λ-apparat med beskyttelsesring
   - 4.2.2. Kalibrering af varmestrømsmålere med kendt kalibreringskonstant
   - 4.2.3. Sammenligning mellem varmestrømsmålernes visning i kalibreringsapparatet og på en prøvevæg
   - 4.2.4. Sammenligning mellem Brown-måler og laboratoriets måler
   - 4.2.5. Kalibreringskonstantens variation med varmestrømsintensiteten
   - 4.2.6. Kalibreringskonstantens variation med varmestrømsmålerens temperatur
   - 4.3. Måling af temperaturdifferens
   - 4.4. Måling og registrering af termospændinger
   - 4.5. Bearbejdning af måleresultater
   - 4.6. Usikkerhedsoverslag

5. MÅLINGERNES RESULTAT
   - 5.1. 30 cm hule teglstensvægge med senere ifyldt hulmursisolering
   - 5.2. 30 cm hule mure isoleret under opførelsen

5.3. Gasbetonvægge
5.4. Træelementvægge
5.5. Betonelementvægge
5.6. Halvstensteglstensvægge
5.7. Konklusion

6. RÉSUME

SUMMARY

TABELLER

FORORD

I årene efter den anden verdenskrig bevirkede de høje brændselspriser, at der opstod en almindelig interesse for at forøge såvel nye som eksisterende huses varmeisolering. Samfundets åbenbare interesse i de herved mulige besparelser i valuta til brændselsindkøb bevirkede, at myndighederne og pengeinstitutterne på forskellig vis søgte at stimulere denne interesse, hvilket har bevirket at mange huse er blevet mer-isoleret og i almindelighed med et tilfredsstillende resultat.

Da en meget stor del af de eksisterende huse især parcelhusene har hule teglstensmure som ydervægge, var det en nærliggende tanke at forøge disse vægges isoleringsevne ved at fylde et isoleringsmateriale i hulrummet. Denne mulighed blev da også anvendt i stor udstrækning i en årrække, men ikke altid med lige godt resultat, idet alle mulige fyldmaterialer blev anvendt kritikløst lige fra slagger til papirstumper.

Da jeg var af den opfattelse, at en rigtig udført hulmursisolering kunne få stor valutamæssig betydning, ville det i høj grad være ønskeligt at få prøvet de fyldmaterialer, som ikke uden videre kunne anses for uegnede. Formålet med en sådan prøvning skulle i første række være at konstatere, hvilken forbedring af den hule teglstensmurs isoleringsevne fyldningen ville medføre. Dernæst at konstatere om fyldningen ville give anledning til fugtulemper fra kondensation eller slagregn. Endvidere at få et indtryk af materialernes holdbarhed til denne anvendelse.

Foruden hule teglstensmure ville det være af interesse at få prøvet nogle af de her i landet almindeligt anvendte ydervægskonstruktioner, blandt andet for at se, hvorledes de

igennem nogle år målte varmemodstandstal ville stemme overens med de beregnede efter Dansk Ingeniørforenings "Regler for beregning af varmetab fra bygninger".

Prøvningen ville bedst kunne gennemføres i et specielt forsøgshus, hvor facaderne udgjordes af prøvevæggene. Huset skulle være frit beliggende med den ene facade orienteret mod den mest fremherskende slagregnsretning. Forsøgene måtte strække sig over en årrække.

Efter at have overbevist mig selv om, at det ville være ulejligheden værd at gennemføre sådanne forsøg, var min næste opgave at overbevise andre med det formål at skaffe de fornødne penge, og hvis dette lykkedes da at finde et egnet sted at bygge prøvehuset.

I løbet af et års tid efter mange samtaler og megen skriveri lykkedes det at skaffe de nødvendige pengemidler, og jeg vil gerne her benytte lejligheden til at takke følgende firmaer, institutioner og fonds for deres økonomiske støtte:

A/S Dansk Gasbeton
A/S Dansk Glasuldfabrik
A/S Rockwool
Kalk- og Teglværksforeningen
Boligministeriets Produktivitetsfondsudvalg
Statens teknisk-videnskabelige Fond
Dansk Ingeniørforenings Rationaliseringsudvalg
(Marshallbevilling)
J. Lauritzen Fondet
Thomas B. Thriges Fond

Prøvehuset var først tænkt placeret på taget af Danmarks tekniske Højskoles bygninger på Østervold ved siden af det tidligere opførte varmetekniske forsøgshus, idet dette ville have en række praktiske fordele, især med hensyn til montering og pasning af måleapparaturet. Beliggenheden, orienteringen og især pladsforholdene var imidlertid mindre gode, og jeg besluttede derfor at se mig om efter et andet sted

at placere prøvehuset. Kravet om fri beliggenhed, helst direkte på jorden, gjorde, at jeg måtte søge i Københavns omegn.

Ved imødekommenhed fra bestyrelsen og direktøren for Hydro- og Aerodynamisk Laboratorium fik jeg tilladelse til at opføre prøvehuset på den af laboratoriet ejede grund i Hjortekær. Huset blev opført på åben mark langs med Helsingør motorvejen umiddelbart syd for Rævehøjvej i løbet af efteråret 1958, d.v.s. på den anden side af motorvejen, men midt for det areal hvor den nye højskole i Lundtofte nu er under opførelse. På dette tidspunkt var der dog endnu ingen, der tænkte på at flytte højskolen fra Østervold til Lundtofte.

Prøvehusets udseende, som er nøje bestemt ved dets funktion, har givet anledning til en del besværligheder, idet Lyngby-Tårbæk kommune fandt huset skæmmende for omgivelserne og forlangte derfor en skærmende beplantning af popler. Da en sådan beplantning ville ødelægge forsøgene, gik kommunen modstræbende med til at vestfacaden, der er mest udsat for slagregn, fik lov at ligge frit, men husets øvrige sider skulle skjules af popler. En senere ansøgning til kommunen om at få lov til at forlænge prøvehuset er blevet afvist udfra de samme æstetiske betragtninger. Kommunens tilladelse til at have prøvehuset liggende det pågældende sted gælder kun for en kortere årrække, og det må derfor forudses, at det vil blive forlangt fjernet. Da det imidlertid vil være ønskeligt, at der også fremover her i landet findes et prøvehus af denne type, vil det være nødvendigt at se sig om efter en anden placeringsmulighed, som helst skal være i nær tilknytning til et teknisk forskningsinstitut. En nærliggende mulighed ville være på den anden side af motorvejen, på den nye højskoles terræn. Denne mulighed må dog anses for udelukket, idet den nye højskole bygges efter gennemført æstetiske principper. En anden og forhåbentlig endnu realisabel mulighed er at placere prøvehuset i tilknytning til de planlagte byggeforskningslaboratorier på et areal ved Hørsholm, men det er vigtigt i tide at tage såvel den pågældende kom-

mune som arkitekt i ed på, at de vil acceptere den slags forsøgsteknisk bestemte bygningers udseende, ellers risikerer vi igen engang ved opførelsen af en teknisk forskningsanstalt, at teknikken må vige for æstetikken.

Lyngby i september 1963

Vagn Korsgaard

INDLEDNING

Da beslutningen om at foretage langtidsmålinger af en række hyppigt anvendte ydervægskonstruktioners varmeisoleringsevne blev taget, var laboratoriet helt uden erfaring i og uden måleudstyr til sådanne målinger. Der fandtes imidlertid forsøgshuse til tilsvarende målinger forskellige steder bl.a. i Norge, Sverige og England, og der er ved udformningen af væglaboratoriet i Hjortekær, i så vid udstrækning som det har været muligt, bygget på erfaringerne fra disse lande.

Ved placeringen af prøvehuset har man forsøgt at give det en så udsat beliggenhed som muligt. Alle prøvevægge er orienteret mod vest, som statistisk er det verdenshjørne, hvorfra den største slagregnsmængde kommer. Østfacaden, som har en noget mere afskærmet beliggenhed, er opbygget af de samme typer prøvevægge som vestfacaden, således at der er mulighed for at sammenligne to ens vægge med forskellige klimapåvirkninger.

Det er værd at nævne, at der i den første målesæson kun kom meget lidt slagregn i det hele taget, næste år kom størstedelen fra øst (hvor huset ligger delvis i læ), og først i den tredie og foreløbig sidste måleperiode kom regnen, som den burde ifølge statistikken.

Der findes flere metoder til kontinuerlig bestemmelse af bygningsdeles varmeisoleringsevne. På Statens Forskningsanstalt för Lantmannabyggnader i Lund har man anvendt en såkaldt hot box til denne måling. Måleprincippet går i korthed ud på, at der inde i prøvehuset anbringes en kraftigt isoleret kasse op mod hver af de vægge, som ønskes undersøgt. Kassen er åben ud mod væggen og forsynet med et elektrisk varmelegeme og en termostat. Temperaturen i kassen indstilles på samme niveau som udenfor i huset, d.v.s. at al den varme,

som tilføres kassens indre, går ud gennem prøvevæggen. Ved måling af denne effekt kan varmestrømmen gennem prøvevæggen bestemmes, når kassens effektive areal kendes. Når den udvendige og indvendige temperatur samtidig måles, kan væggens k-værdi beregnes.

På Building Research Station i England anvendes en lignende metode. Her bruges imidlertid hele rummet bag prøvevæggen som hot box. Den til rummet førte effekt måles, medens man med termoelektriske varmestrømsmålere kontrollerer, hvor megen varme der tabes ud gennem de fem meget kraftigt isolerede sider af rummet. Differensen mellem disse to varmemængder angiver varmetabet gennem prøvevæggen.

I Trondheim på Norges tekniske Højskole måler man direkte varmetabet gennem prøvevæggene ved hjælp af termoelektriske varmestrømsmålere, som anbringes på de indvendige vægoverflader. Målernes termospænding registreres på elektroniske skrivere, og ved planimetrering af de her fremkomne kurver er det muligt at bestemme middelvarmemodstanden over en ønsket periode.

I prøvehuset i Hjortekær er opgaven at registrere varmemodstanden over 32 prøvevægge. Dette ville blive både bekosteligt og kompliceret ved anvendelse af hot box metoden, bl.a. kræver denne metode en meget konstant rumtemperatur, og dette krav kunne ikke opfyldes alene af den grund, at prøvehuset i begyndelsen på grund af pladsmangel fungerede både som laboratorium og som værksted.

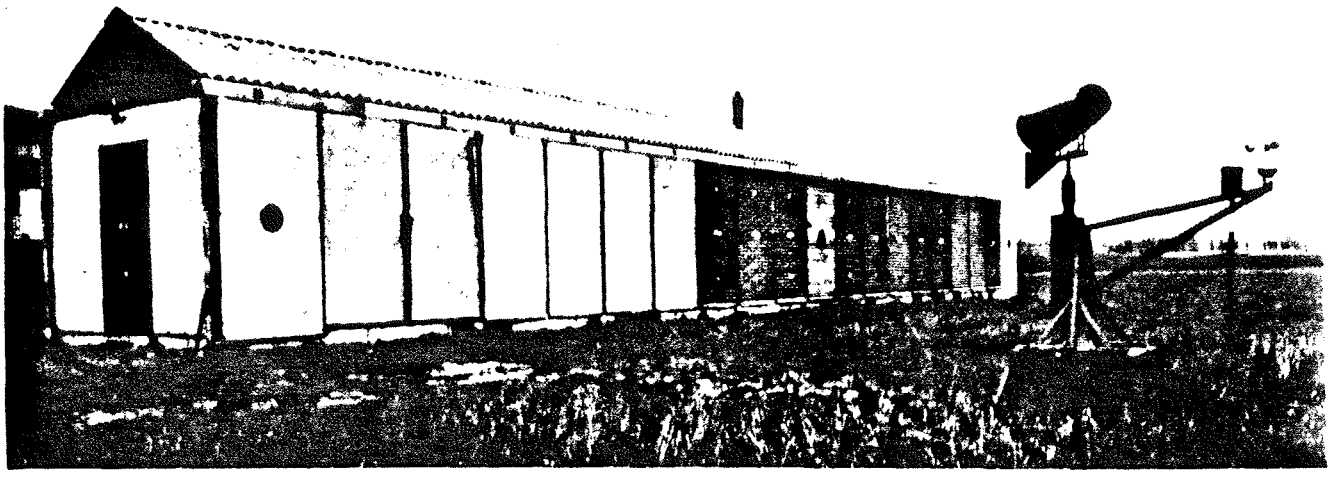
Det blev da besluttet at måle varmestrømmen direkte ved hjælp af termoelektriske varmestrømsmålere. Der er anbragt tre målere lodret over hinanden på hver væg for at få et gennemsnit af varmestrømmen gennem et lodret snit i væggen. Alle prøvevægge er isoleret fra hinanden og fra loft og fundament. Dette, i forbindelse med at varmestrøm og temperaturdifferens overalt måles mindst 0,5 meter fra prøvevæggens kanter, betyder, at det er en endimensional varmestrøm, som måles. Der er altså ikke taget hensyn til det ekstra varmetab, som normalt forekommer langs en vægs kanter og langs fundamentet.

Det valgtes at bestemme prøvevæggenes varmemodstand fra overflade til overflade og ikke selve k-værdien. Kontinuerlig måling af den effektive k-værdi kræver et temmeligt indviklet måleudstyr. Især er bestemmelsen af den udvendige resulterende temperatur vanskelig, fordi strålingskomponenten svinger voldsomt døgnet igennem, fra kraftig solindstråling til udstrålingen til en klar nattehimmel. De i afsnit 5 opgivne målte k-værdier er derfor alle fremkommet på den måde, at man til den målte M-værdi har lagt den udvendige og indvendige overgangsmodstand, i Ingeniørforeningens Regler angivet til henholdsvis 0,05 og 0,15 kcal/hm^{2}C. Ved de godt isolerende vægge, der her er tale om, udgør overgangsmodstanden kun en lille procentdel af den samlede varmemodstand.

Ved opbygningen af måleudstyret er der overalt lagt vægt på at nedsætte det manuelle arbejde mest muligt. Målingerne falder i to hovedgrupper, for det første klimamålingerne og for det andet målingerne af varmemodstandstallene for alle prøvevæggene.

Klimamålingerne d.v.s. målingerne af vindretning, vindhastighed, nedbør, slagregn og solstråling registreres på hulbånd, hvorefter den videre bearbejdning foregår på Regnecentralen. Målingen af varmestrøm gennem og temperaturdifferens over de 32 prøvevægge registreres på 64 telefontællere, som en gang i døgnet fotograferes, hvorefter tællerdifferenserne kan beregnes for de tidsrum, hvorover middelvarmemodstanden ønskes målt.

Det specielle måle- og registreringsapparatur, der er udviklet og fremstillet på laboratoriet, har i høj grad medvirket til at gøre beregningsarbejdet overkommeligt.



2. PRØVEHUSETS OPBYGNING

2.1. Beliggenhed

Huset er opført i 1958, og det er beliggende på Rævehøjvej 15 i Hjortekær.

Beliggenheden er valgt med henblik på, at vægelementerne udsættes for så kraftige klimapåvirkninger som muligt. Som det fremgår af fig. 1, ligger huset meget frit, kun på øst- og til dels nordsiden er der bebyggelse i nærheden. Mod syd og vest, hvor erfaringsvis de største klimapåvirkninger i form af vind og slagregn forekommer, er der ingen bebyggelse eller beplantning indenfor en kilometers afstand.

Husets form og orientering er valgt således, at der bliver to lange facader mod vest og øst. I hver af disse er der plads til 18 vægelementer. Det bliver således muligt at sammenligne ens vægelementer med en udsat og en mere beskyttet beliggenhed.

2.2. Den bærende konstruktion

Opbygningen fremgår af fig. 2. På et betonfundament er der 30 cm over terræn rejst et stolpeskelet af 2" x 4" stolper med en modul på 122 cm. Mellem disse stolper er prøvevæggene

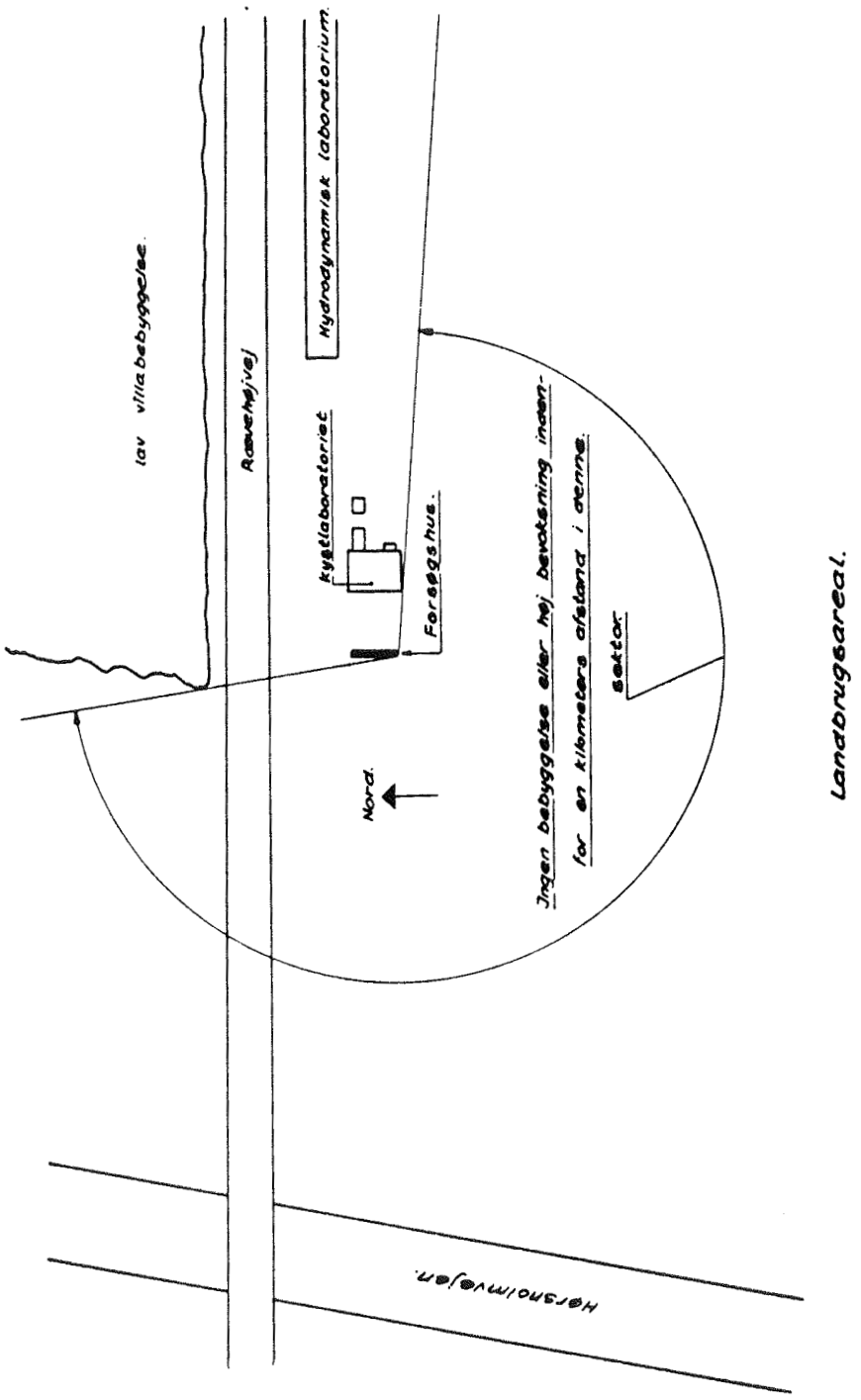


Fig. 1. Beliggenhed af forsøgshus for afprøvning af vægelementer udsat for det naturlige klima.

Orientation of the test house. The test walls are exposed to the natural climate.

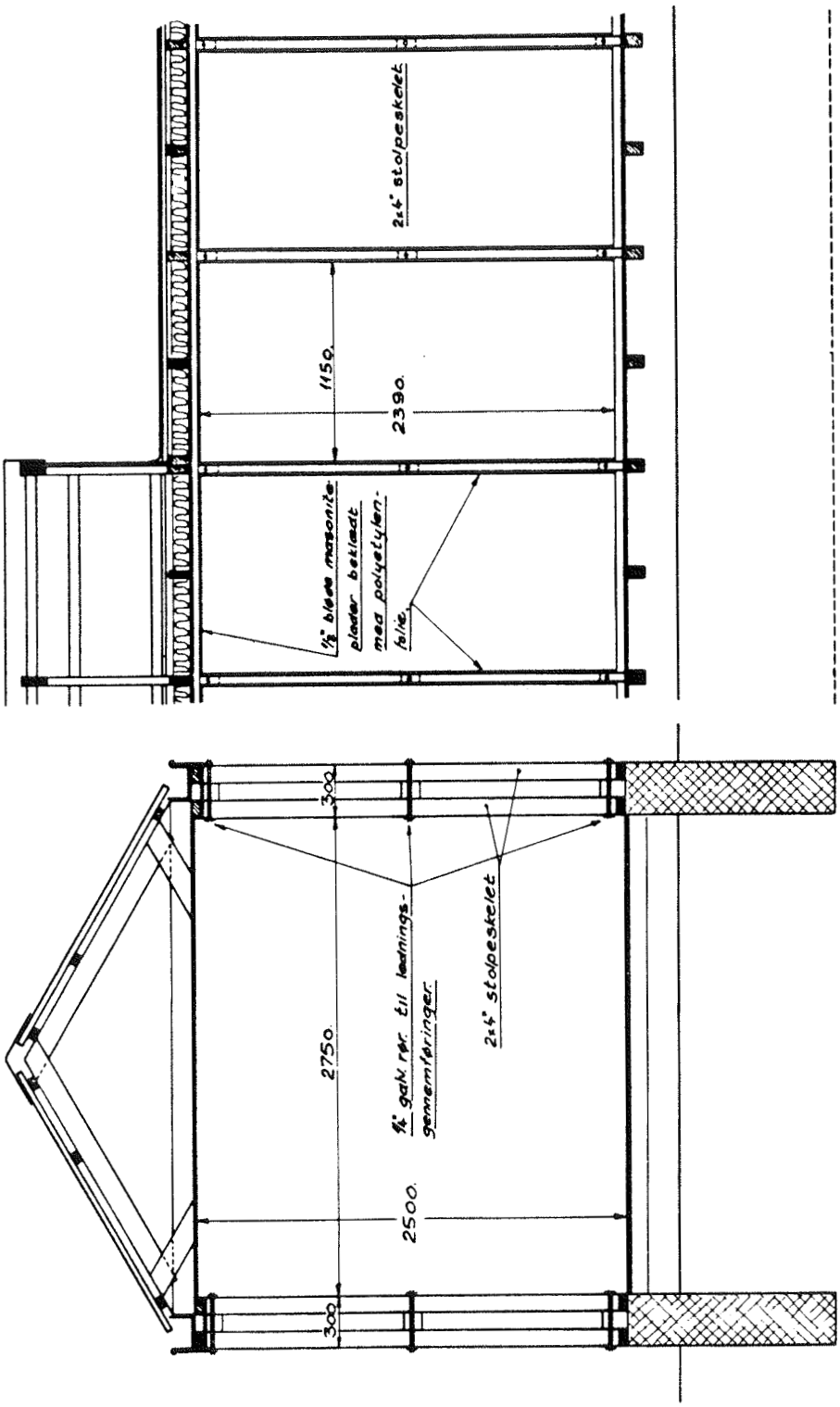


Fig. 2. Forsøgshusets konstruktion.
Construction details of the test house.

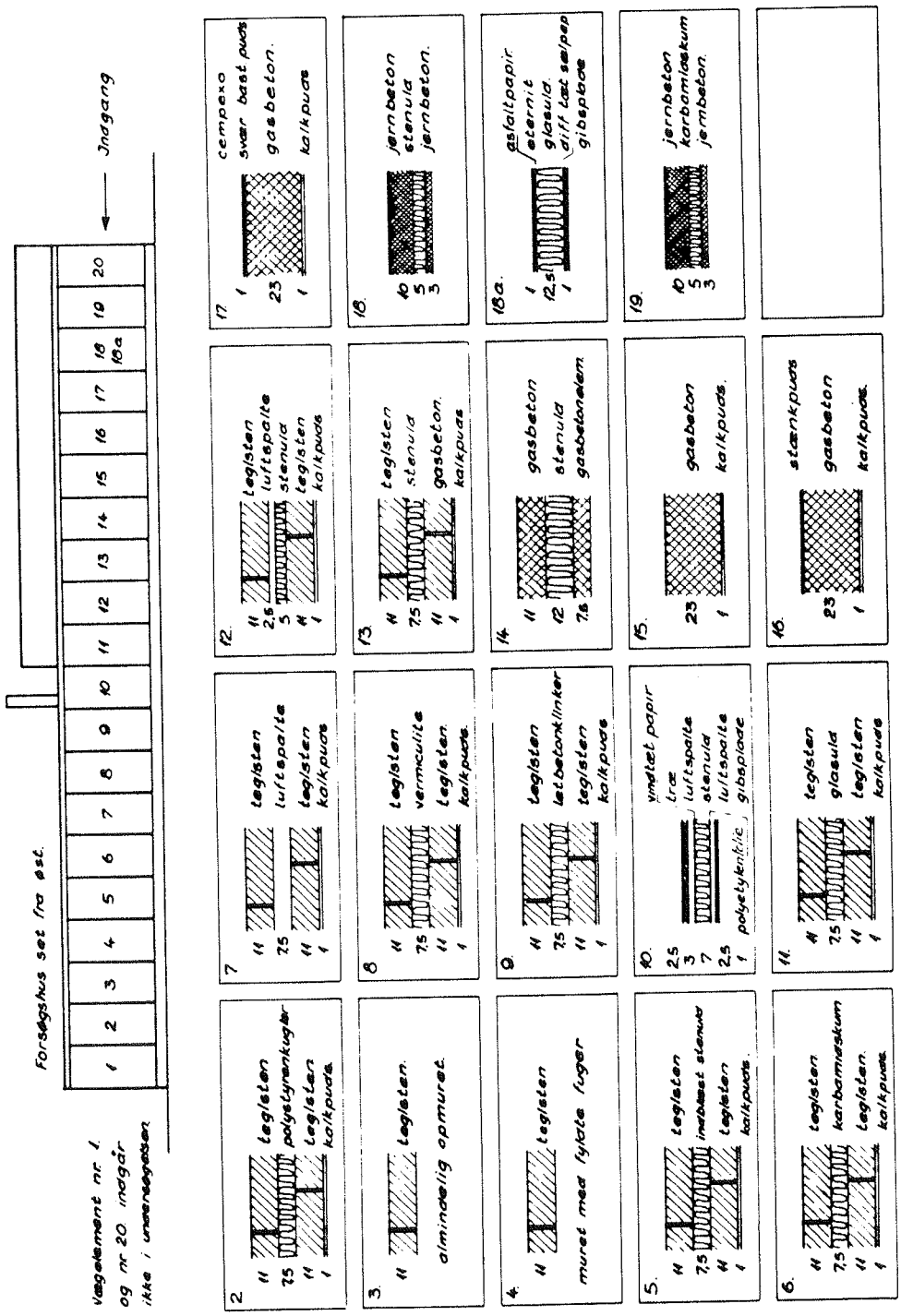


Fig. 3. Oversigt over de afprøvede vægkonstruktioner.
Horizontal sections of the test walls.

anbragt. For at opnå en isolering mellem disse er der på begge sider af stolperne opsat bløde masoniteplader beklædt med polyetylenfolie for at undgå fugtindtrængning. Væggene er opmuret ovenpå en rem bestående af 2 stk. 2" x 4" lægter for at opnå nogen isolering mod fundament. Til tætning af alle fuger mellem vægelementer og stolpeskelet er anvendt en plastisk kit.

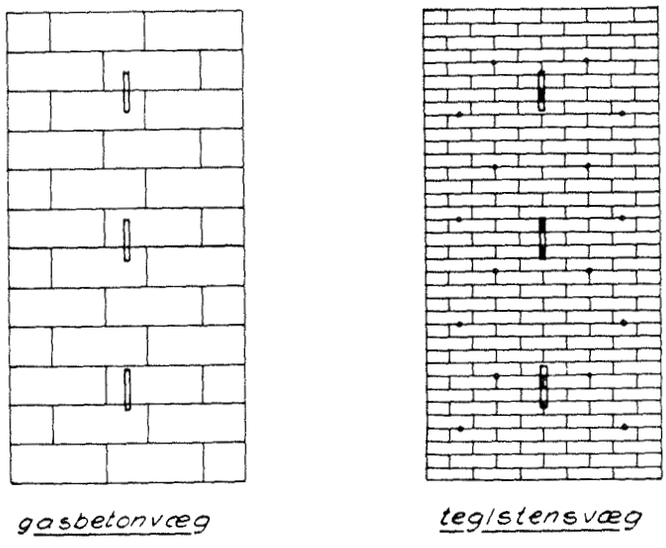


Fig. 4. Placering af ståltrådsbindere og varmestrømsmålere i prøvevægge.

Position of the steel binders and the heat flow meters on the test walls.

Huset er opført uden udhæng af nogen art for at få den fulde slagregnspåvirkning på væggene. Tagrenden bevirker endda en ekstra slagregnstilførsel til væggene, svarende til at disse havde en højde helt op til tagrendens kant.

2.3. Valg og udførelse af prøvevægge

Ved valget af prøvevæggene er der lagt vægt på at få så mange som muligt af de her i landet almindeligt anvendte ydervægskonstruktioner repræsenteret, se fig. 3.

Den hyppigst anvendte ydervæg er en 30 cm hul teglstensmur, eventuelt med en eller anden form for isolering i hulrummet.

Ni af prøvevæggene består da også af sådanne 30 cm hule teglstensvægge med forskellige former for hulmursisolering. Alle teglvæggene er opmuret af den samme murer. Denne fik besked på at arbejde helt, som han plejede, for så vidt muligt at undgå en ekstra god udførelse af murerarbejdet. Der er til facadesten brugt bløde, maskinstrøgne mursten og til bagmur almindelige bagmursten fra Frederiksholm Teglværk. Opmuringen er foretaget i 7 1/2 % kalkmørtel. Fugningen er foretaget efter udkradsning til 13 mm's dybde, med en mørtel fremstillet af 7 1/2 % kalkmørtel, hvortil der er sat 3 l almindelig Portland-cement pr. balje.

Der er indmuret 2 stk. 5 mm galvaniserede ståltrådsbindere i hvert fjerde skifte, som vist på fig. 4. Alle teglstensvæggene er indvendigt grovpudsede med 1 cm 7 1/2 % kalkmørtel og finpudsede, medens de udvendigt er ubehandlede.

Med en enkelt undtagelse (væg nr. 7) er alle teglstensvæggene hulmursisolerede enten under opmuringen (væg nr. 11, 12 og 13), eller efter at der i en kort periode var foretaget målinger uden hulrumsisolering. (væg nr. 2, 5, 6, 8 og 9).

For at undersøge hvor stor betydning det har, at teglstensvægge opmures med fyldte fuger, er der medtaget to prøvevægge (væg nr. 3 og 4) kun bestående af den udvendige halve stens vange, opmuret med henholdsvis almindelige fuger og med fyldte fuger (se fig. 5), således at eventuelle regngennemslag umiddelbart kan iagttages inde fra huset.

Foruden de ovennævnte hule teglstensvægge findes der endnu en hul prøvevæg (væg nr. 14), opmuret af gasbeton og med stenuld som hulmursisolering. Bagmuren består af en 7,5 cm tyk gasbetonplade.

Med det formål at undersøge betydningen af en udvendig overfladebehandling af gasbetonvægge, er der medtaget tre prøvevægge af 23 cm gasbeton (væg nr. 15, 16 og 17). Disse vægge er alle opmuret af gasbeton med en rumvægt på ca.

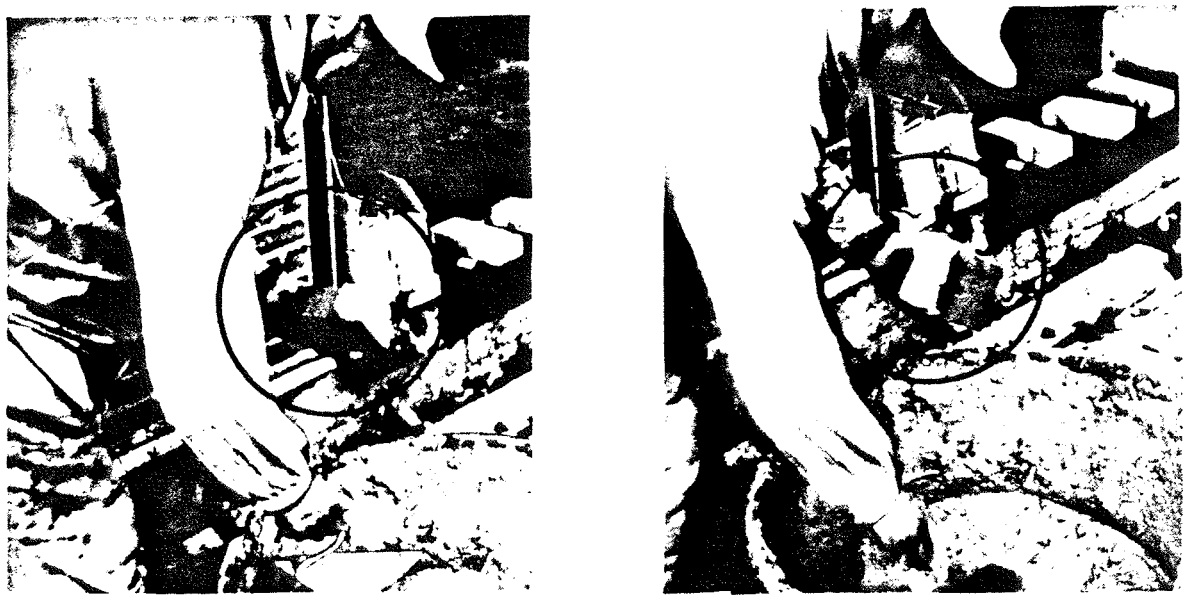


Fig. 5. Muring med almindelige og med fyldte fuger.
Bricklaying with ordinary and filled joints.

725 kg/m^3. Opmuringen og fugningen er udført på samme måde og med de samme materialer, som ovenfor angivet for teglstensvæggene. De tre 23 cm gasbetonvægge er indvendigt pudsede med 1 cm kalkpuds. Udvendigt er væg nr. 15 ubehandlet, nr. 16 er behandlet med Miramat stænkpuds og nr. 17 er udvendigt pudset med svær bastardpuds og malet med Cempexo.

De fire sidste prøvevægge i forsøgshuset er prefabrikerede bygningselementer. Væg nr. 18 og 19 er jernbetonelementer, isoleret med henholdsvis stenuld og karbamidskum.

Væg nr. 10 er en træelementvæg, hvis opbygning fremgår af fig. 3.

Den sidste væg (nr. 18a), som kun har været med i måleperioden 1961-62, består yderst af en eternitplade og inderst af en gibsplade. Det 12,5 cm brede mellemrum mellem disse plader er fyldt med glasuld. Mellem eternitpladen og isoleringen er indlagt et lag asfaltpapir og mellem gibspladen og isoleringen et lag diffusionstæt sælpap.

2.4. Husets opvarmning

Målingen af ydervæggenes isoleringsevne er foretaget som en bestemmelse af de enkelte vægges M-værdi udfra en måling af varmestrøm og overflade-temperaturdifferens. Som følge heraf er kravene til ensartet rumtemperatur ikke særlig store. Der er derfor anvendt et meget enkelt opvarmningssystem (fig. 6)



Fig. 6. Varmekammer og luftkanaler i forsøgshus.

Warm air furnace and air ducts in the test house.

bestående af en oliefyret varmluftkalorifere anbragt i et muret varmekammer midt i huset samt to 6" cirkulære blikkanaler, der fører den opvarmede luft ud mod husets to ender ca. 0,5 m over gulv. Herfra strømmer luften tilbage gennem huset og afgiver sin varme, inden den suges retur gennem to spalter i gulvet ud for varmekammeret.

Selve oliefyret, som er et forgasningsfyr, styres af en kontinuerlig virkende vædsketermostat, således at der i et

hvert øjeblik afbrændes netop den oliemængde, der er brug for til at holde den ønskede temperatur. Herved opnås, at husets indvendige temperatursvingninger bliver små og langsomme, hvilket, som det senere skal vises, er af stor betydning for målingernes nøjagtighed.

For at opnå et normalt indendørsklima er det nødvendigt i dette ubeboede hus at sørge for en eller anden form for befugtning. Metoden, der her er valgt, er enkel og effektiv. Den til befugtningen nødvendige vandmængde tilføres den opvarmede luft ved fordampning af vand, som drypper ned på selve fyrboksen. Mængden af vand, som ønskes fordampet, reguleres af en hygrostat, som lader en magnetventil åbne og lukke for vandtilførslen. Hygrostaten, som ses på fig. 7, består i al enkelhed af et stykke tegnepapir, som gennem en vægtstang påvirker en mikrokontakt til åbning eller lukning når papiret henholdsvis forlænges eller forkortes, fordi den relative fugtighed stiger eller falder.



Fig. 7. Hygrostat.
Humidostate.

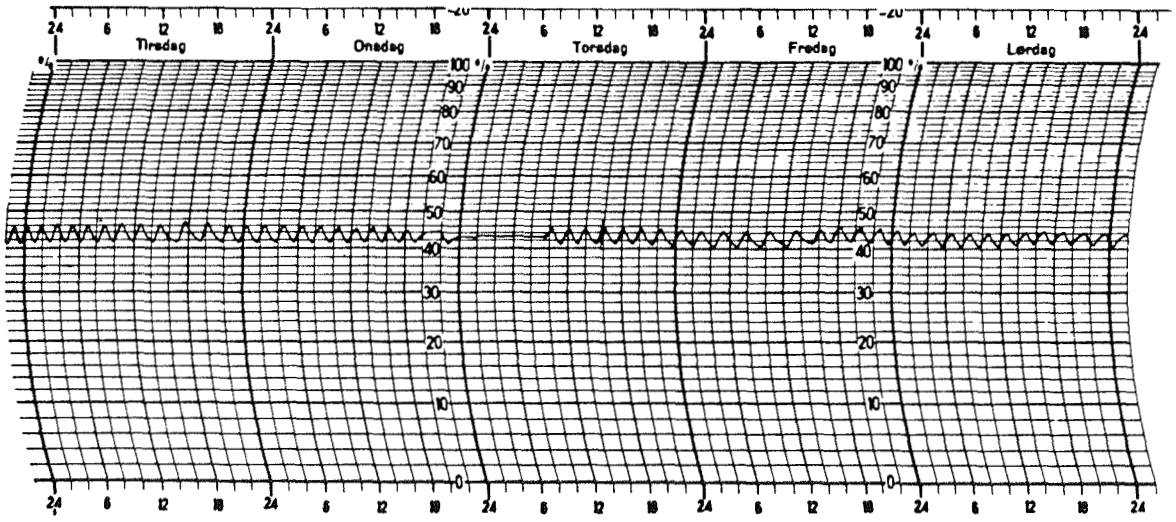


Fig. 8. Registreringskurve af den indvendige relative fugtighed.

Registering curve of the inside relative humidity.

Det er, som det ses på kurven, fig. 8, over den relative fugtigheds variationer under en måleperiode, ved denne enkle metode muligt at holde den relative fugtighed indenfor ca. ± 3 % af det ønskede.

3. KLIMAMÅLINGER

For at få et begreb om de ydre påvirkninger, vægelementerne udsættes for, er der ved forsøgshuset opbygget en vejrstation, som registrerer vindens retning og hastighed, samt regn i form af nedbør og slagregn. Endvidere måles solstrålingsintensiteten bag en lodret dobbelt glasrude.

3.1. Måleprincip

Det har ved alle målinger i forsøgshuset været en grundtanke at undgå målemetoder, som erfaringsmæssigt kræver et stort bearbejdningsarbejde, før de bliver nogenlunde overskuelige.

Måleudstyret, som er udviklet og fremstillet på laboratoriet, er således indrettet, at det hver time angiver middelværdierne af de forskellige klimakomponenter i den forløbne time. Det er således aldrig nødvendigt at foretage en tidsrøvende planimetrering af registreringskurver for at nå disse middelværdier. Til gengæld går de helt fine nuancer tabt. F.eks. vil en kort, kraftig regnbyge afhængig af tidspunktet registreres som en middelregnintensitet i een evt. to timer. Dette har dog ingen betydning for de langtidsmålinger, som foretages på forsøgshusets vægelementer.

Princippet i måleudstyret er, at der til alle klimadata er valgt eller udviklet transducere, som omsætter en vis mængde vind, regn eller stråling til en elektrisk impuls, der kodes ind på en hulstrimmel sammen med en time- og døgnmarkering, fig. 9. Det er derefter muligt at foretage den ønskede viderebehandling af måledataene på en elektronregnemaskine.

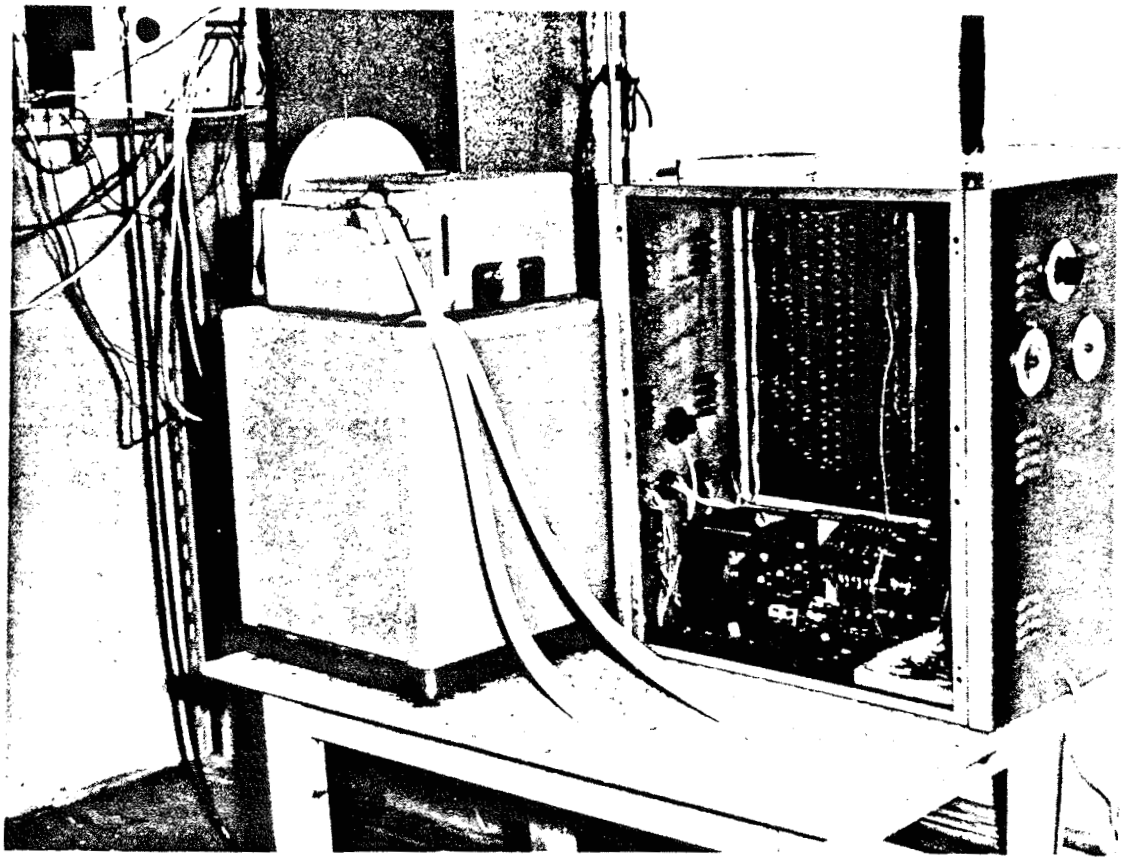


Fig. 9. Hulbåndsregistrering af klimadata.
Tape recording of climate data.

3.2. Måling af vindhastighed og -retning

Vindhastigheden måles med et Wilh.Lambrecht anemometer (fig. 10) forsynet med et kontaktværk, som giver en kontaktslutning for hver 500 m vind, der passerer anemometret. En konstant vindhastighed på 1 m/s vil altså give $\frac{3600}{500}$ = 7,2 impulser pr. time.

Vindretningen bestemmes ved at registrere hvor mange meter vind, der hver time kommer fra de otte hovedretninger. Vindimpulserne føres ind over en omskifter med 8 poler (fig. 11). Omskifterens kontaktarm styres af en vindfløj, således at den omskifterlamel, der svarer til den øjeblikkelige vindretning, er den, som leder impulsen til den tilhørende markering på hulbåndet.



Fig. 10. Vindfløj med ældre type slagregnsmåler og anemometer.

Weather vane with an earlier type of a driving rain meter and an anemometer.

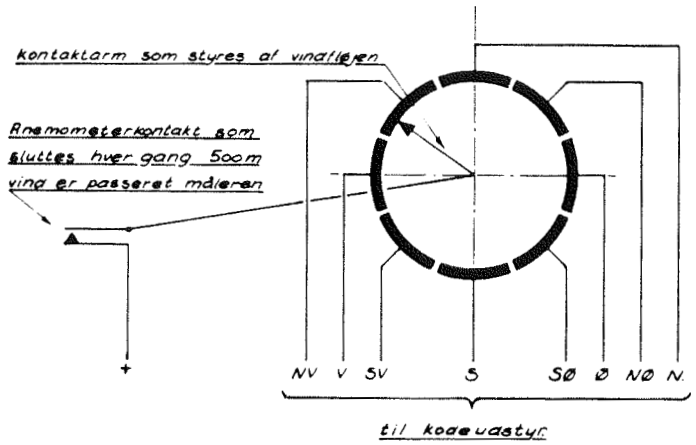


Fig. 11. Principskitse for registrering af vindretning og vindhastighed.

Simplified diagram showing the method of registering of wind direction and wind velocity.

3.3. Måling af nedbør og slagregn

Regnen er ved registreringen delt op i almindelig nedbør, d.v.s. den regnmængde, som rammer en vandret flade, og slagregn, der er den regnmængde, som rammer en lodret flade vinkelret på den øjeblikkelige vindretning. Endvidere er målt den slagregn, som rammer forsøgshusets øst- og vestfacade.

Nedbøren måles i en vandret skål og giver ingen særlige problemer. Slagregnen derimod kan give anledning til en del overvejelser. For det første er den slagregnsintensitet, som rammer en lodret flade, afhængig af denne flades udstrækning og højde over jorden. Endvidere synes målingerne at vise, at cosinusloven langt fra gælder for sammenhængen mellem slagregnsmængden og den lodrette flades vinkel med vindretningen.

For nu alligevel at få et begreb om den forekommende regnmængde ved forsøgshuset, er der konstrueret en slagregnsmåler, som måler slagregnsmængden 1,5 m over terræn, og den slagregnsmængde, som er søgt målt her, er den, som rammer en tænkt lodret flade, der hvor måleren er anbragt. Dette er opnået ved at udføre måleren uden lodrette flader, idet disse jo vil ændre vindretningen og dermed slagregnsmængden i umiddelbar nærhed af måleren, og derved i høj grad gøre det målte afhængig af den måler, som er brugt.

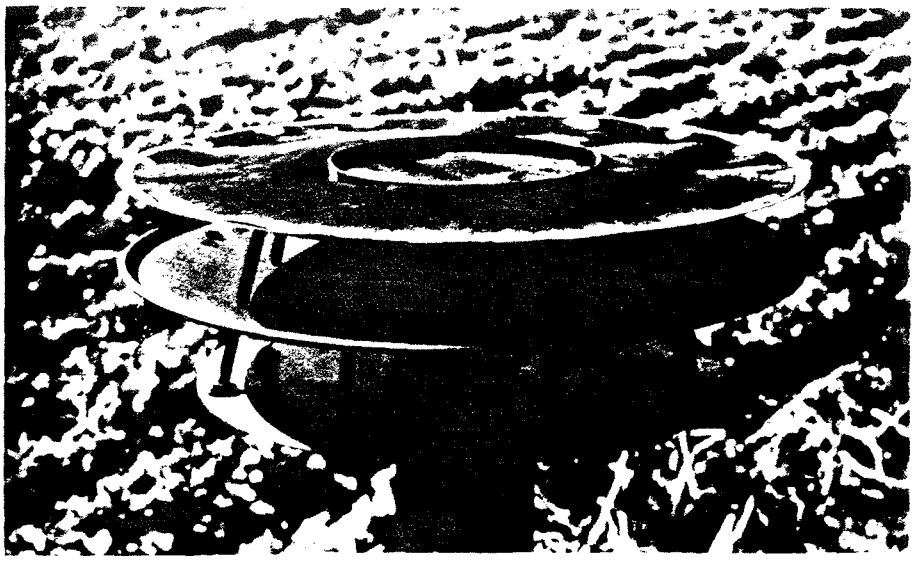


Fig. 12. Slagregnsmåler udviklet ved laboratoriet.
Driving rain meter.

Som det ses på fig. 12 er slagregnsmåleren meget enkel i sin opbygning. Den består af to cirkulære tallerkener, anbragt vandret over hinanden i en passende afstand. Virkemåden er simpelthen den, at den vind, som blæser igennem et areal bestemt af tallerkenernes diameter gange deres afstand, vil aflevere sin regn i den nederste tallerken, hvorfra vandet så føres videre til registrering.

Det er klart, at denne slagregnsmåler vil måle forkert ved store vindhastigheder, hvor slagregnens bevægelsesretning nærmer sig vandret, således at en del af regndråberne blæser helt igennem regnmåleren. På fig. 13 er vist, hvor stor denne fejl bliver ved forskellige indfaldsvinkler. Ved

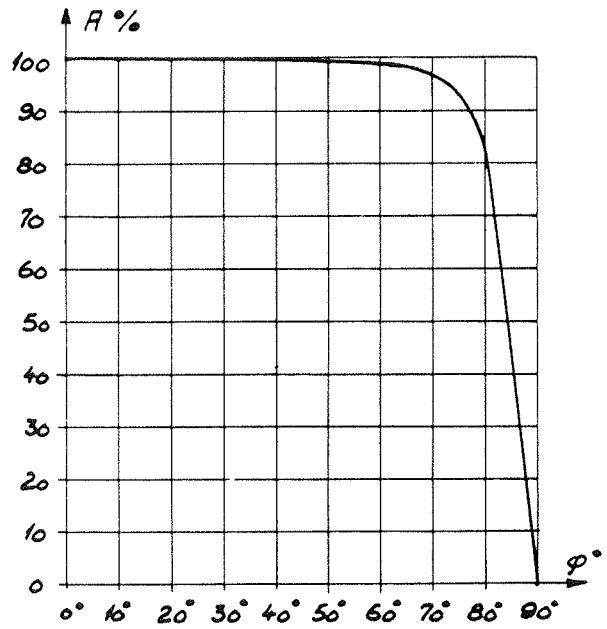


Fig. 13. Kurve over den af slagregnsmåleren teoretisk registrerede regnmængde i procent af den virkelig forekommende. φ er slagregnsretningens vinkel med lodret.

Curve of the theoretical amount of rain which should be registered by the driving rain meter in percentage of the actual amount registered. φ is the angle of the driving rain direction to the vertical direction.

beregningen af denne kurve er der set bort fra det forhold, at den øverste tallerken med sin midterste del når ned i måle-feltet. Ved store vindhastigheder må det derfor antages, at en del af den indblæste regn vil ramme undersiden af den øverste tallerken og derved blive fanget og målt. Det vil gøre fejlen mindre end den på kurven viste.

Nedbøren måles i den skål, som på fig. 12 ses ovenover den øverste tallerken. Det finmaskede trådnet tjener til at hindre dråber, som rammer tallerkenen udenfor skålen, i at sprøjte op og falde ned indenfor skålens omkreds.

Der foretages siden efteråret 1962 sammenlignende målinger af slagregn med laboratoriets måler og en norsk måler, fig. 14, som i øjeblikket anvendes flere steder. Denne



Fig. 14. Norsk slagregns-måler.

Norwegian type of driving rain meter.

måler opsamler den slagregn, som blæser ind gennem de fire lodrette åbninger mod hvert verdenshjørne, medens nedbøren måles gennem en vandret åbning øverst.

Den slagregn, som rammer husets facader, måles med slagregnsmålere indbygget i vægelement nr. 10, altså så godt som

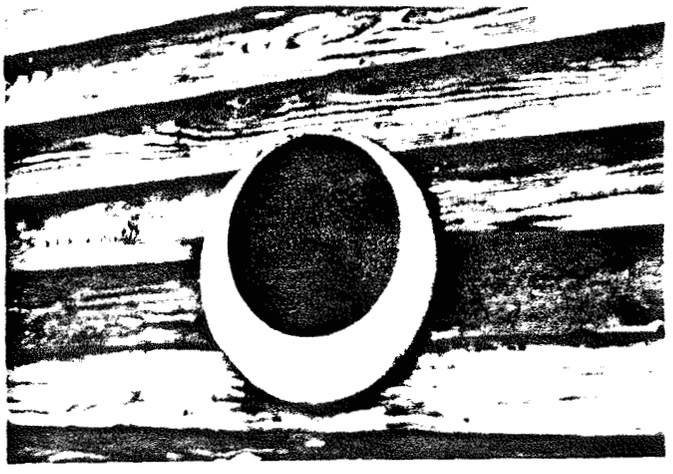


Fig. 15. Slagregnsmåler i facadeelement nr. 10.
Driving rain meter built into element no. 10.

midt på huset. Målerne, som her er anvendt, ses på fig. 15. De er udført efter CIB Working Comission on Rain Penetration's standard. Resultatet af slagregnsmålingerne på forsøgshusets facader i årene 1959-62 fremgår af fig. 16.

En af de ting, som har voldt vanskeligheder, var udviklingen af en transducer, som kunne omsætte en passende lille regnmængde (0,2 mm nedbør eller slagregn, svarende til 6 cm^3 vand) til en elektrisk impuls.

Det apparat, som efter en del ændringer nu ser ud til at kunne klare opgaven, ses på fig. 17 og 18, og virkemåden er som kort beskrevet i det følgende:

Regnvandet tilføres måleren gennem tragten A. Herfra stiger det op i røret B, indtil det når elektroden E. Når vandet rører denne, vil vandets ledningsevne via en transistorforstærker bevirke, at magnetventilen M åbnes i en vis tid - denne tid kan indstilles efter ønske ved hjælp af et tidsrelæ - samtidig med at impulstælleren går et skridt frem. Magnetventilens åbningstid er så lang, at al vandet i måleren løber ud. Men samtidig skal åbningstiden jo være lille i forhold til den tid, ventilen er lukket, da der ellers ved høje regnintensiteter vil tilføres en betydelig del af vandet i åbningstiden. Denne del unddrages volumenbestemmel-

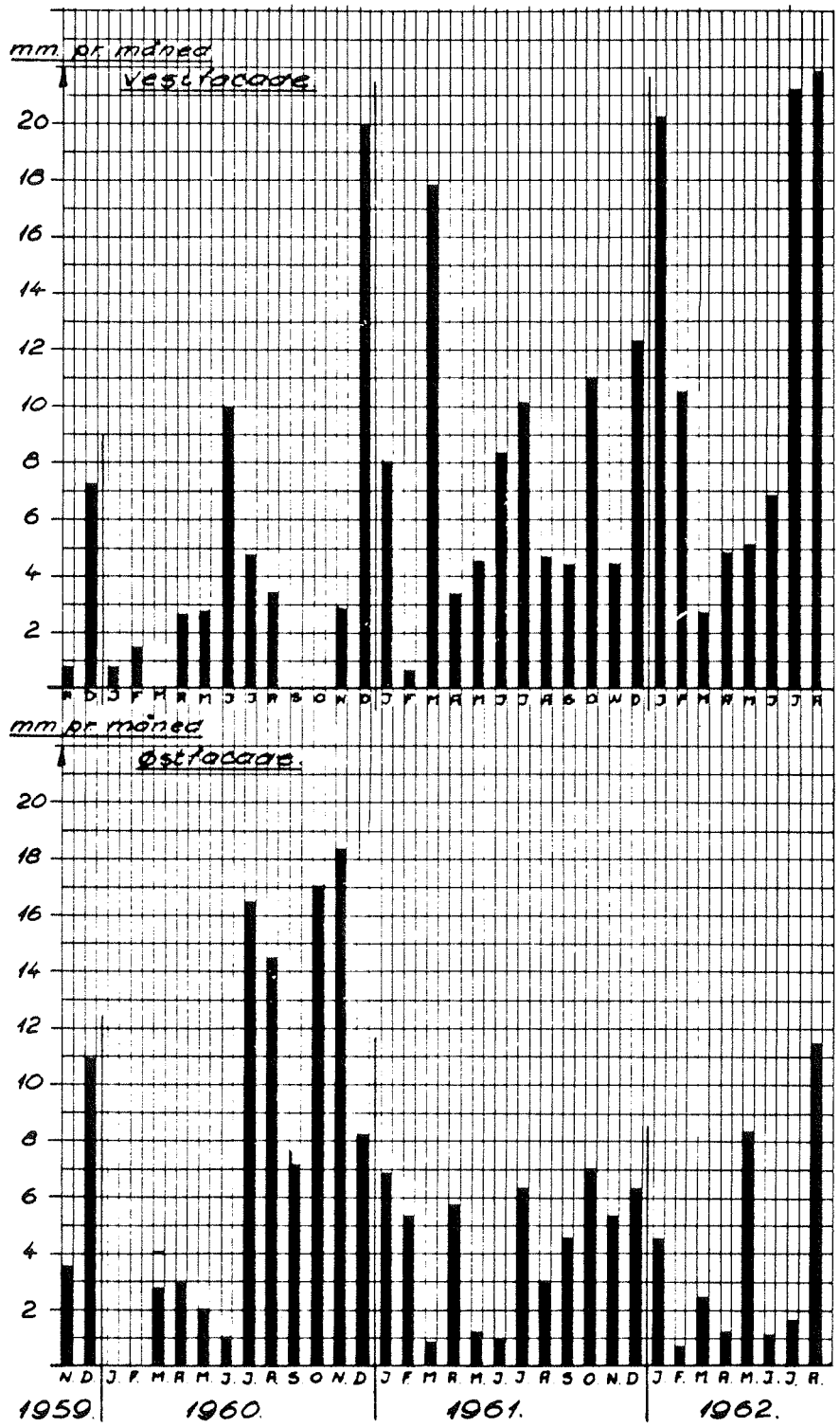


Fig. 16. Målt slagregn på forsøgshusets facader i årene 1959-62.

Amount of driving rain measured on the surfaces of the walls during the period 1959-62.

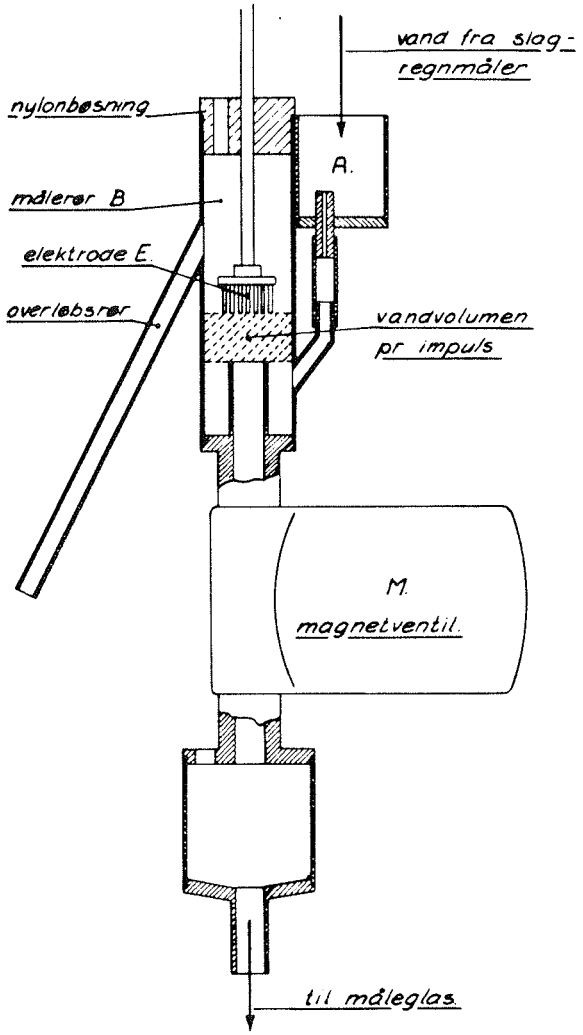


Fig. 17. Snit i slagregnstransducer udviklet ved laboratoriet.

Section of driving rain transducer.

sen og giver følgelig anledning til målefejl. Det viser sig imidlertid, at det er muligt at få vandet ud, uden at magnetventilens åbningstid medfører utilladelige målefejl. Den vandmængde, som skal give anledning til en tællerimpuls, er sat til 6,28 cm^3, svarende til 0,2 mm slagregn. Denne vandmængde kan nå at løbe ud, når magnetventilen åbnes i 0,7 sek. Med en slagregnsintensitet på 50 mm/h, hvilket skulle være et godt stykke på den sikre side af det, som kan ventes her til lands, fås en målefejl på ca. 5 % hidrørende fra det vand, som når måleren i magnetventilens åbningstid.

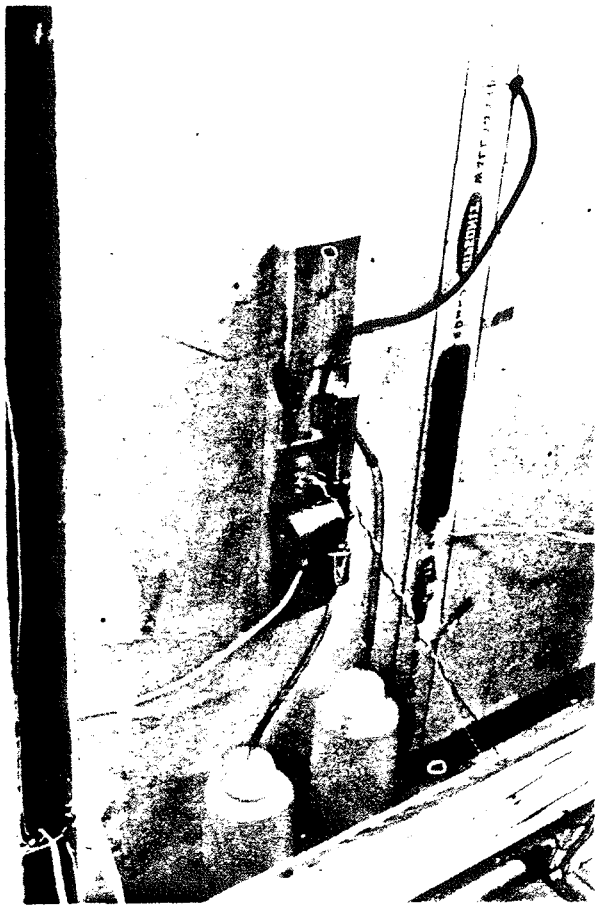


Fig. 18. Slagregnstransducer til måling af slagregn.
Driving rain transducer for measuring of the amount of driving rain against the walls.

For at sikre åbning af ventilen ved samme vandstand hver gang er det nødvendigt at udforme elektroden på en sådan måde, at der ikke kan blive dråber hængende under denne, da disse vil give anledning til for tidlig udtømning, og altså til en større målt regnmængde end den virkelig forekommende.

Ved at udforme elektroden, som vist på fig. 19, er det lykkedes at undgå dråbedannelse under pladen, når vandet rives bort ved magnetventilens åbning.

Når vandet har passeret magnetventilen, opsamles det i et måleglas. Hvis strømtilførslen eller elektronikken svigter, løber vandet gennem et overløbsrør til opsamling i et andet måleglas.

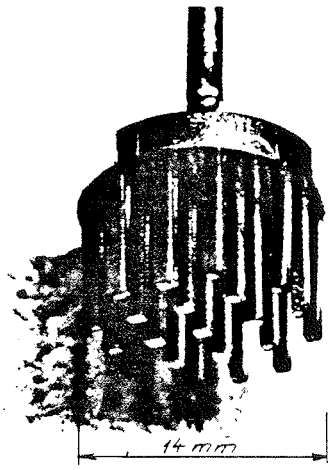


Fig. 19. Elektrode til slagregnstransducer.
Electrode for driving rain transducer.

4. MÅLING AF PRØVEVÆGGENES VARMEMODSTAND

Væggenes varmemodstand ($\frac{hm^2C}{kcal}$) bestemmes på grundlag af kontinuerlige målinger af varmestrømmen gennem væggene og temperaturdifferensen mellem væggenes indvendige og udvendige overflade.

Hvis $Q(t)$ er varmestrømmen gennem en væg til tiden t, og $\Delta\vartheta(t)$ er temperaturdifferensen mellem væggens indvendige og udvendige overflade til tiden t, så kan væggens middelvarmemodstand over en vis periode (T) bestemmes som:

$$M_T = \frac{\int_0^T \Delta\vartheta(t)dt}{\int_0^T Q(t)dt}$$

Som transducere er ved begge basismålinger valgt termoelementer som den sikreste og enkleste måde at få omsat en temperaturforskel til en størrelse, der kan måles og registreres på et standard måleinstrument.

4.1. Varmestrømsmåling

Hvis man skal måle middelvarmestrømmen gennem en inhomogen væg, f.eks. en teglstensvæg med fuger og bindere, må man have målere, som dækker hele vægarealet, og som integrerer varmestrømmen gennem hele fladen. Denne udformning vil imidlertid medføre, at den naturlige vanddampdiffusion gennem væggen hæmmes eller hindres helt, hvilket vil indvirke på væggens M-værdi, fordi varmestrømsmålerne må fremstilles af et ikke hygroskopisk materiale, der normalt er damptæt. Her er brugt plexiglas.

Man valgte, ligesom det er gjort i andre lande, f.eks. Sverige og Holland, at udforme varmestrømsmålerne således, at de kun måler på en lille del af væggens areal. Til gengæld anbringes der tre målere på hver væg, således at de, så godt som det er muligt, dækker et gennemsnit af væggens struktur.

For at få et begreb om betydningen af varmestrømsmålernes placering i forhold til ståltrådsbinderne er der på laboratoriet fremstillet en elektrisk model af et udsnit af en væg med en binder, fig. 20. Det er herved muligt, ved at

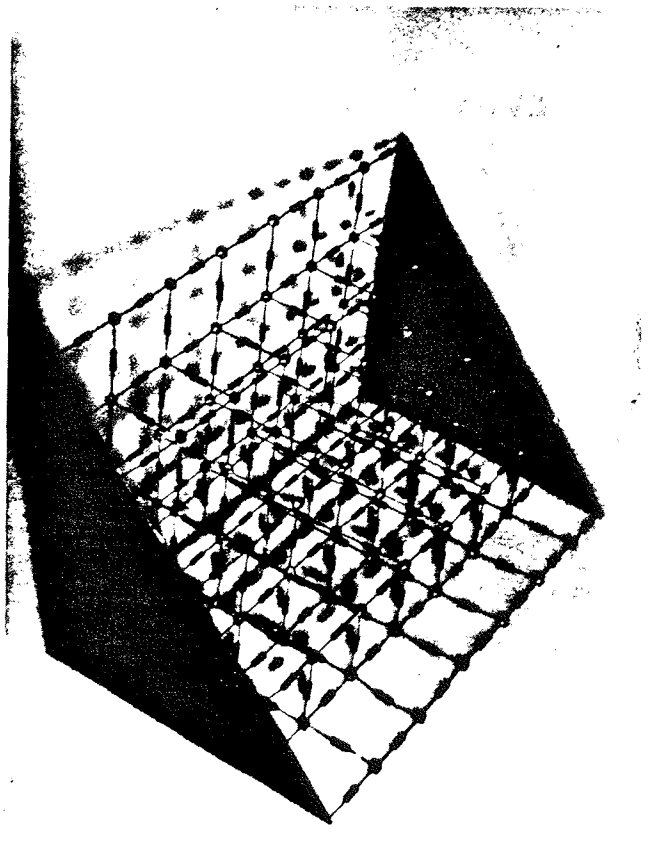


Fig. 20. Elektrisk model af hul teglstensvæg med ståltrådsbinder.

Electric model of hollow brick wall with steel binders.

erstatte væggens varmemodstand med elektriske modstande, at fremstille et tredimensionalt netværk, hvor varmestrømmen i de enkelte grene kan måles som en elektrisk strøm, når temperaturdifferensen over væggen erstattes af en spændingsdifferens.

For en 30 cm hul teglstensvæg isoleret med mineraluld er der foretaget bestemmelse af varmemodstanden ved måling af varmestrømmen gennem den indvendige vægoverflade og temperaturforskellen mellem de to vægoverflader i punkter med en afstand på 6 cm i begge retninger, idet der er forudsat en temperaturforskel på 20 °C mellem indvendig og udvendig lufttemperatur, fig.21. Varmemodstanden varierer mellem 1,91 $\frac{hm^2C}{kcal}$ udfor en binder og 2,36 $\frac{hm^2C}{kcal}$ midt mellem to bindere. Middelvarmemodstanden findes at være 2,27 $\frac{hm^2C}{kcal}$. Samme væg uden bindere har en varmemodstand på 2,61 $\frac{hm^2C}{kcal}$.

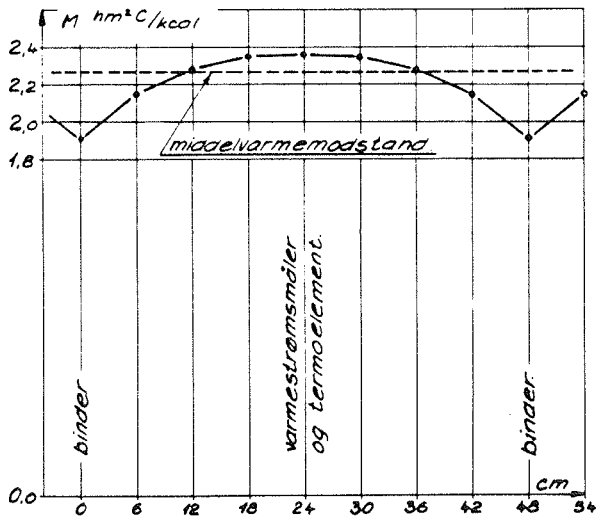


Fig. 21. En hul, velisoleret teglstensvægs varmemodstand i afhængighed af afstanden til en ståltrådsbinder.

The thermal resistance of a well insulated hollow brick wall in dependence on the distance from a steel binder.

Da både varmestrømsmålere og termoelementer, som det fremgår af fig. 4 er placeret midt imellem binderne, så må-

ler vi altså varmemodstanden, hvor denne er størst, og vi må for at få væggens middelvarmemodstand formindske vore målte M-værdier med $\frac{(2,36 - 2,27)\cdot 100}{2,36} = 4$ %. Dette er gjort for væg nr. 5, 11, og 13's vedkommende. For væg nr. 2, 6, 8 og 12 er M-værdien tilsvarende formindsket 3 %, og endelig er væg nr. 9's M-værdi formindsket 2 %, svarende til bindernes aftagende betydning med voksende λ-værdi i hulrumsisoleringen.

Målingen af varmestrøm foregår i princippet på den måde, at temperaturforskellen over en kendt og i forhold til væggen lille varmemodstand måles med stor nøjagtighed. Denne temperaturforskel vil ved stationære temperaturforhold være proportional med varmestrømmen gennem måleren og videre ind gennem væggen, såfremt varmestrømmen kan regnes for endimensional.

De benyttede varmestrømsmålere er udviklet og fremstillet på laboratoriet. Selve udformningen fremgår af fig. 22 og 23.

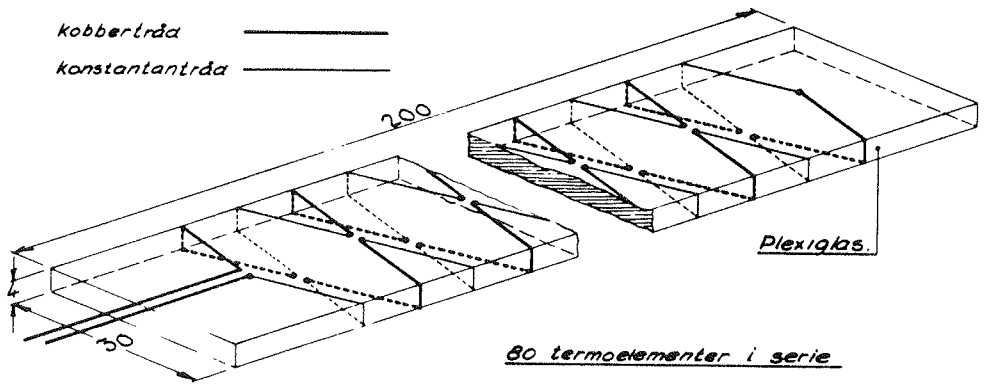


Fig. 22. Principskitse af varmestrømsmåler udviklet ved laboratoriet.

The principle of a thermoelectric heat flow meter.

Måleren består af en 4 mm tyk Plexiglasplade, hvori der er fræset spor til to modsat snoede spiraler af henholdsvis kobber- og konstantantråd. Efter påspolingen af de to tråde loddes alle skæringspunkter, og rillerne fyldes med Araldit.

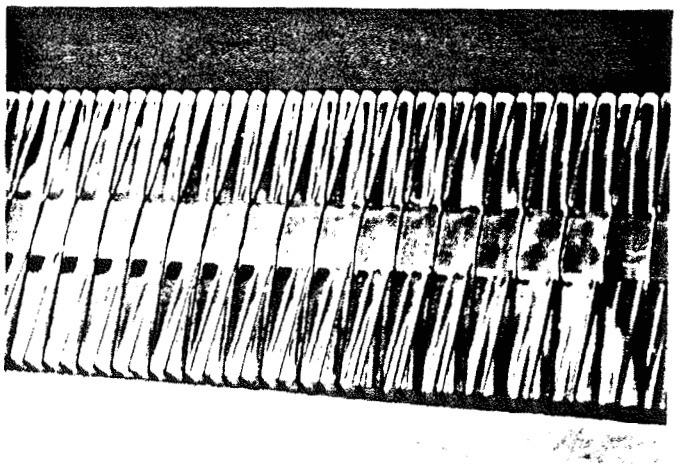


Fig. 23. Varmestrømsmåler før lodningerne fræses over.
The heat flow meter before cutting of the twin junctions.

Til sidst fræses en rille på langs midt ned gennem måleren på begge sider, således at de sammenloddede krydsningspunkter deles i to loddesteder. Herved fremkommer to termobatterier hver på 40 elementer, som forbindes i serie. Varmestrømsmålerens varmemodstand er ca. $1{,}2 \cdot 10^{-2}$ h°C/kcal eller ca. 1 % af væggens gennemsnitlige varmemodstand.

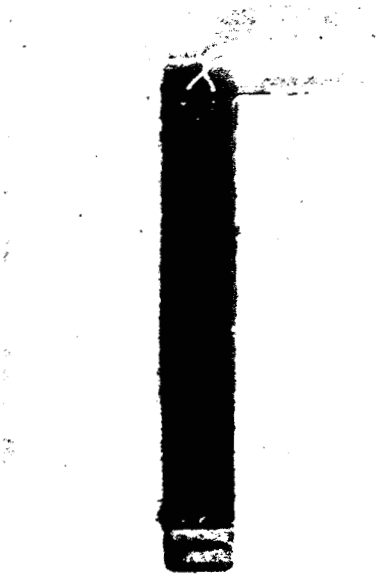


Fig. 24. Varmestrømsmåler indfældet i pudsen.
Heat flow meter sunk into plaster.

Der er som nævnt anbragt tre varmestrømsmålere på hver væg. Placeringen på henholdsvis en gasbeton- og en teglvæg fremgår af fig. 4, side 16. I begge tilfælde er målerne nedlagt i plastisk kit i en udfræsning i den indvendige puds, fig. 24. På træelementvæggene samt på de to betonelementvægge har en udfræsning ikke kunnet foretages. Målerne er her klæbet fast til den indvendige vægoverflade med plastisk kit.

4.2. Kalibrering af varmestrømsmålere

Denne kalibrering viste sig at være et af de vanskeligste punkter i hele forsøget, og det er først efter, at der i foråret 1963 under et studieophold på Building Research Station i England blev mulighed for at foretage en kontrolkalibrering af et antal varmestrømsmålere i et "guarded hot-plate apparatus", at godheden af vore egne kalibreringer er blevet tilstrækkeligt underbygget.

På det tidspunkt, da målerne skulle tages i brug på prøvevæggene, rådede laboratoriet kun over et ret primitivt måleudstyr, men der blev til kalibrering af varmestrømsmålere fremstillet et apparat, hvis opbygning og dimensioner fremgår af fig. 25. Apparatet var et forsøg på at opnå en eendimensional varmestrøm uden brug af beskyttelsesring omkring målefeltet og uden køleplader. Ved at forsyne kalibreringsapparatet med en randisolering og ved kun at benytte den midterste del af varmepladen til målefeltet er dette lykkedes.

Selve varmepladen består af en 3 mm Pertinaxplade 500 x 500 mm^2 jævnt beviklet på begge sider med kobbertråd 0,2 Ø mm og derefter lakeret flere gange. Varmepladen forsynes med en stabiliseret jævnspænding, således at middelvarmestrømmen til begge sider bliver ca. 20 $kcal/hm^2$, hvilket i størrelsesorden svarer til den varmestrøm, målerne vil komme til at måle på bygningselementer.

Under måling anbringes pladeapparatet vandret og med den nederste jernplade hvilende på tre spidser. Målingerne foretages i et temperaturkonstant rum, og for at forebygge for

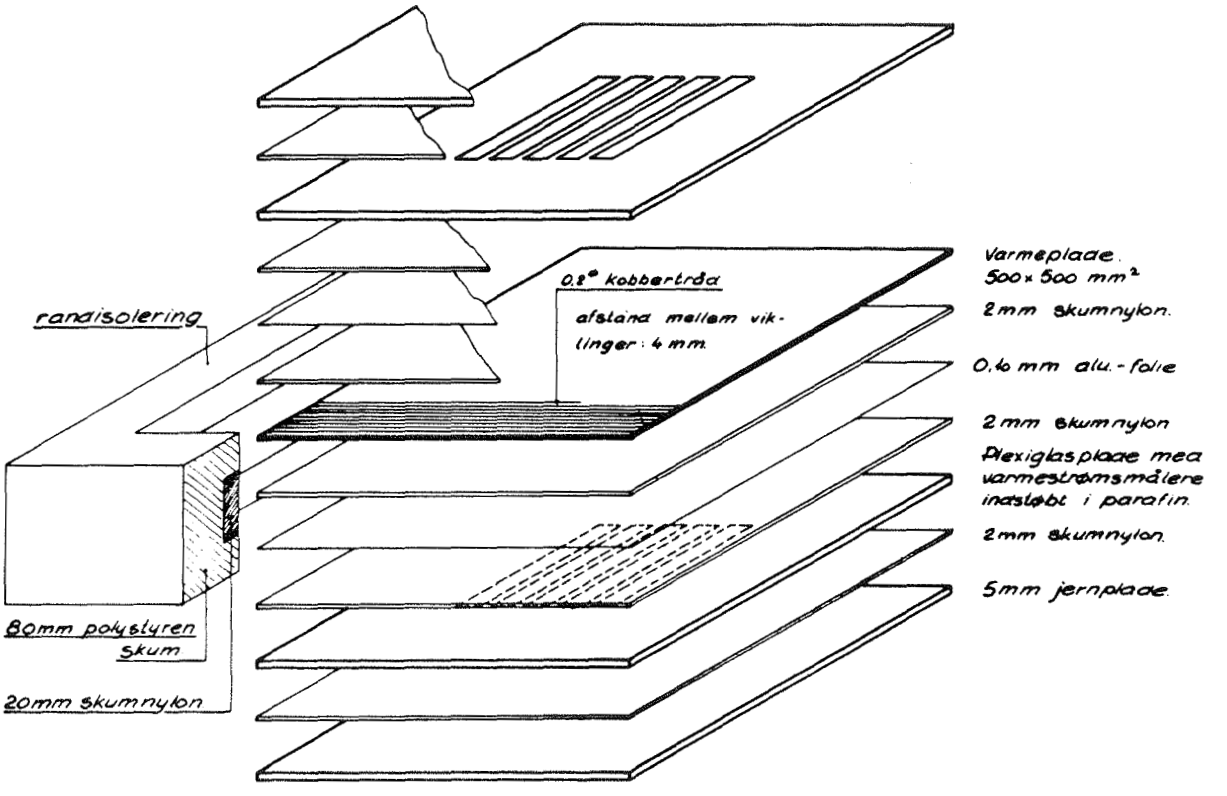


Fig. 25. Opbygningen af laboratoriets apparat til kalibrering af varmestrømsmålere.

Cut-away view of apparatus used for calibration of the heat flow meters at the Heat Insultation Laboratory.

kraftige konvektionsstrømninger omkring apparatet anbringes dette endvidere i en kasse bestående af 5 cm polystyrenskum og med vægge, som slutter tæt til apparatets randisolering.

Varmestrømsmålernes elektromotoriske kraft måles med et N.C.Jensen kompensationsapparat, og hvert kalibreringsresul-

tat er middeltallet mellem to målinger, mellem hvilke hele apparatet er drejet 180° omkring en vandret akse.

Varmestrømsmålernes følsomhed varierer lidt fra måler til måler, fordi Plexiglaspladerne, hvoraf målerne udskæres, varierer lidt i tykkelse. Følsomheden ligger omkring 18-20 kcal/hm^2/MV. Kalibreringsnøjagtigheden ligger indenfor ± 5 %.

4.2.1. Kalibrering i λ-apparat med beskyttelsesring

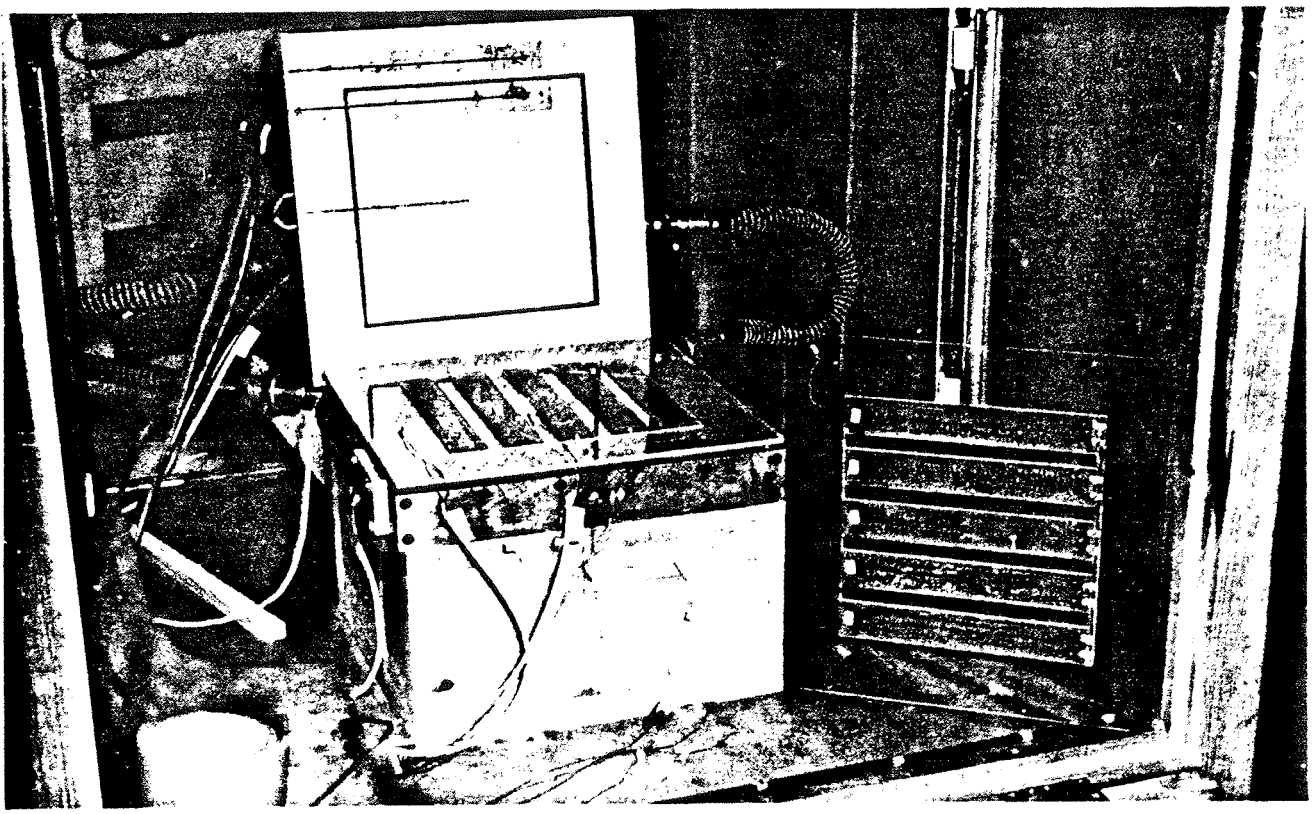
På Building Research Station i England er ti af varmestrømsmålerne kalibreret i "the guarded hot-plate apparatus" på Physics Division, se fig. 26. I dette apparat er det muligt at opnå en kendt eendimensional varmestrøm under mere kontrollerede forhold. Ved målingerne i dette apparat fandtes en middelafvigelse fra målingerne i vort eget apparat på -2 %.

4.2.2. Kalibrering af varmestrømsmålere med kendt kalibreringskonstant

Der er foretaget en kalibrering af to termoelektriske varmestrømsmålere fra Technisch Physische Dienst T.N.O. Disse målere var anbragt i kalibreringsapparatet på samme måde som laboratoriets målere, og kalibreringsresultatet lå indenfor 1 % fra det, som var opgivet af T.N.O. i Holland.

4.2.3. Sammenligning mellem varmestrømsmålernes visning i kalibreringsapparatet og på en prøvevæg

På grund af varmestrømsmålerens inhomogene opbygning bliver varmestrømmens forløb i selve måleren ret kompliceret. Ca. 50 % af varmen går gennem kobbertråden fra den ene side af måleren til den anden. Man kan derfor meget vel tænke sig, at målerens visning for en given varmestrøm vil være en anden, når den anbringes udenpå en prøvevæg, end når den sidder i kalibreringsapparatet. For at undersøge dette forhold, er der foretaget forskellige sammenlignende målinger. På laboratoriet er der målt på en Gasbetonplade, og på Building Research Station er foretaget målinger på Polystyrenskum, Gasbeton og Jernbeton.



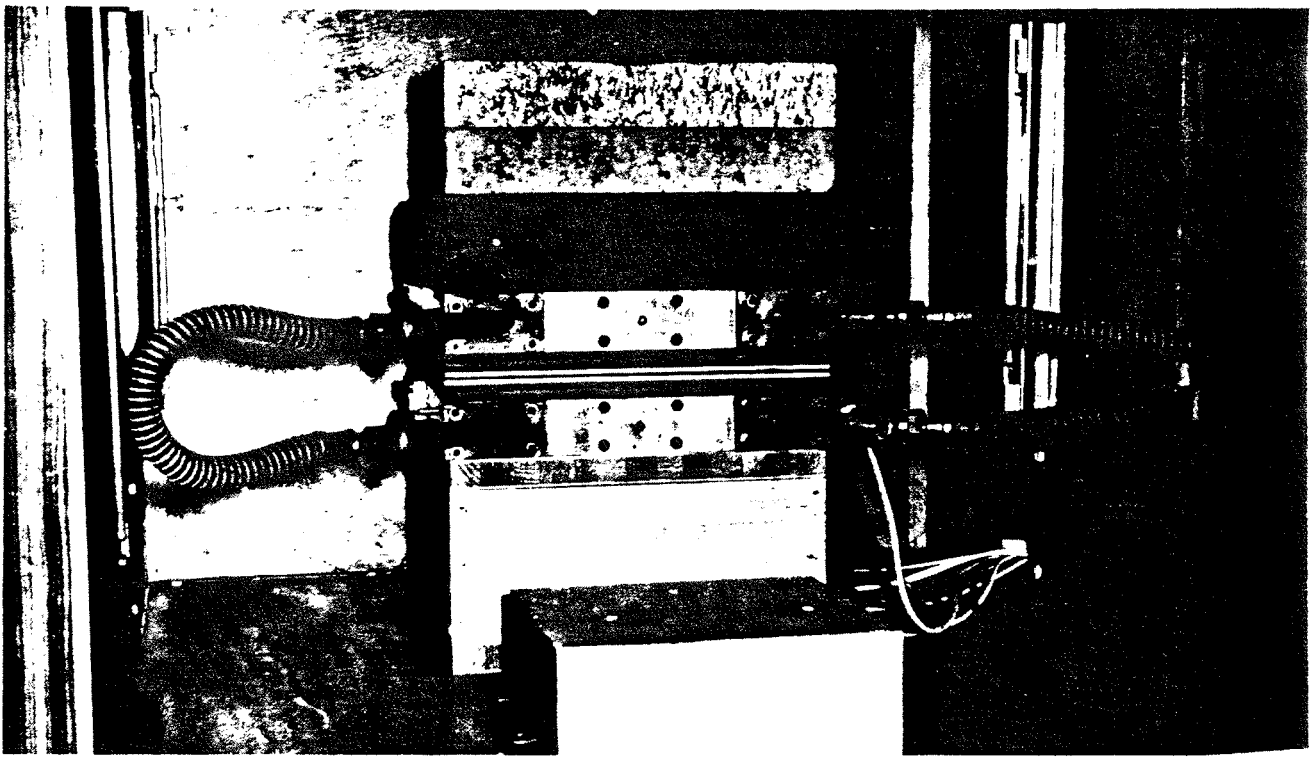


Fig. 26. Varmestrømsmålere i "guarded hot plate apparatus" på Building Research Station i England. Øverst ses varmestrømsmålerne i plexiglasrammerne, og nederst apparatet under målingen.

Heat flow meters in "guarded hot plate apparatus" at the Building Research Station in England. On the top picture the heat flow meters are seen in the perspex glass frames, and below the apparatus is seen in function.

Den måleopstilling, der blev anvendt på laboratoriet, ses på fig. 27. Varmepladen tilførtes en konstant effekt, og efter at gasbetonpladerne var kommet i temperatur- og

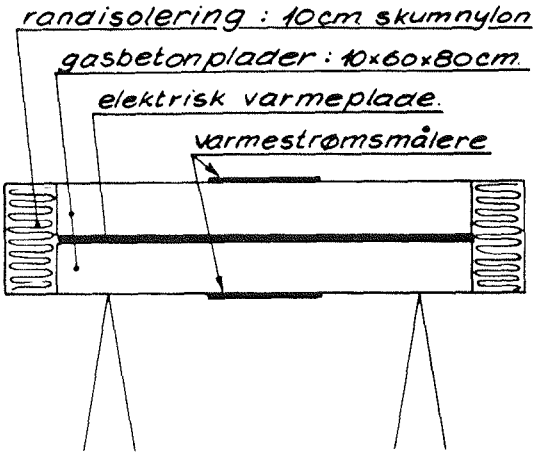


Fig. 27. Måleopstilling til kalibrering af varmestrømsmålere udenpå gasbetonplade.

Measuring equipment for calibration of heat flow meters glued on the surface of a lightweight concrete element.

fugtligevægt, det tog ca. 2 måneder, måltes varmestrømsmålernes visning. Apparatet drejedes 180° om en vandret akse, og en ny måling blev foretaget, når opstillingen på ny var i varmebalance. Gennemsnittet af de to målinger giver for de to varmestrømsmålere en kalibreringskonstant, som er 11 % større end den målte i kalibreringsapparatet.

På Building Research Station udførtes målingerne med varmestrømsmåleren anbragt på overfladen af bygningsdele i selve kalibreringsapparatet. Måleopstillingen fremgår af fig. 28. Varmepladens effekt og kølepladernes temperatur blev ved hver måling afstemt således, at der var samme lufttemperatur på begge sider af Plexiglasrammen. Varmestrømsmålernes termospænding måltes både før og efter en 180° drejning af hele apparatet omkring en vandret akse. Middeltallet divideret op i den påtrykte konstante varmestrøm er målernes kalibreringskonstant på overfladen af det pågældende materiale.

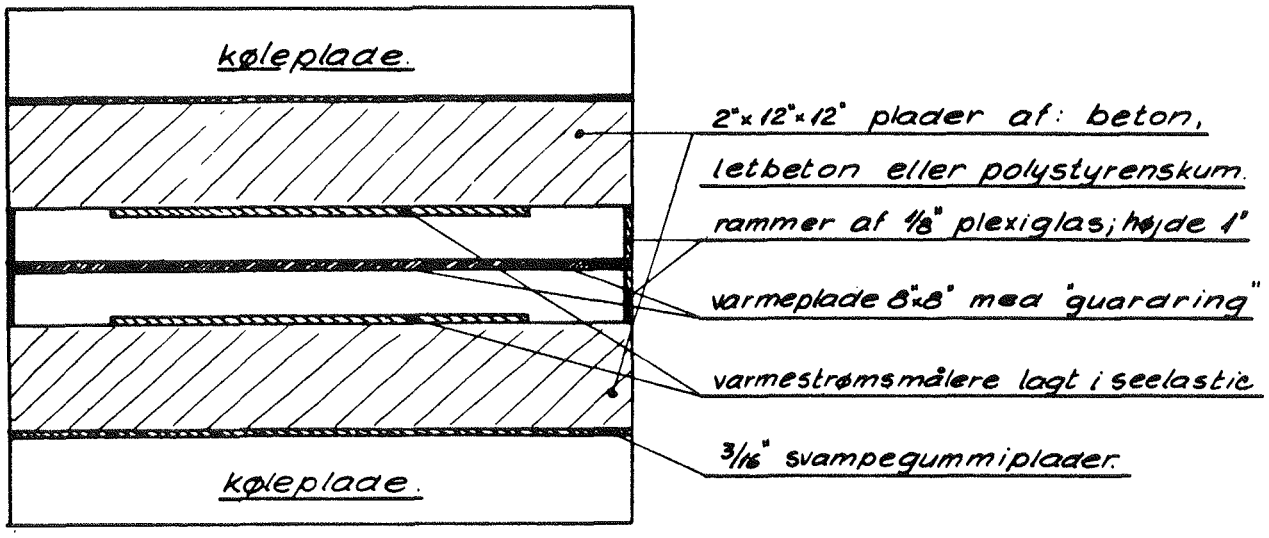


Fig. 28. Kalibrering af varmestrømsmålere på vægoverflader i "guarded hot plate apparatus" på Building Research Station.

Calibration of heat flow meters on wall surfaces in the "guarded hot plate apparatus" at the Building Research Station.

Der måltes følgende afvigelser fra den oprindelige kalibrering:

på betonplade	+9%
- letbetonplade	+8%
- polystyrenskumplade	+8%

På grundlag af disse målinger er alle kalibreringskonstanterne for forsøgshusets varmestrømsmålere forøget med 9%.

4.2.4. Sammenligning mellem Brown-måler og laboratoriets måler

Som en sidste kontrol af laboratoriets varmestrømsmåler er der på to af prøvevæggene foretaget samtidige målinger af varmestrømmen med denne og med den svenske Brown-måler. (Nærmere beskrevet i: Ytterväggars varmeisoleringsförmåga, af Gösta Brown. Handlingar nr. 36, Statens nämnd för Byggnadsforskning.)

Disse målinger er udført i forsøgshuset på henholdsvis væg nr. 12 vest og 19b vest. Målernes placering og målingernes resultat for væg nr. 12 vests vedkommende fremgår af fig. 29 og for væg 19b vest af fig. 30.

Målingerne på væg nr. 12 vest blev udført i foråret 1962. For at eliminere forskelle i væggens varmemodstand har målerne byttet plads midt i måleperioden. Som det fremgår af fig. 29, var der da også en ret stor forskel på væggens varmemodstand

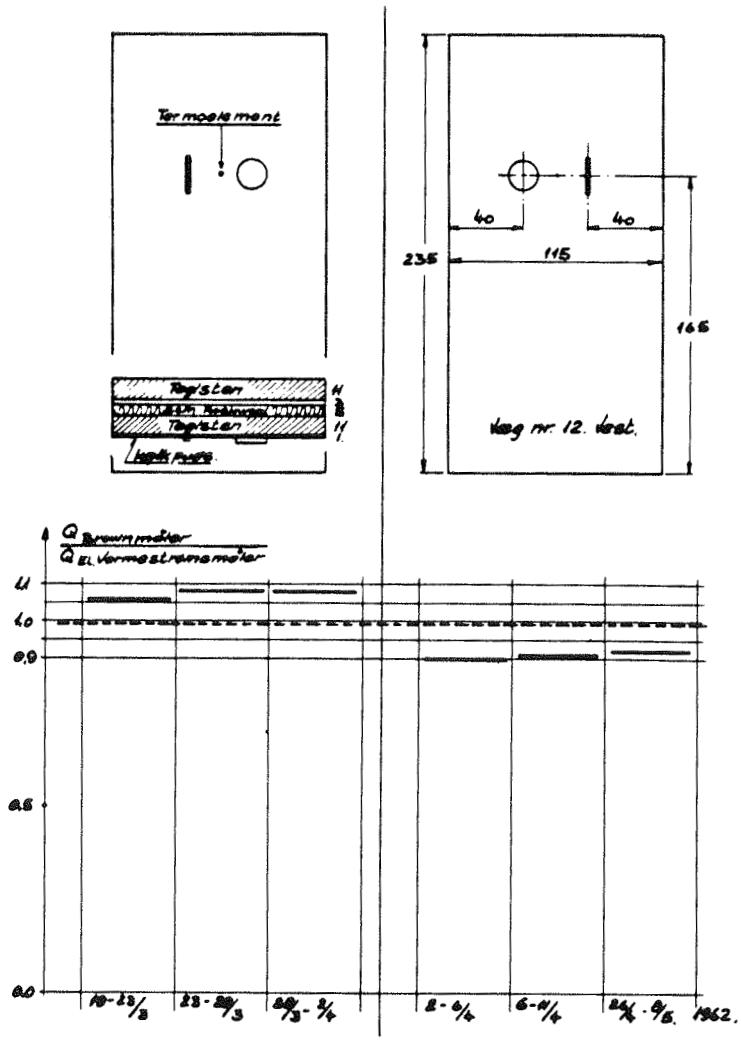


Fig. 29. Placering af Brown-måler og laboratoriets måler på væg nr. 12 V, samt måleresultaterne fra denne væg.

A Brown heat flow meter and the heat flow meter of the laboratory on test wall no. 12 V, and the results of the comparative measurements.

de to steder, antagelig som følge af en ståltrådsbinder det ene sted. Imidlertid viser det samlede måleresultat, at varmestrømmen målt med laboratoriets måler kun afviger 2 % fra Brown-målerens visning.

De tilsvarende målinger på væg nr. 19 vest er foretaget i vinteren 1962-63. Væggen, som består af sammenlimede gasbetonblokke, kan regnes for homogen i vandrette snit. Der er følgelig ikke foretaget ombytning af målerne under disse forsøg. Som det fremgår af fig. 30, viser disse målinger en største afvigelse mellem de to målere på 6 %, medens middelafvigelsen er 2 %.

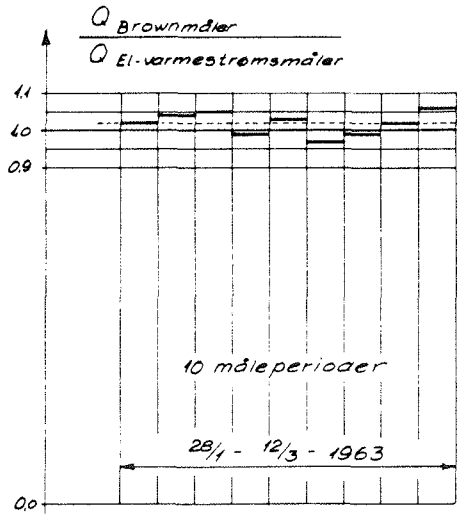


Fig. 30. Sammenligning mellem varmestrømmen målt med Brown-måler og med laboratoriets måler gennem væg nr. 19a.

The heat flow through wall no. 19a, measured by the Brown heat flow meter, compared with the heat flow measured by the heat flow meter of the laboratory.

4.2.5. Kalibreringskonstantens variation med varmestrømsintensiteten

Under studieopholdet på Building Research Station blev der foretaget bestemmelse af kalibreringskonstanten ved varme-

strømsintensiteter varierende fra 3,7 $\frac{kcal}{hm^2}$ og op til 47 $\frac{kcal}{hm^2}$, hvilket svarer til henholdsvis 10°C temperaturdifferens over en væg med en k-værdi på 0,4 $\frac{kcal}{hcm^2}$ og 30°C temperaturdifferens over en væg med en k-værdi på 1,6 $\frac{kcal}{hm^2C}$

Måleresultaterne for de ti undersøgte varmestrømsmålere fremgår af fig. 31. Det ses, at inden for det undersøgte område er kalibreringskonstanten ikke målelig afhængig af varmestrømsintensiteten.

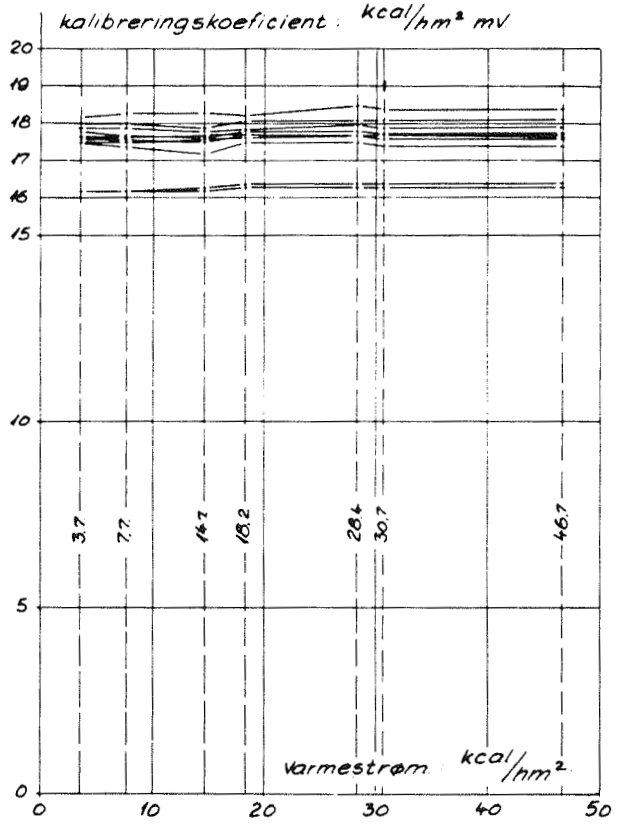


Fig. 31. Kalibreringskoefficienten for to varmestrømsmålere bestemt ved forskellige varmestrømsintensiteter.

The calibration coefficients of the two heat flow meters determined at different heat flow intensities.

4.2.6. Kalibreringskonstantens variation med varmestrømsmålerens temperatur

Da de anvendte kobberkonstantan termoelementer ikke har en fuldstændig retlinet temperaturspændingskurve, vil varmestrømsmålernes kalibreringskoefficienter blive temperaturafhængige. Idet kalibreringskoefficienten angives ved +20°C, er der på fig. 32 vist korrektionen i % som skal anvendes, hvis varmestrømsmålerne bruges under andre temperaturforhold, f.eks. i fryserumsisolering. Ved alle målinger i prøvevæggene er der regnet med, at varmestrømsmålerne har temperaturen +20°C.

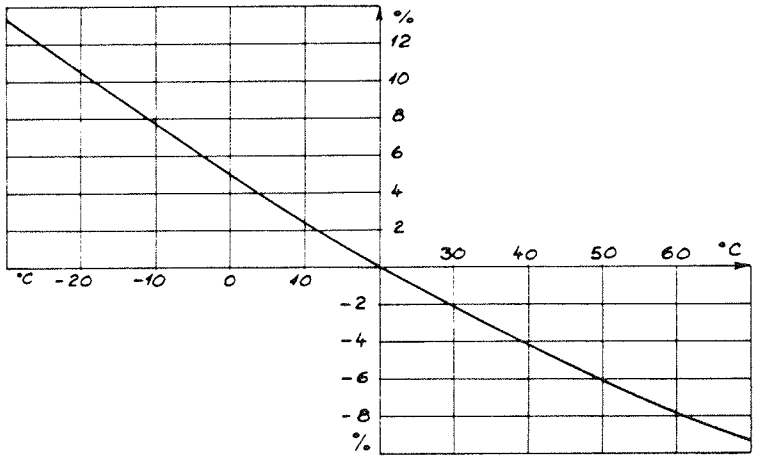


Fig. 32. Kalibreringskoefficientens temperaturafhængighed.
The temperature dependence of the heat flow meter calibration coefficient.

4.3. Måling af temperaturdifferens

Temperaturforskellen mellem væggens indvendige og udvendige overflade på de tre steder, hvor varmestrømsmålerne er anbragt, måles ved hjælp af termoelementer. Som termoelementledning er anvendt P-26-DT fra Thermo Electric Co.Inc., Saddle Brook, U.S.A., som ifølge National Bureau of standarts har følgende sammenhæng mellem EMK og temperaturforskel:

ϑkold °C	ϑ varm °C	EMK MV
-20	-10	0,37
-10	0	0,38
0	+10	0,39
+10	+20	0,40
+20	+30	0,40

Ved disse forsøg er den indvendige overfladetemperatur ϑvarm ca. +20 °C, medens den udvendige middeltemperatur ϑkold ligger omkring 0 °C. Svarende hertil er der overalt brugt en temperatur-EMK koefficient på $\frac{20}{0,39 + 0,40} = \frac{25,3}{\text{MV}}\frac{\text{C}}{}$.

Termoelementernes udvendige loddesteder er støbt ind i cement i ca. 3 mm dybe riller i teglsten eller gasbeton. På betonelementerne er de støbt fast i cement direkte på overfladen. Indvendigt er loddestederne anbragt i samme udfræsning som varmestrømsmålerne ved siden af disse, klæbet ind i kit.

4.4. Måling og registrering af termospændinger

Det var fra forsøgenes begyndelse klart, at hvis bearbejdningen af de mange måleresultater skulle blive overkommeligt, så kunne man ikke nøjes med en registrering på elektroniske skrivere, idet planimetreringen af de mange varmestrøms- og temperaturkurver ville kræve et betydeligt rutinearbejde.

Da laboratoriets økonomiske midler samtidigt var ret begrænsede, hvilket udelukkede den helt ideelle løsning, nemlig en optagelse af målingerne på hul- eller magnetbånd, som hurtigt ville kunne fuldstændigt bearbejdes på f.eks. DASK, blev det besluttet at bygge et måleapparat med fotografisk registrering af måleresultaternes middelværdi. Selve apparatet er vist på fig. 33, og princippet i målingen er skitseret på fig. 34.

Det drejer sig både ved varmestrøms- og temperaturdifferensmålingen om at få målt en lille spænding (0-5 MV) samt om at få denne måling summeret over tiden og omsat til et tælleværk, som kan fotograferes med passende mellemrum.

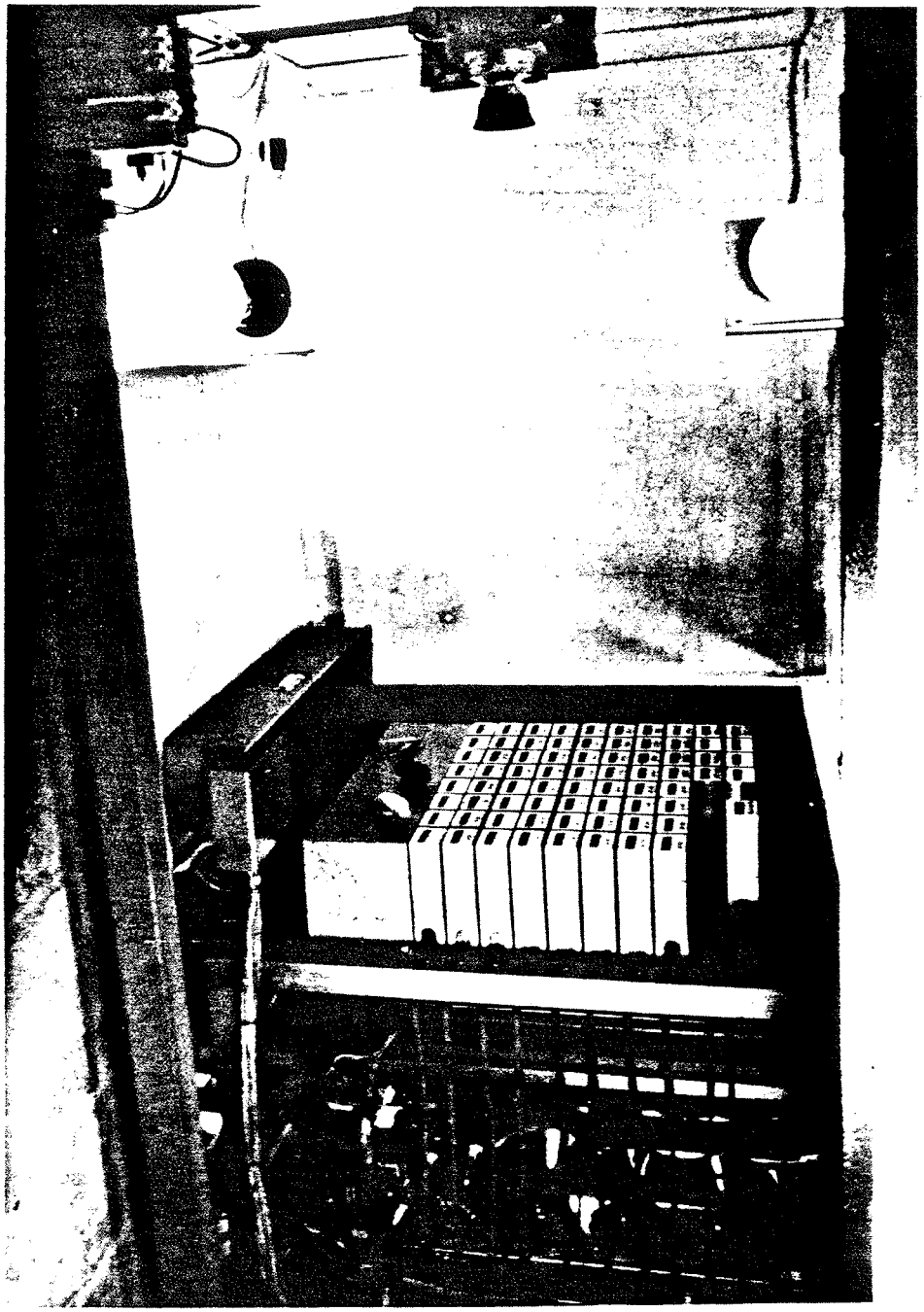


Fig. 33. Apparat til registrering af temperaturdifferenser og varmestrømme udviklet ved laboratoriet.

Apparatus for photographic registering of temperature differences and heat flows.

For at få så stor en målespænding som muligt samt for at reducere antallet af målepunkter forbindes for hver væg henholdsvis varmestrømsmålere og termoelementer i serie. Det bliver herved kun muligt at beregne en middel M-værdi for

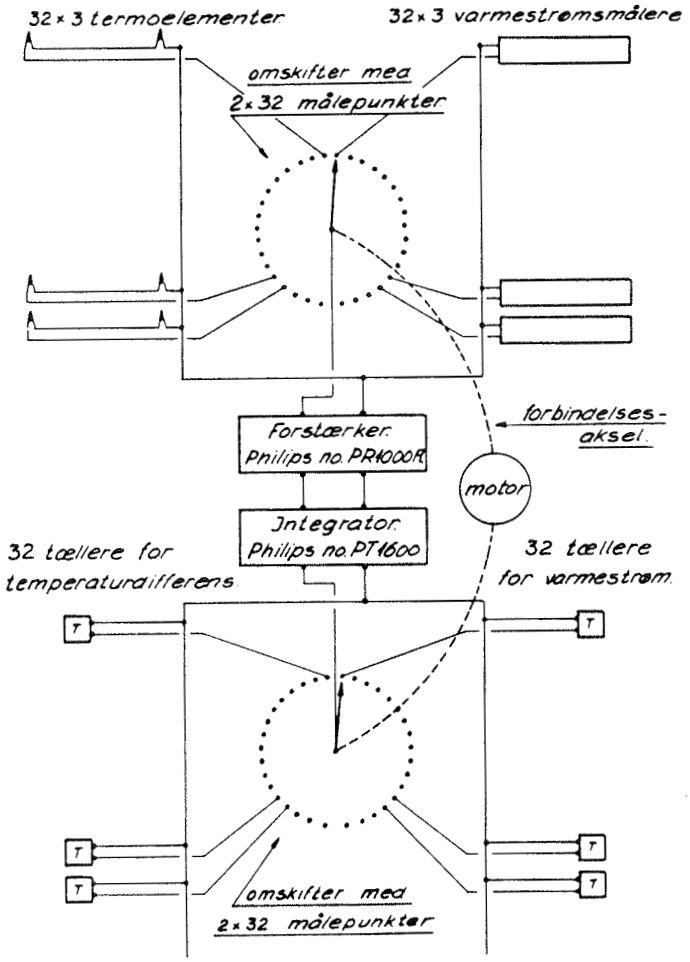


Fig. 34. Principskitse af registreringsudstyret.
Simplified diagram of the registering equipment.

væggen over de tre målesteder. Den målespænding, som nu er til rådighed, vil f.eks. for en 23 cm gasbetonvæg ved 20°C temperaturdifferens være:

$$\text{varmestrøm} \qquad \text{EMK} = \frac{20 \cdot 3}{0{,}90 \cdot 19} = 3{,}50 \text{ MV}$$

$$\text{temperaturdif.} \qquad \text{EMK} = \frac{20 \cdot 3}{25{,}3} = 2{,}37 \text{ MV}$$

De 32 vægge giver ialt 64 målepunkter, som skal aftastes. Måleapparatet er indrettet således, at det efter tur ved hjælp af en omskifter kobler hvert af de 64 målepunkter til

selve måleinstrumentet, en Philips Electronic Temperature Indicator Type PR 1000 A/01. Denne indicator giver fuldt udslag for en spænding på 5 MV, med en måleunøjagtighed på 0,5 % af fuldt udslag, og en reproducerbarhed på 0,1 %. Fra indicatoren går det forstærkede signal videre til en Philips Integrator nr. P.T. 1600, hvor indicatorens udslag omsættes til spændingsimpulser med en frekvens, der er proportional med målespændingen. Disse impulser opsummeres på en telefontæller for hvert målepunkt.

Telefontælleren fotograferes een gang hvert døgn sammen med en datotæller og et ur, fig. 35. Differensen mellem tællervisningen på to på hinanden følgende billeder er et mål for middelmålespændingen fra det pågældende målepunkt i det mellemliggende tidsrum.

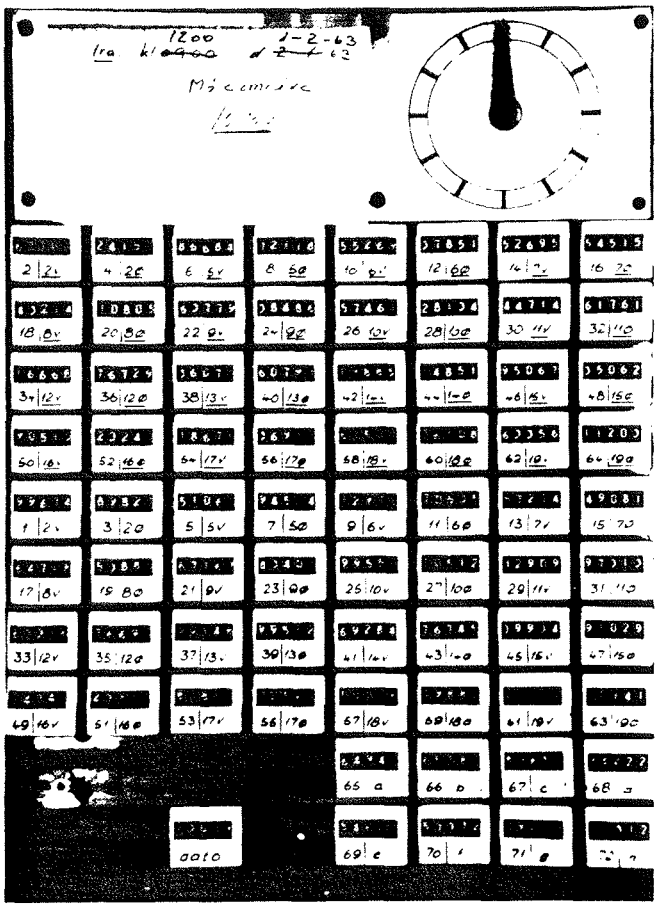


Fig. 35. Foto af tællerpanel med datotæller og ur.

Photo of a counter panel with date counter and clock.

Omskifternes hastighed er valgt således, at alle målepunkter kobles ind een gang hver halve time, altså 48 gange pr. døgn. Hvert døgngennemsnit er således resultatet af 48 enkeltmålinger jævnt fordelt over døgnet.

Måleinstrumentet har ialt 72 målepunkter. Der bliver følgelig $\frac{60 \cdot 30}{72}$ = 25 sekunder til hver måling. Som det fremgår af fig. 36, er denne tid inddelt således, at der, efter at omskifteren for henholdsvis målekreds og tællerkreds er skif-

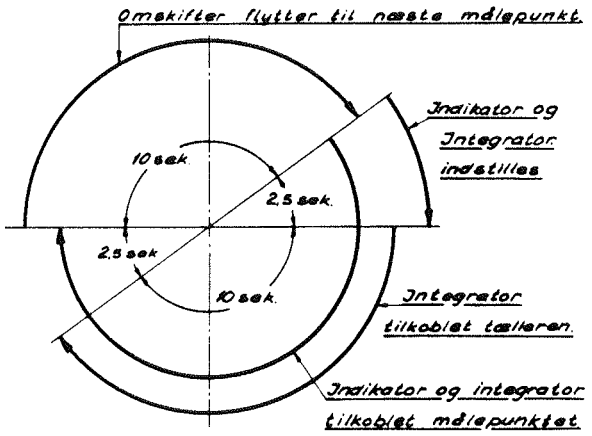


Fig. 36. Inddeling af en måleperiode.
Time program for a measuring period.

tet over på det pågældende målepunkt, går 2,5 sekunder, hvor målebro og integratormotor kommer henholdsvis i ro og op på konstant hastighed. Derefter kobles tællerkredsløbet ind ved hjælp af en knastskive. Denne knastskive, som løber en omgang på 25 sekunder, er udformet således, at tællingen kommer til at foregå i 10 sekunder. Efter yderligere 2,5 sekunders forløb kortsluttes målebroen, medens omskifterne i løbet af de næste 10 sekunder skifter til næste målepunkt og tæller.

Denne registreringsanordning har virket upåklageligt i de forløbne måleperioder, og den har gjort det overkommeligt at bearbejde måleresultaterne fra de mange vægfelter.

4.5. Bearbejdning af måleresultater

På grund af væggenes varmekapacitet er det ikke muligt at beregne M-værdierne over kortere tidsrum, f.eks. et døgn. Dette skyldes først og fremmest, at det er den udvendige overfladetemperatur, som svinger, medens varmestrømmen måles ved den indvendige overflade.

Når man har valgt at måle varmestrømmen på dette sted, er det, fordi man her har en beskyttet placering af varmestrømsmåleren samt en varmestrøm, som altid kan regnes at gå i samme retning.*

Denne placering medfører imidlertid, at det ikke er sammenhørende værdier af temperaturforskel og varmestrøm, der måles, idet f.eks. et udvendigt temperaturfald først senere vil resultere i en øget varmestrøm gennem den indre vægoverflade.

Hvor stor denne forsinkelse bliver, vil afhænge af forholdet mellem prøvevæggenes varmekapacitet og varmemodstand. Som eksempel er på fig. 37 vist sammenhørende målinger af temperaturforskel og varmestrøm for henholdsvis en 30 cm hulmur med mineraluldsfyld og et træskeletelement med 125 mm glasuldisolering. Det ses, at for en velisoleret tung væg er tidsforskydningen mellem temperatur og varmestrøm ca. 12 timer. Det er således i dagtimerne, man har det største varmetab gennem væggen.

---

* Da målingerne begyndte, blev oliefyret reguleret ved hjælp af en elektrisk termostat, som stillede forgasningsfyret på stor eller lille flamme. Dette fik lufttemperaturen til at svinge ca. 1,5°C med så hurtige udsving, at varmestrømmen ved de bedst isolerede vægge gik ind mod rummet, når lufttemperaturen var lavest. Dette gav fejl i målingerne, da hverken integratoren eller telefontællerne er bygget til at kunne køre baglæns. Efter anskaffelsen af en kontinuerlig virkende vædsketermostat, som til enhver tid søger at indstille flammen til det øjeblikkelige behov, har lufttemperaturens variation været under 1°C, og hvad der er vigtigere i denne forbindelse, temperatursvingningerne er meget langsomme.

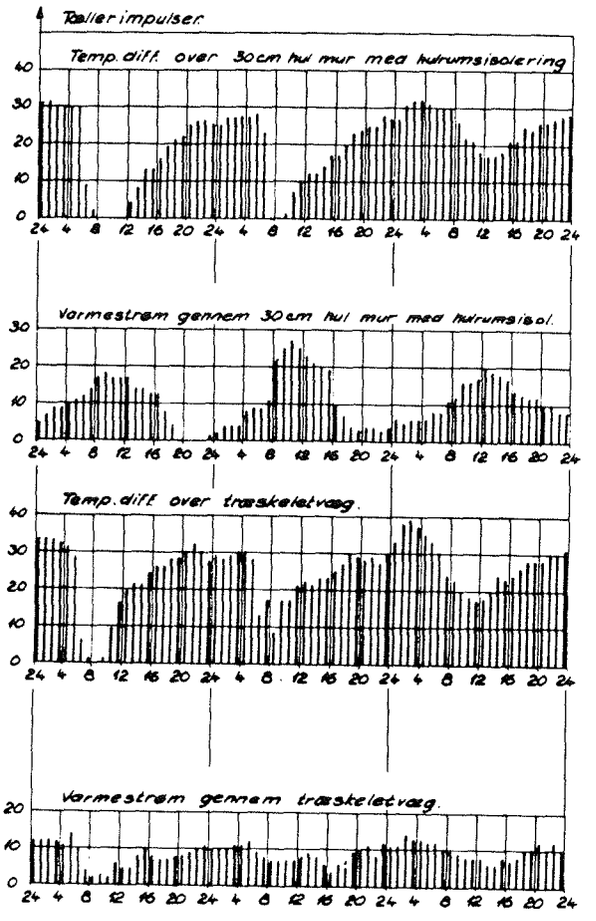


Fig. 37. Sammenhørende målinger af temperaturforskel og varmestrøm for henholdsvis en 30 cm hul mur med stenuldsfyld (væg nr. 5) og en træskeletvæg med 12,5 cm glasuldisolering (væg nr. 18a).

Mutual measurements of the differences in temperature and heat flow for a 30 cm hollow brick wall filled with rock wool (wall no. 5) and a frame wall with 12,5 cm glass wool insulation (wall no. 18a).

For at få et begreb om døgngennemsnittenes variation er de enkelte døgns afvigelser fra et fjortendages gennemsnit beregnet for en 30 cm hul mur med isolering og for en træskeletvæg. Som det fremgår af fig. 38, varierer varmestrømmen specielt gennem den tunge væg betydeligt mere end temperaturdifferensen, således at den beregnede M-værdi vil blive meget svingende ved brug af døgngennemsnit. Betragtes

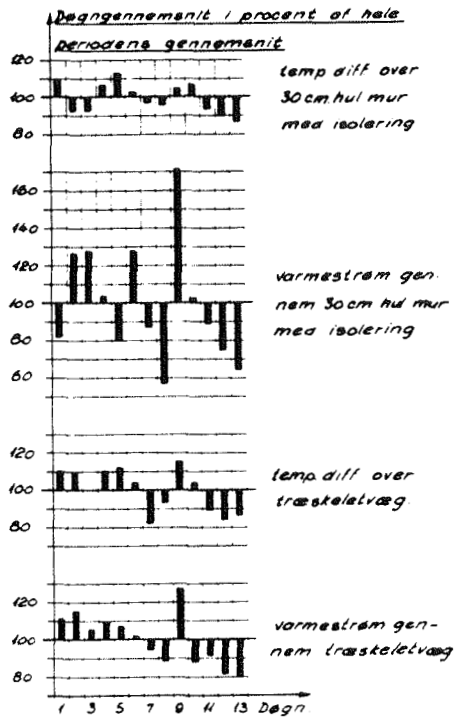


Fig. 38. Variation af døgngennemsnit af temperaturdifferens og varmestrøm gennem væg nr. 5 og væg nr. 18a i en fjortendages periode.

24 hours' average variation of the temperature difference and the heat flow through wall no. 5 and wall no. 18a during a period of 14 days.

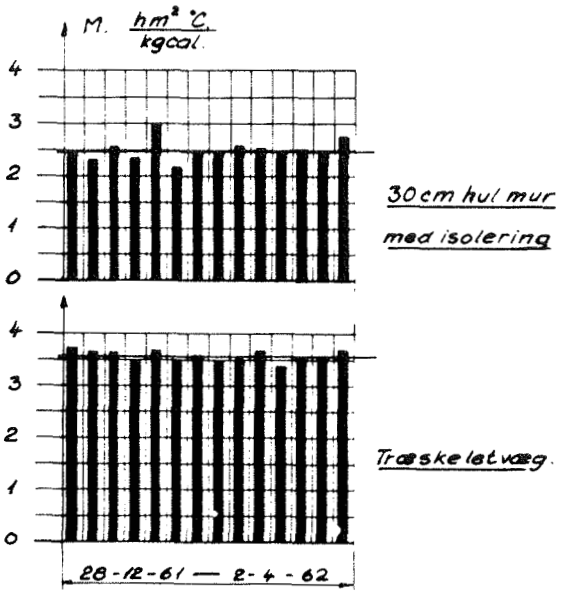


Fig. 39. Målte ugegennemsnit af M-værdier for væg nr. 5 og væg nr. 18a.

Measured weekly average of the M-values of wall no. 5 and wall no. 18a.

her det niende døgn i perioden (fig. 38), fås for den 30 cm hule mur en M-værdi, som kun er 61 % af fjortendages gennemsnittet, medens træskeletvæggens M-værdi for dette døgn bliver 91 % af gennemsnittet.

Til grund for beregningen af de enkelte vægges M-værdier ligger en række ugegennemsnit, og som det ses på fig. 39, kan selv disse for de tunge, velisolerede vægge variere en del som følge af væggens varmekapacitet.

4.6. Usikkerhedsoverslag

Usikkerheden på bestemmelsen af prøvevæggenes M-værdier falder naturligt i to dele. For det første usikkerheden på hver enkelt måling, og for det andet den usikkerhed, der skyldes, at det ikke er sammenhørende værdier af $\Delta\vartheta$ (°C) og Q(kcal/hm^2), som måles.

a. Bestemmelse af usikkerheden på et døgngennemsnit.

$$M = \frac{K_{\Delta\vartheta}}{K_Q} \cdot \frac{E_{\Delta\vartheta} \cdot T \cdot K_{integrator} \cdot 48}{E_Q \cdot T \cdot K_{integrator} \cdot 48}$$

her er $K_{\Delta\vartheta}$ = termoelementernes kalibreringskonstant med den relative usikkerhed $rU_{K_{\Delta\vartheta}} = 2\,\%$

K_Q = varmestrømsmålernes kalibreringskonstant med den relative usikkerhed $rU_{K_Q} = 5\,\%$

$E_{\Delta\vartheta}$ og E_Q er den elektroniske indikators måling af følernes elektromotoriske kraft. Indikatoren er angivet at have en måleusikkerhed på 0,5 % af fuldt udslag. Ved målingerne har det været tilstræbt at udnytte så stor en del af udslaget som muligt, i gennemsnit ca. 50 %.

$$rU_{E_{\Delta\vartheta}} = rU_{E_Q} = 1\,\%$$

T er den tid, som tællerne er koblet ind pr. måling. Tiden bestemmes af en knastskive, som trækkes af en synkronmotor. Da T indgår både i tæller og nævner, kan man se bort fra usikkerheden på denne.

$K_{integrator}$ er det antal impulser, som $E_{\Delta\vartheta}$ eller E_Q lig med 1 giver pr. tidsenhed.

$rU_{K_{integrator}}$ er angivet at være bedre end 1 %.

$$rU_M = \sqrt{2^2 + 5^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2 + 1^2}$$

$$= \sqrt{33} = 5,7\ \%.$$

b. Måleusikkerhed som følge af varmeaccumulering.

Denne usikkerhed vil være størst for de tunge, velisolerede vægge. På fig. 39 er vist de målte ugegennemsnit for to af prøvevæggene i en varmesæson. Det drejer sig om en teglstensvæg med hulrumsisolering samt en træskeletvæg. Under forudsætning af, at der måles kontinuerligt, således at man stadig efter en vis tid får den til en bestemt temperaturdifferens hørende varmestrøm, må man være på den sikre side ved at fordele den største afvigelse på et ugegennemsnit på hele måleperioden.

For den hule mur fås:

$$rU_{hulmur} = \frac{0,5 \cdot 100}{2,5 \cdot 14} = \underline{\underline{1,5\ \%}}$$

og for træskeletvæggen:

$$rU_{trævæg} = \frac{0,3 \cdot 100}{3,6 \cdot 14} = \underline{\underline{0,6\ \%}}$$

Den samlede måleusikkerhed på bestemmelsen af de opgivne M-værdier bliver da:

$$rU = \sqrt{5,7^2 + 1,5^2} = \underline{\underline{6\ \%}}.$$

5. MÅLINGERNES RESULTAT

Der er for hver prøvevæg angivet den målte middelvarmemodstand for hver varmesæson og for henholdsvis øst- og vestfacaden. Herudfra er den målte k-værdi beregnet, idet der overalt er regnet med en udvendig og indvendig overgangsmodstand på henholdsvis 0,15 og 0,05 $\frac{hm^2C}{kcal}$.

Som allerede nævnt i indledningen har klimapåvirkningerne i de tre varmesæsoner ikke været typiske. Det fremgår af fig. 16, side 29, at der både i 1959-60 og 1960-61 kom mest slagregn fra øst, hvor prøvehuset ligger delvis i læ, og først i den sidste varmesæson 1961-62 kom slagregnen fra vest, som det var at vente efter vejrstatistikken.

Der findes os bekendt ingen systematiske målinger af slagregn her i landet for så mange år, at det er muligt at sige noget om størrelsen af de i disse tre varmesæsoner målte slagregnsmængder sammenlignet med det, som var at vente. Sådanne målinger findes imidlertid for nedbørens vedkommende, og det vil da være rimeligt at sammenligne den målte nedbør i de tre varmesæsoner med middelnedbøren for denne del af året.

Ved Lanbohøjskolen er nedbøren målt siden 1886, og på fig. 40 er angivet middelnedbøren her i tidsrummet 1886-1925 for månederne oktober - marts sammenlignet med nedbøren i hver af de tre varmesæsoner, der her er tale om, målt på samme sted. Det fremgår af figuren, at alle tre varmesæsoner har ligget over middel, hvad nedbør angår, idet der er faldet henholdsvis 109, 139 og 117 procent af det normale for denne del af året.

Der er således grund til at antage, at klimapåvirkningen på prøvevæggene har været af en størrelsesorden, som er repræsentativ for denne del af landet.

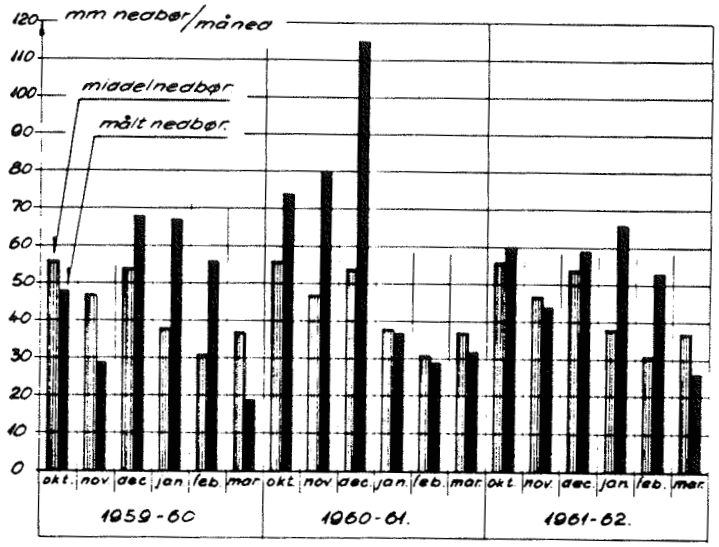


Fig. 40. Middelnedbør i tiden 1886-1925, sammenlignet med nedbøren i de tre varmesæsoner. Målested: Landbohøjskolen, København.

The average precipitation during the period 1886-1925 compared with the precipitation of the three years' period in question.

5.1. 30 cm hule teglstensvægge med senere ifyldt hulmursisolering

Denne gruppe omfatter følgende 30 cm hule teglstensvægge:

nr. 2	hulrumsfyld:	Polystyrenkugler
nr. 5	-	: Mineraluld
nr. 6	-	: Karbamidskum
nr. 7	-	: intet
nr. 8	-	: Vermiculite
nr. 9	-	: Letbetonklinker

Alle prøvevæggene er opført i oktober-november 1958. De har således stået ca. et år, inden målingerne begyndte i november 1959.

I den første måleperiode blev der målt på væggene uden hulrumsisolering for at få et mål for væggenes ensartethed. Resultatet af disse målinger fremgår af tabel 1, som viser såvel de beregnede som de målte M- og k-værdier for de hule mure uden fyld. Som det fremgår af tabellen ligger de målte k-værdier lidt lavere end de beregnede efter D.I.F.'s regler. Afvigelserne mellem de enkelte vægge er små, maximalt 2 % fra gennemsnittet.

Hulrumsisoleringen er ifyldt på lidt forskellige tidspunkter. Det skyldes bl.a., at det har været nødvendigt at lade isoleringen af væg nr. 5 og 6 med henholdsvis granuleret stenuld og karbamidskum foretage af specialfirmaer, medens laboratoriet selv har foretaget indhældningen af isoleringen i væg nr. 2, 8 og 9. Tidspunkterne for de enkelte vægges merisolering var følgende:

væg nr.	2	Polystyrenkugler	15- 1 - 1960
- -	5	gran.mineraluld	10-12 - 1959
- -	6	Karbamidskum	24-11 - 1959
- -	8	Vermiculite	16-12 - 1959
- -	9	Letbetonklinker	16-12 - 1959

Efter isoleringen er der foretaget kontinuerlige målinger af temperaturdifferens over og varmestrøm igennem væggene i vinterperioderne 1959-60, 1960-61 og 1961-62. På grundlag heraf er beregnet en middel M-værdi for hver væg for hver af de tre måleperioder, se tabel 2. På fig. 41 ses k-værdierne for såvel øst- som vestvæggene i de tre måleperioder. Til sammenligning er indtegnet k-værdierne beregnet efter Dansk Ingeniørforenings regler for beregning af varmetab fra bygninger, 1. udgave 1953.

Når man vil studere årsagerne til forskelle og forskydninger mellem k-værdierne for ens vægge orienteret mod øst og vest, er der først og fremmest to forhold at tage i betragtning. For det første bygningsmæssige forskelle mellem de to vægge, (der skal kun nogle millimeters ændring af hul-

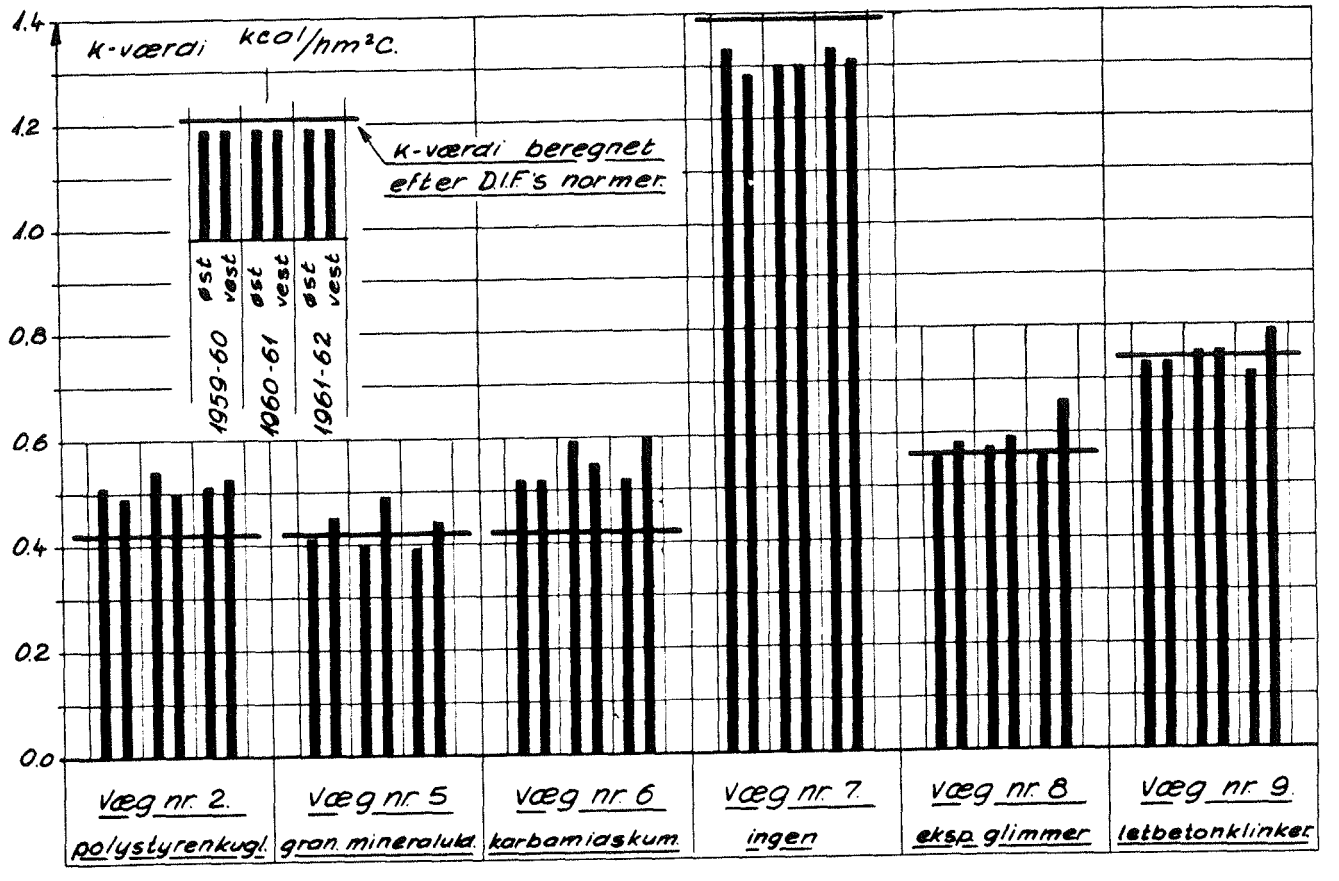


Fig. 41. Beregnede og målte k-værdier for 30 cm hule teglstensvægge med senere ifyldt hulrumsisolering.

Calculated and measured k-values for 30 cm hollow brick walls. The air space has been filled with different insulation materials after errection.

rummets bredde til at give de forskelle, som fremgår af fig. 41). Dette vil resultere i en konstant forskel mellem de to vægges k-værdier. For det andet ændring i væggenes k-værdi som følge af det udvendige klima, specielt slagregn. Dette vil ændre forholdet mellem øst- og vestvæggene i takt med slagregnsmængderne, afhængigt af væggenes påvirkelighed af disse.

Af fig. 16, side 29, fremgår det, at husets øst- og vestfacade i de første to måleperioder fik stort set lige megen slagregn på de to facader. I disse perioder skulle eventuelle forskelle altså hovedsageligt skyldes forskelle ved opmuringen. Det ses da også, at forskellen mellem de sammenhø-

rende øst- og vestvægge er nogenlunde ens i de to måleperioder. I den tredie måleperiode har vestfacaden fået ca. 2,5 gange så megen slagregn som østfacaden. Dette afspejles da også i forholdet mellem de målte k-værdier for øst- og vestvæggene, idet der for væg nr. 2, 6, 8 og 9 er en tydelig forøgelse af k-værdien i vestvæggen i forhold til de tidligere år.

Ved en kontrol af hulrumsisoleringen i foråret 1962 blev væg nr. 2, 5 og 9 fundet i den oprindelige tilstand. I væg nr. 6 var karbamidskummet svundet ca. 18 % i retningen på tværs af væggen. Dette er uden tvivl den væsentligste årsag til den forholdsvis store målte k-værdi for denne væg.

I væg nr. 8 var vermiculiten sunket så meget sammen, at de tre øverste skifter var uden isolering. Dette har næppe kunnet spores på måleresultaterne, da målepunkterne sidder længere nede på væggen.

Samtidig med inspektionen af hulrumsisoleringen blev der udtaget prøver af denne til bestemmelse af vandindholdet, ligesom vandindholdet i de yderste teglsten blev bestemt. Resultatet fremgår af tabel 3 og fig. 42. Det ses, at vestvæggene indeholder ca. dobbelt så meget vand som østvæggene. Det mest overraskende er det relativt store vandindhold i teglstenene i væg nr. 6.

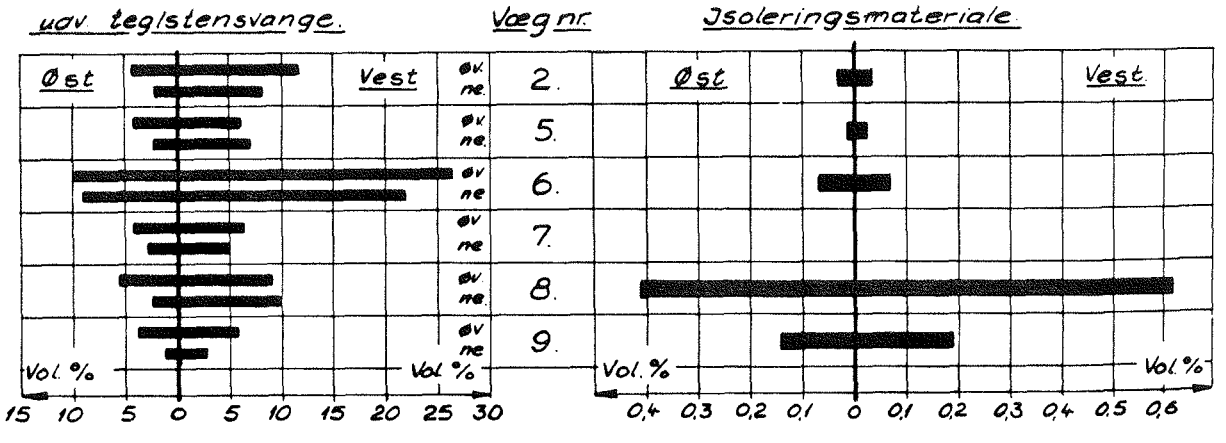


Fig. 42. Målt vandindhold i 30 cm hule teglstensvægge med senere ifyldt hulrumsisolering. Prøverne er udtaget i foråret 1962.

Measured moisture contents in 30 cm hollow brick walls with cavity insulation.

5.2. 30 cm hule mure isoleret under opførelsen

Denne gruppe omfatter følgende vægge:

nr. 11 30 cm teglstensvæg isoleret med 7 cm glasuldfilt $\gamma = 15$ kg/m^3

nr. 12 30 - - - - 5 cm stenuldbatts, γ = ca.35 kg/m^3 luftspalte mod den ydre vange

nr. 13 formur tunge facadesten, isolering 8 cm stenuldbatts γ = ca.35 kg/m^3

bagmur 11 cm letbetonsten, indv. pudset

nr. 14 formur 11 cm letbetonsten, ubehandlede, isolering 12 cm stenuldbatts γ = ca.35 kg/m^3

bagmur 5 cm letbetonplade, indv. pudset.

Der er foretaget kontinuerlige målinger på disse vægge i tre varmesæsoner. Måleresultaterne er opført i tabel 4 sammen med de beregnede M- og k-værdier efter Dansk Ingeniørforenings regler. Slagregnen synes ikke at have haft nogen nævneværdig indflydelse på disse vægges isoleringsevne.

5.3. Gasbetonvægge

Der er i denne gruppe foretaget målinger på følgende vægge:

nr. 15 23 cm gasbetonvæg, udvendig ubehandlet

nr. 16 23 cm - , udvendig overfladebehandling: Miramat stænkpuds

nr. 17 23 cm - , udvendig overfladebehandling: svær bastardpuds malet med Cempexo

Der er målt på disse vægge i alle tre varmesæsoner. Måleresultaterne fremgår af tabel 5. Den høje k-værdi for væg

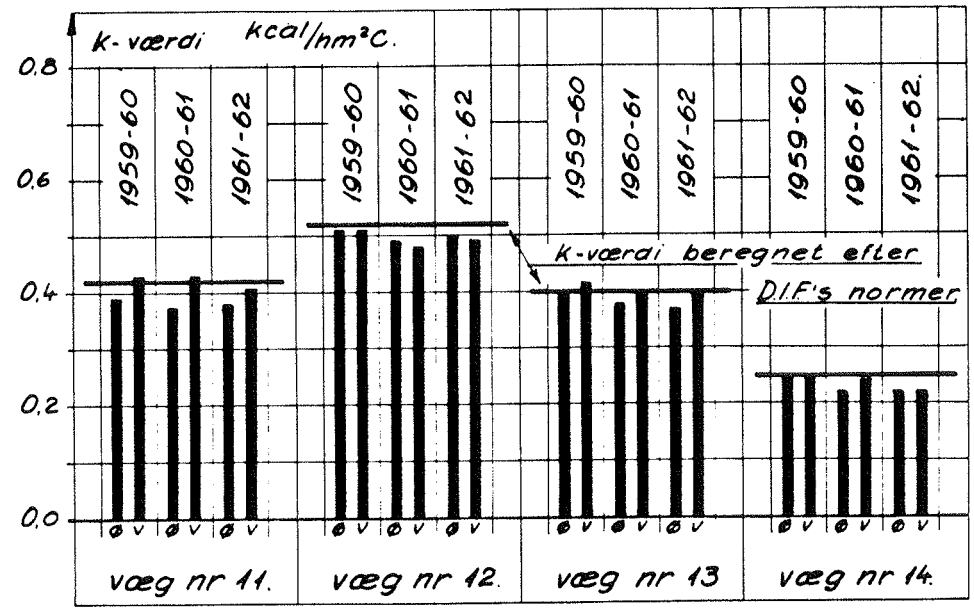


Fig. 43. Beregnede og målte k-værdier for 30 cm hule mure isoleret under opførelsen.

Calculated and measured k-values for 30 cm hollow brick walls insulated during the brick-laying.

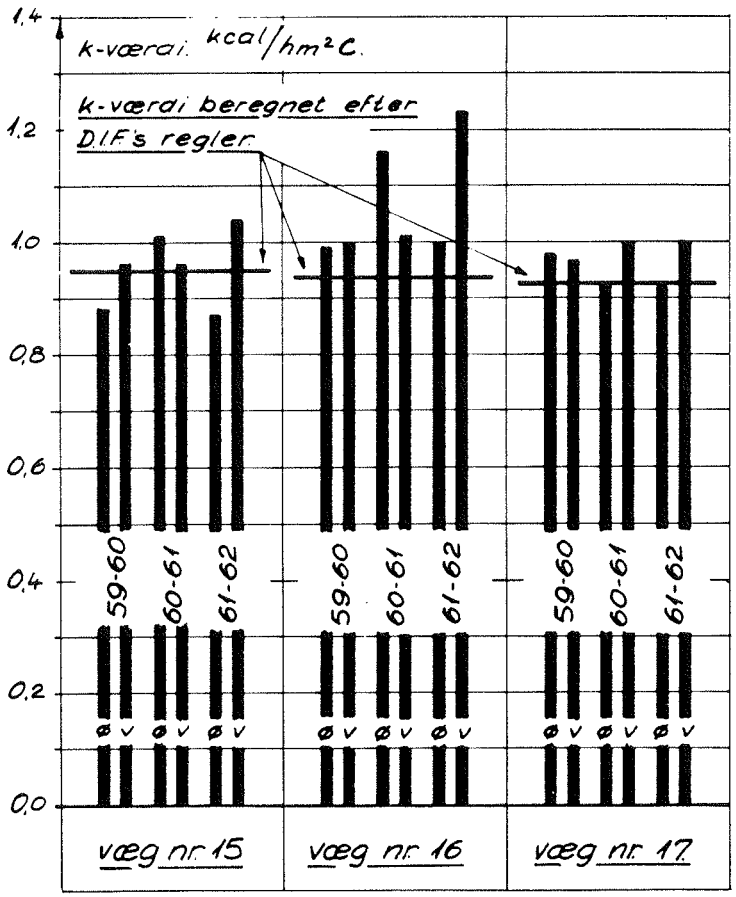


Fig. 44. Beregnede og målte k-værdier for 23 cm gasbetonvægge.

Calculated and measured k-values for 23 cm light-weight concrete walls.

nr. 15 og 16 øst i perioden 1960-61 og for væg nr. 15 og 16 vest i 1961-62 kunne tyde på en stærk slagregnsfølsomhed, som er forklarlig for den ubehandlede vægs vedkommende, men overraskende for væg nr. 16, som er behandlet med en speciel stænkpuds, som angives at nedsætte væggens modtagelighed for slagregn.

Imidlertid viser en række bestemmelser af vandindholdet i gasbetonvæggene*, at de overfladebehandlede vægge faktisk har været mere fugtige end den helt ubehandlede væg. På fig. 45 ses resultaterne af fire prøveudtagninger. Det ses, at

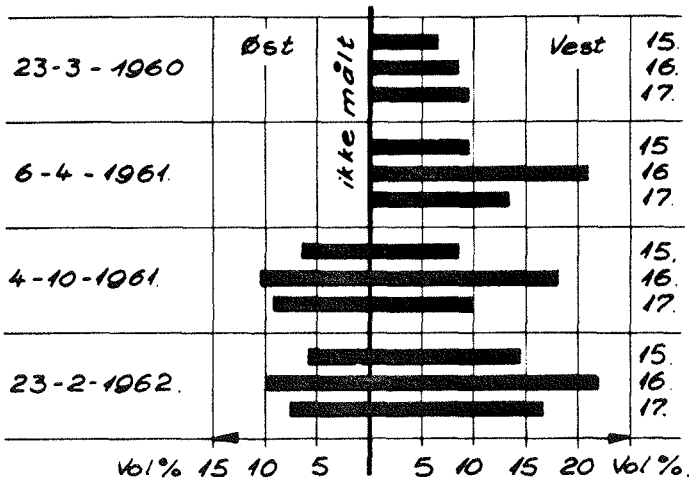


Fig. 45. Målt vandindhold i gasbetonvægge.

Measured moisture contents in lihgt-weight concrete walls.

ved alle målinger er vandindholdet størst i væg nr. 16 og mindst i væg nr. 15. Betragter man nu de to måder, væggene kan tilføres vand på, ved slagregn udefra og ved vanddampdiffusion indefra, så må det antages, at der gennem de tre ens indvendige vægoverflader diffunderer lige megen vanddamp ind i de tre vægge. Forskellene i vandindhold må altså skyldes dels forskellig modtagelighed for slagregn og dels forskellig modstand mod vandafgivelse ud gennem den udvendige vægoverflade.

* Vandindholdet er bestemt ud fra boreprøver udtaget øverst og nederst i hver væg og i hele væggens tykkelse.

Ved at sammenligne fugtindholdet i top og bund i de tre vægge kan man få et begreb om slagregnsfølsomheden, idet væggenes øverste del vil modtage betydeligt mere slagregn end den nederste del, for det første fordi en zinkinddækning rundt om taget tilfører væggens øverste kant en ekstra vandmængde, og for det andet fordi slagregnsintensiteten aftager ned langs væggen. Modtageligheden for slagregn skulle altså vise sig ved et større vandindhold i væggens øverste del end i væggens nederste del. I gennemsnit indeholder væg nr. 15 og 16 henholdsvis 50 % og 55 % mere vand i top end i bund, medens væg nr. 17 kun indeholder 8 % mere i toppen. Dette tyder på, at slagregnen når at fordele sig ned over væg nr. 17, medens den omgående opsuges af væg nr. 15 og 16, som altså må karakteriseres som meget slagregnsmodtagelige.

Når vandindholdet i væg nr. 16 ved alle målinger har været så meget større (i gennemsnit 76 %) end i væg nr. 15, må det skyldes, at væg nr. 16 har en større modstand mod fordampning fra den udvendige overflade, således at slagregn og indefra diffunderet vanddamp akkumuleres i væggen.

De til forsøgsvæggene anvendte gasbetonsten har en noget højere rumvægt end de, der i dag benyttes til opførelse af huse. Dette tillige med det forhold, at prøvehuset ligger særlig udsat for slagregn, og at luftfugtigheden inde i prøvehuset har været holdt højere, end det normalt vil være tilfældet i centralopvarmede huse, har bevirket, at de målte k-værdier for gasbetonvæggene er større, end man kan forvente i almindeligt boligbyggeri. En uofficiel undersøgelse af fugtindholdet i et større antal repræsentativt udvalgte gasbetonhuse har vist, at middelfugtindholdet ligger på ca. 6 %.

Det væsentligste resultat af målingerne på disse gasbetonvægge bliver derfor sammenligningen mellem de forskellige overfladebehandlingers indflydelse på gasbetonvægges fugtindhold, og her synes det klart at fremgå, at selv med en meget udsat beliggenhed, må det foretrækkes, at lade gasbetonvæggen stå ubehandlet, fremfor at anvende en af de her prøvede overfladebehandlinger.

5.4. Træelementvægge

Der er i tre varmesæsoner foretaget målinger på væg nr. 10, som består af et træskelet, udvendigt forsynet med en rustik beklædning, og indvendig beklædt med gibsplader. Isoleringen består af 7 cm stenuld (γ = ca. 35 kg/m^3) med en polyetylenfolie på den indvendige, og vindtæt papir på den udvendige side.

I den sidste varmesæson er der endvidere målt på væg nr. 18 a, som består af et træskelet, udvendigt forsynet med en eternitplade og indvendig med en gibsplade. Isoleringen består af 12,5 cm glasuld (γ = ca. 15 kg/m^3) med en diffusionstæt sælpap på den indvendige, og et lag asfaltpapir på den udvendige side.

Måleresultaterne fremgår af tabel 6 og fig. 46. Som det ses, er k-værdien overalt en del lavere end beregnet. Dette skyldes sikkert, at isoleringen i disse vægge er mere tør end antaget i D.I.F.'s regler.

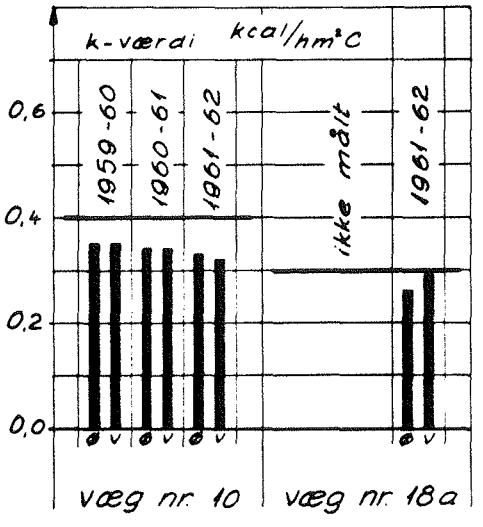


Fig. 46. Beregnede og målte k-værdier for træelementvægge.

Calculated and measured k-values for frame walls.

5.5. Betonelementvægge

På foranledning af Dansk Ingeniørforenings udvalg vedrørende byggeriets rationalisering, arbejdsudvalg 2, blev der i 1956-57 foretaget en række laboratoriemålinger til bestemmelse af nogle typiske betonsandwichelementers varmeisoleringsevne og

egenskaber overfor fugttransport. Målingerne er beskrevet i udvalgets publikation: Montagebyggeri 8 med tillæg 8A.

På daværende tidspunkt var det normalt at udforme sandwichelementerne med en luftspalte imellem den yderste betonplade og isoleringslaget med det formål at forhindre en nedfugtning af isoleringen. Forsøgene bekræftede for så vidt det ønskelige i en sådan luftspalte, idet der ved de ret strenge klimapåvirkninger, som forsøgselementerne var udsat for, blev aflejret et ikke ubetydeligt rimlag i luftspalten, som det ved pludselig mildning i vejret ville være ønskeligt hurtigt at kunne få drænet væk til det fri gennem drænhuller forneden i den yderste betonskal. Imidlertid er de fugtmængder, som i løbet af en vinter ved diffusion indefra vil kunne kondensere i isoleringslaget, ikke så store, at de vil kunne bevirke en væsentlig forringelse af elementets isoleringsevne, og den kondenserede fugtmængde skulle have gode muligheder for at tørre bort om sommeren. I praksis er der derfor grund til at formode, at luftspalten og drænhullerne kan undværes, hvilket ville være særdeles ønskeligt af produktionsmæssige grunde.

For om muligt at få denne formodning bekræftet i praksis besluttede udvalget at lade indsætte et par typiske betonsandwichelementer i laboratoriets prøvehus. Nedennævnte måleresultater bekræfter denne formodning, og betonsandwichelementer udføres da også nu normalt uden luftspalte og drænhuller.

Der er foretaget målinger på to prefabrikerede facadeelementer bestående af to jernbetonplader, hvorimellem der er anbragt en isolering bestående af henholdsvis stenuld (væg nr. 18) og karbamidskum (væg nr. 19).

Hver af de indvendige betonplader var forsynet med to huller, som muliggjorde et periodisk tilsyn med isoleringen. Til daglig var disse fyldt ud med betonpropper støbt ind i voks. Der er aldrig ved inspektion af isoleringerne fundet synlige tegn på fugt. Det var derfor at vente, at varmetabsmålingerne skulle vise et konstant forløb. Man kan gå ud fra,

at disse elementer er upåvirkelige af slagregn, da de er uden fuger af nogen art.

På tabel 7 og fig. 47 ses måleresultaterne. Den store forskel på k-værdierne på 19 øst og 19 vest kan skyldes en forskel i isoleringstykkelsen på grund af fremstillingsunøjagtigheder. Der skal kun en ændring på 8 mm af isoleringstykkelsen til for at få den målte forskel.

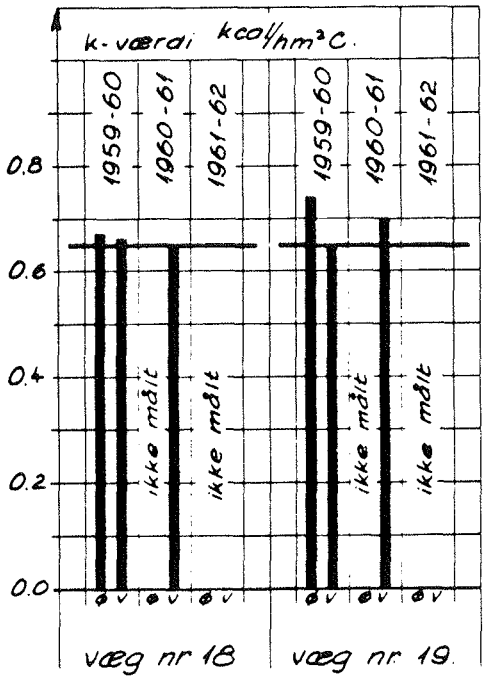


Fig. 47. Beregnede og målte k-værdier for betonelementvægge.
Calculated and measured k-values for prefabricated concrete element walls.

Når isoleringsevnen af væg nr. 19 vest er målt til at være en del dårligere i den sidste måleperiode, kan det skyldes svind af karbamidskummet.

Grunden til, at der ikke er målt på 18 øst og 19 øst i den anden måleperiode, er, at vi anså det for vigtigt at få genjusteret et antal varmestrømsmålere for at se, om de holdt kalibreringen efter længere tids brug. Da betonelementvæggene blev anset for at være mest upåvirkelige af slagregn, og det følgelig ikke var nødvendigt at sammenligne øst- og vestvæggene, blev varmestrømsmålerne fjernet fra 18 øst og 19 øst og sendt til omjustering.

5.6. Halvstens teglstensvægge

For at undersøge betydningen af at mure med fyldte fuger er to af forsøgshusets prøvevægge nr. 3 og 4 udført som halvstens teglvægge med henholdsvis normale og fyldte fuger, (fig. 48). Der har i de fire år, væggene har eksisteret, aldrig været synlige regngennemslag på nogen af de to vægge.

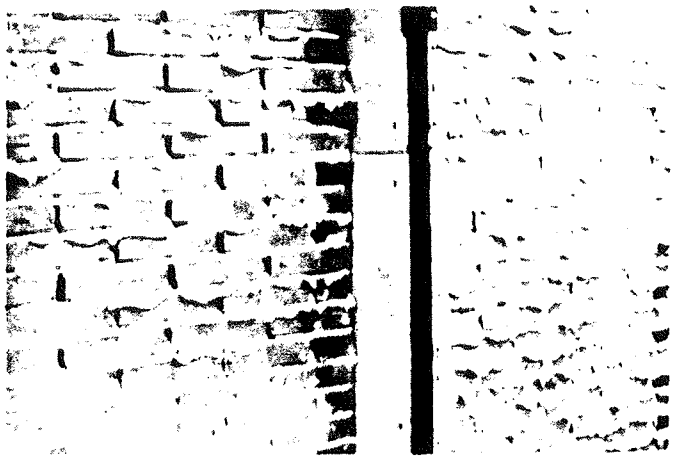


Fig. 48. Udvendig halvstensvæg muret med henholdsvis normale fuger (til venstre) og fyldte fuger (til højre).

External half-brick wall with normal joints (to the left) and filled joints (to the right).

Forsøgsbetingelserne er dog næppe helt realistiske. Da væggene kun består af en halvstens vange, vil man i tørvejr i varmesæsonen få en langt kraftigere udtørring af teglstenen, end man får i den udvendige vange i en almindelig hul mur, d.v.s. at der sjældent når at akkumulere ret meget vand i disse forsøgsvægge, hvorfor de kan opsuge slagregnen, inden denne når igennem til væggens inderside.

5.7. Konklusion

For at få et overblik over de forskellige vægges virkelige isoleringsevne sammenlignet med de beregnede efter Dansk Ingeniørforenings regler, er der på fig. 49 for hver væg vist den gennemsnitlige målte k-værdi på øst- og vestfacaden

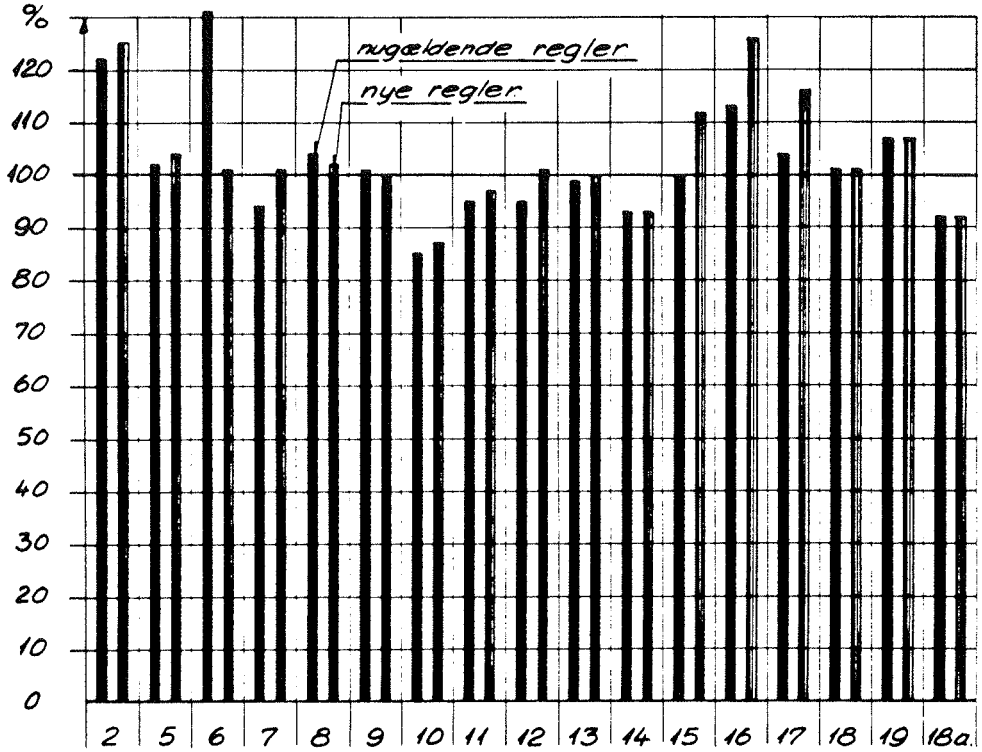


Fig. 49. Middel k-værdien målt på øst- og vestfacaden i de tre varmesæsoner i procent af k-værdien beregnet efter henholdsvis Dansk Ingeniørforenings nugældende regler og efter Dansk Ingeniørforenings forslag til nye regler.

The measured average k-values of the test walls facing east and west during the three heating seasons in percentage of the k-values calculated in accordance with the present Standards for Calculation of Heat Loss from Buildings, published by the Danish Society of Civil Engineers, and in accordance with the revised standards.

i % af den beregnede efter de nugældende regler (sorte søjler) og i % af den beregnede efter forslaget til de nye regler (stribede søjler).

Det fremgår heraf, at træelementvægge (nr. 10 og 18a) samt hule ydervægge isoleret med sten- eller glasuld (nr. 11, 12 og 14) er 5-8 % bedre, end reglerne angiver.

Hule teglvægge, isoleret efter opmuringen med stenuld, Vermiculite eller letbetonklinker (nr. 5, 8 og 9), svarer i praksis ret nøje til beregningerne efter D.I.F.'s regler.

De hule teglvægge, som er isoleret efter opmuringen med henholdsvis polystyrenkugler og karbamidskum (nr. 2 og 6), har en målt k-værdi, som er henholdsvis 20 og 27 % større end den beregnede efter de nugældende regler. Dette skyldes antagelig for kuglernes vedkommende en betydelig intern konvektion og for skummets vedkommende et ret betydeligt svind. Der er i forslaget til de nye regler taget hensyn til dette forhold for karbamidskummets vedkommende, idet karbamidskummets λ-værdi er forøget fra 0,04 til 0,06 med det resultat, at der er god overensstemmelse mellem de nye regler og den her målte k-værdi. Målingerne tyder imidlertid på, at der burde foretages en tilsvarende ændring af polystyrenkuglernes λ-værdi ved anvendelse i lodrette hulrum.

Letbetonvæggene (nr. 15, 16 og 17) er, som tidligere nævnt, temmelig afhængige af den udvendige overfladebehandling. Den blanke vægs målte k-værdi stemmer fint med den beregnede efter de nugældende regler, medens reglerne giver for gunstige k-værdier ved anvendelse af udvendig puds eller maling.

RESUME

Rapporten omhandler tre års kontinuerlige målinger af varmemodstanden i 18 forskellige, men hyppigt anvendte, ydervægskonstruktioner udsat for det naturlige klima. I afsnit 1 gennemgås overvejelserne før valget af husets udformning og placering samt valget af målemetoderne.

I afsnit 2 gøres rede for husets konstruktion og opvarmnings- og befugtningsanlæg. De atten prøvevægges konstruktion og opførelse gennemgås. Det drejer sig om følgende vægge: seks 30 cm hule teglstensvægge, hvoraf de fem senere er isoleret med forskellige former for hulmursisolering, medens den sjette ikke har været isoleret under målingerne. Fire 30 cm hule mure isoleret på forskellig vis med glasuld eller stenuld under opmuringen, tre gasbetonvægge med forskellige udvendige overfladebehandlinger. Desuden er der fire prefabrikerede bygningselementer, hvoraf de to er jernbetonelementer med henholdsvis skum- og stenuldsisolering, medens de to andre er træelementer med glasuld- og stenuldsisolering. Endelig findes der to halvstensvægge opmuret med normale og med fyldte fuger for at undersøge, om denne mur ing har nogen indflydelse på slagregnsgennemtrængningen.

Afsnit 3 omhandler målingen og registreringen af det udvendige klima. Måle- og registreringsprincippet gennemgås, de forskellige transducere for omsætning af vindhastighed og -retning samt nedbør og slagregn til registrerbare, elektriske impulser omtales. Endelig gennemgås en nykonstrueret slagregnsmåler, som i højere grad end de hidtil anvendte kan måle slagregnmængden uden samtidig at ændre denne.

I afsnit 4 gennemgås måleudstyr og målemetode til den kontinuerlige registrering af prøvevæggenes varmemodstand. Varmemodstanden bestemmes udfra måling af varmestrømmen gen-

nem væggen og temperaturforskellen mellem væggens to overflader. Til registrering af varmestrømmen har laboratoriet udviklet en varmestrømsmåler. Der gives en detailleret gennemgang af denne måler samt af de forskellige metoder, der er anvendt ved dens kalibrering. Til registreringen af termospændingerne fra varmestrøms- og temperaturdifferensmålinger er der udviklet et apparatur, som automatisk integrerer og registrerer døgnmiddelværdien af varmestrøm og temperaturdifferens over alle prøvevæggene. Princippet i registreringen er valgt således, at tidsintegralet af varmestrømmen, henholdsvis temperaturforskellen over en måleperiode, fremkommer som en differens mellem to tal aflæst på en tæller ved henholdsvis måleperiodens begyndelse og slutning. Endelig gennemgås måleresultaternes bearbejdning. Det viser sig at være nødvendigt at beregne middelværdier af varmemodstanden over temmelig lange måleperioder mindst en uge. Dette skyldes væggenes varmekapacitet i forbindelse med, at varmestrømmen måles på den indvendige side, medens temperatursvingningerne forekommer udvendigt. Dette medfører, at det i virkeligheden ikke er sammenhørende værdier af varmestrøm og temperaturdifferens som måles.

Afsnit 5 omhandler selve forsøgsresultaterne. Der er for hver gruppe vægge beregnet middel varmemodstandstal og middel k-værdier for hver af de tre varmesæsoner, som målingerne omfatter. Desuden er angivet slagregnen på henholdsvis øst- og vestfacade i hver varmesæson. Til sammenligning er anført k-værdierne beregnet efter Dansk Ingeniørforenings: Regler for beregning af varmetab fra bygninger.

Der er foretaget prøveudtagninger i forskellige prøvevægge for at sammenligne fugtindholdet i isoleringsmaterialerne og for at undersøge effektiviteten af gasbetonens overfladebehandlinger.

De undersøgte ydervægges praktiske k-værdier stemmer nogenlunde overens med dem, som fås ved anvendelse af Dansk Ingeniørforenings regler. Størst afvigelse fås for et par af teglstensvæggene med senere ifyldt hulrumsisolering. Teglstensvæggene isoleret under opførelsen synes ligesom træelementvæggene at isolere en del bedre, end reglerne angiver.

SUMMARY

The paper deals with continuous measurements of the thermal resistance of 18 different but commonly used Danish outer wall constructions, exposed to the natural climate in a 3 years' period.

In chapter 1 the considerations before the choice of construction details, orientation, and measuring methods are mentioned.

In chapter 2 the construction details, the air heating- and humidifying plant of the test house are explained as well as the construction details of the 18 test walls as follow: six 30 cm hollow brick walls, five of which are insulated with different cavity insulation materials, and one without cavity insulation. Four 30 cm hollow brick walls insulated in different ways with mineral wool during the brick-laying. Three light-weight concrete walls with different external surface treatments. Further there are four prefabricated concrete element walls, two of which are reinforced concrete elements with urea foam and rock wool insulation respectively. To investigate the influence of the brick-laying on the driving rain penetration two half-brick walls have been made, one with normal and one with filled joints.

Chapter 3 deals with measuring and registering of the external climate. The measuring and registering methods are explained, and the different transducers for transforming wind velocity, wind direction, precipitation, and driving rain into electric impulses are mentioned. Finally the construction details of a new driving rain meter are mentioned. Contrary to the previous driving rain meters this one should be able to measure the amount of driving rain without at the

same time introducing any error caused by its presence in the air stream.

In chapter 4 the measuring equipment and the methods for continuous registering of the values of different measured quantities are mentioned. The thermal resistance is determined on the basis of measured heat flow through the wall and temperature difference between the two surfaces of the test wall. For measuring the heat flow the Heat Insulation Laboratory has constructed a heat flow meter. The construction details of this heat flow meter and the different methods for calibration are mentioned. For registering the heat flows and temperature differences an apparatus has been constructed, which automatically integrates and registers the 24 hours' average values of heat flow and temperature difference of all the test walls. The registering method is chosen so that the time integral of the heat flow respectively the temperature difference during a measuring period is the difference between 2 numbers read on a counter at the beginning and the end of a measuring period. The treatment of the numbers is mentioned. It appears to be necessary to calculate the average values of the heat resistance during rather long periods, at least one week. This is due partly to the heat capacity of the walls and partly because the heat flow is measured on the inner side, while the temperature variations take place outside. In fact it is not corresponding values of heat flow and temperature difference which are measured.

In chapter 5 the actual test results are stated. For each of the three heating seasons the average thermal resistance values and the average k-values (U-value) of each test wall have been computed. The amounts of driving rain on the eastern and western test walls are stated for each heating season. For comparison the k-values calculated in accordance with the standards of heat loss calculations from buildings, published by the Danish Society of Civil Engineers, are mentioned. In order to compare the moisture content of some of the insulation materials used, and to investigate

the efficiency of the surface treatments of the light-weight concrete walls, the moisture content has been measured by drilling out samples.

The k-values found of the investigated outer walls are as a whole in good agreement with the above mentioned standards. For some of the hollow brick walls, where the air space has been filled with insulation materials after errection, the greatest deviation takes place. As to the hollow brick walls, insulated during the brick-laying, and the frame walls the insulation ability seems to be somewhat better than stated in the standards.

tabel 1.

	beregnet efter D.I.F.s regler		målt	
Væg nr.	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$
2	0,52	1,39	0,55	1,33
5	0,52	1,39	0,56	1,32
6	0,52	1,39	0,56	1,32
7	0,52	1,39	0,54	1,35
8	0,52	1,39	0,54	1,35
9	0,52	1,39	0,54	1,35

tabel 3.

	prøve udtaget den	vandindhold i volumenprocent i udv. teglstensvange. Rumvægt 1800 kg/m^3				vandindhold i isoleringsmateriale udtaget nederst i vægge.				
		øverst		nederst		rumvægt	volumen %		vægt %	
væg nr.		øst	vest	øst	vest	kg/m^3	øst	vest	øst	vest
2	11-4-62	4,3	11,7	2,3	8,1	9,3	0,030	0,037	3,2	4,0
5	1-5-62	4,1	6,1	2,3	7,1	50*	0	0,024	0	0,5
6	11-4-62	9,9	26,9	9,0	21,9	7,6	0,067	0,069	8,8	9,0
7	11-4-62	4,1	6,2	2,8	5,0	-	-	-	-	-
8	11-4-62	5,5	9,0	2,4	9,8	103	0,41	0,62	3,9	6,1
9	1-5-62	3,9	5,8	1,2	2,8	299	0,14	0,19	0,5	0,6

* angivet af A/S Rockwool.

tabel 2.

måle-periode	beregnet efter D.I.F.s regler		målt M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$		målt k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$		målt slagregn mod facade mm	
	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	øst	vest	øst	vest	øst	vest
væg nr.2: 30 cm hul teglstensvæg med indhældte polystyrenkugler								
1959-60	2,20	0,42	1,77	1,85	0,51	0,49	17	10
1960-61	2,20	0,42	1,66	1,82	0,54	0,50	56	49
1961-62	2,20	0,42	1,78	1,69	0,51	0,53	27	66
gennemsnit	2,20	0,42	1,74	1,79	0,52	0,51	33	42
væg nr.5: 30 cm hul teglstensvæg med indblæst granuleret stenuld								
1959-60	2,20	0,42	2,22	1,97	0,41	0,46	17	10
1960-61	2,20	0,42	2,29	1,85	0,40	0,49	56	49
1961-62	2,20	0,42	2,39	2,07	0,39	0,44	27	66
gennemsnit	2,20	0,42	2,30	1,96	0,40	0,46	33	42
væg nr.6: 30 cm hul teglstensvæg med indblæst karbamidskum								
1959-60	2,20	0,42	1,74	1,73	0,52	0,52	17	10
1960-61	2,20	0,42	1,49	1,61	0,59	0,55	56	49
1961-62	2,20	0,42	1,71	1,45	0,52	0,60	27	66
gennemsnit	2,20	0,42	1,65	1,60	0,54	0,56	33	42
væg nr.7: 30 cm hul teglstensvæg uden hulmursisolering								
1959-60	0,52	1,39	0,55	0,58	1,33	1,28	17	10
1960-61	0,52	1,39	0,57	0,57	1,30	1,30	56	49
1961-62	0,52	1,39	0,55	0,56	1,33	1,31	27	66
gennemsnit	0,52	1,39	0,56	0,57	1,32	1,30	33	42
væg nr.8: 30 cm hul teglstensvæg med indhældt Vermiculite								
1959-60	1,57	0,56	1,60	1,51	0,56	0,58	33	42
1960-61	1,57	0,56	1,54	1,50	0,57	0,59	56	49
1961-62	1,57	0,56	1,57	1,32	0,56	0,66	27	66
gennemsnit	1,57	0,56	1,57	1,44	0,56	0,61	33	42
væg nr.9: 30 cm hul teglstensvæg med indhældte letbetonklinker								
1959-60	1,15	0,74	1,17	1,17	0,73	0,73	17	10
1960-61	1,15	0,74	1,13	1,13	0,75	0,75	56	49
1961-62	1,15	0,74	1,21	1,07	0,71	0,79	27	66
gennemsnit	1,15	0,74	1,17	1,12	0,73	0,76	33	42

tabel 4.

måle-periode	beregnet efter D.I.F.s regler		målt M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$		målt k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$		målt slagregn mod facade mm	
	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	øst	vest	øst	vest	øst	vest
væg nr. 11: 30 cm hul teglstensvæg med 7,5 cm glasuldfilt								
1959-60	2,20	0,42	2,35	2,10	0,39	0,43	17	10
1960-61	2,20	0,42	2,48	2,12	0,37	0,43	56	49
1961-62	2,20	0,42	2,42	2,26	0,38	0,41	27	66
gennemsnit	2,20	0,42	2,42	2,16	0,38	0,42	33	42
væg nr. 12: 30 cm hul teglstensvæg med 5 cm stenuld og luftspalte mod ydre vange								
1959-60	1,72	0,52	1,75	1,76	0,51	0,51	17	10
1960-61	1,72	0,52	1,85	1,90	0,49	0,48	56	49
1961-62	1,72	0,52	1,81	1,85	0,50	0,49	27	66
gennemsnit	1,72	0,52	1,80	1,84	0,50	0,49	33	42
væg nr. 13: 30 cm hul mur med 7,5 cm stenuldsisolering. Bagmur af 11 cm gasbeton								
1959-60	2,33	0,40	2,29	2,19	0,40	0,42	17	10
1960-61	2,33	0,40	2,45	2,27	0,38	0,40	56	49
1961-62	2,33	0,40	2,48	2,30	0,37	0,40	27	66
gennemsnit	2,33	0,40	2,41	2,25	0,38	0,41	33	42
væg nr. 14: 30 cm hul mur. Formur af 11 cm gasbeton ubehandlet, isolering 12 cm stenuld batts. Bagmur 7,5 cm gasbetonplade								
1959-60	3,75	0,25	3,84	3,85	0,25	0,25	17	10
1960-61	3,75	0,25	4,35	3,94	0,22	0,24	56	49
1961-62	3,75	0,25	4,31	4,26	0,22	0,22	27	66
gennemsnit	3,75	0,25	4,17	4,02	0,23	0,24	33	42

tabel 5.

måle-periode	beregnet efter D.I.F.s regler		målt M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$		målt k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$		målt slagregn mod facade mm	
	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	øst	vest	øst	vest	øst	vest
væg nr. 15: 23 cm gasbetonvæg, udvendig ubehandlet								
1959-60	0,85	0,95	0,93	0,84	0,88	0,96	17	10
1960-61	0,85	0,95	0,79	0,84	1,01	0,96	56	49
1961-62	0,85	0,95	0,95	0,76	0,87	1,04	27	66
gennemsnit	0,85	0,95	0,79	0,81	0,92	0,99	33	42
væg nr. 16: 23 cm gasbetonvæg, udvendig overfladebehandling: Miramatt stænkpuds								
1959-60	0,86	0,94	0,81	0,80	0,99	1,00	17	10
1960-61	0,86	0,94	0,66	0,79	1,16	1,01	56	49
1961-62	0,86	0,94	0,80	0,61	1,00	1,23	27	66
gennemsnit	0,86	0,94	0,76	0,73	1,05	1,08	33	42
væg nr. 17: 23 cm gasbetonvæg, udvendig overfladebehandling: svær bastardpuds malet med Cempexo								
1959-60	0,87	0,93	0,82	0,83	0,98	0,97	17	10
1960-61	0,87	0,93	0,87	0,80	0,93	1,00	56	49
1961-62	0,87	0,93	0,89	0,80	0,92	1,00	27	66
gennemsnit	0,87	0,93	0,86	0,81	0,94	0,99	33	42

tabel 6.

måle-periode	beregnet efter D.I.F.s regler		målt M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$		målt k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$		målt slagregn mod facade mm	
	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	øst	vest	øst	vest	øst	vest
væg nr. 10: træelementvæg med stenuldisolering								
1959-60	2,33	0,40	2,64	2,68	0,35	0,35	17	10
1960-61	2,33	0,40	2,78	2,73	0,34	0,34	56	49
1961-62	2,33	0,40	2,87	2,89	0,33	0,32	27	66
gennemsnit	2,33	0,40	2,76	2,77	0,33	0,33	33	42
væg nr. 18a: træelementvæg med glasuldisolering								
1961-62	3,17	0,30	3,58	3,24	0,26	0,29	27	66

tabel 7.

måle-periode	beregnet efter D.I.F.s regler		målt M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$		målt k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$		målt slagregn mod facade mm	
	M-værdi $\frac{hm^2C}{kcal}$	k-værdi $\frac{kcal}{hm^2C}$	øst	vest	øst	vest	øst	vest
væg nr. 18: betonelementvæg med stenuldisolering								
1959-60	1,33	0,65	1,28	1,31	0,67	0,66	17	10
1960-61	1,33	0,65	-	1,34	-	0,65	56	49
væg nr. 19: betonelementvæg med karbamidskumisolering								
1959-60	1,33	0,65	1,15	1,35	0,74	0,65	17	10
1960-61	1,33	0,65	-	1,22	-	0,70	56	49