

K. W. T.

DANSK INGENIØRFORENING · BYGGERATIONALISERINGSUDVALGET

MONTAGEBYGGERI

PUBLIKATION NR.

8

Arbejdsudvalg 2: Hovedrapport
(includerer publ. nr. 2 og 7).

FACADEELEMENTER

Rationelle opbygning og virkemåde

*Rational Design of Facing
Components and their Function*

ARBEJDSUDVALG 2 KØBENHAVN 1957

I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG

LABORATORIET FOR BYGNINGSTEKNIK

I henhold til lov nr. 209 af 7. juni 1952 har boligministeriet af midlerne til teknisk-videnskabelig forsknings- og forsøgsvirksomhed stillet 194.000 kr. til rådighed for Dansk Ingeniørforening til brug for et udvalg vedrørende BYGGERIETS RATIONALISERING, især MONTAGEBYGGERI.

Denne publikation er en del af udvalgets arbejde i årene 1954-57.

Arbejdet har været fordelt på nedenstående udvalg:

Hovedudvalg

- Arbejdsudvalg 1. Montagebyggeriets nuværende stade.
 Arbejdsudvalg 2. Facadeelementers rationelle opbygning og virkemåde.
 Arbejdsudvalg 3. Statiske problemer i montagebyggeri.
 Arbejdsudvalg 4. Fuger, tolerancer og installationer.

Udvalgsmedlemmer:

Medlem af udvalg:

Civilingeniør POVL R. ANDERSEN, formand for udvalg 4	Hovedudvalg, 2, 4
arkitekt PH. ARCTANDER, M.A.A.	Hovedudvalg, 1
underdirektør, civilingeniør J. CHRISTOFFERSEN	3
civilingeniør P. M. FREDERIKSEN	4
direktør, civilingeniør JOH. HARTMANN	1
arkitekt EDV. HEIBERG, M.A.A.	4
civilingeniør W. JØNSSON	3
civilingeniør JOHS. JØRGENSEN	1
civilingeniør C. C. KIRCHHEINER	2
professor P. KJÆRGAARD, M.A.A.	4
civilingeniør V. KORSGAARD	2
arkitekt ESKE KRISTENSEN, M.A.A.	Hovedudvalg, 1, 2
civilingeniør A. K. KROG	2
civilingeniør P. E. MALMSTRØM, formand for hovedudvalget	Hovedudvalg
civilingeniør, dr. phil. P. W. MARKE	2
civilingeniør E. PHAFF MØRCK	4
civilingeniør EW. OLSEN	4
civilingeniør E. C. PEDERSEN	Hovedudvalg, 1
professor, dr. techn. B. J. RAMBØLL, formand for udvalg 3	Hovedudvalg, 3, 4
civilingeniør B. HØJLUND RASMUSSEN	Hovedudvalg, 3
civilingeniør SØREN RASMUSSEN	Hovedudvalg, 3
civilingeniør W. R. SIMONSEN, formand for udvalg 1	Hovedudvalg, 1
civilingeniør H. C. E. TEISEN	4
ingeniør J. THORSEN, M. af I.	4
civilingeniør V. USSING, formand for udvalg 2	Hovedudvalg, 2, 3
arkitekt M. VOLTELEN, M.A.A.	4
civilingeniør J. N. M. WÆRUM	1
civilingeniør JOHS. F. MUNCH-PETERSEN, sekretær for	Hovedudvalg, 1, 2, 4

I udvalgenes arbejde har endvidere deltaget civilingeniørerne M. EGESKJOLD (2), JØRN LUND (2), H. O. SONNE ANDERSEN (3), K. NOMMESEN (3), FL. MØLLER (4) samt nogle polyteknikere ved løsning af specielle opgaver.

Arbejdsudvalg 2: Hovedrapport
(includerer publ. nr. 2 og 7).

FACADEELEMENTERs
RATIONELLE OPBYGNING OG VIRKEMÅDE
Rational Design of Facing Components and their Functions

I N D H O L D S F O R T E G N E L S E

	Side
INDLEDNING	5
<u>AFSNIT A. FACADEELEMENTERNES NUVÆRENDE OPBYGNING OG VIRKEMÅDEN</u>	
1. DEFINITION AF FACADEELEMENT	1.01
2. SKEMATISK INDDDELING	2.01
3. EKSEMPLER PÅ UDFØRTE FACADEELEMENTER	3.01
Betonelementer	3.01
Lette facadeelementer	3.11
4. VIGTIGE MATERIALER I FACADEELEMENTER	4.01
Betons anvendelse i facadeelementer	4.03
Isoleringsmaterialer	4.21
Forbindelsesmidler	4.41
5. FACADEELEMENTERS VIRKEMÅDE	5.01
Varmetransmissionsmodstand	5.03
Vindtæthed	5.05
Vandtæthed	5.07
Fugttransport	5.09
Varmekapacitet	5.49
Fugtkapacitet	5.49
Kuldebroer	5.51
Vejrligets indflydelse	5.101
Brandsikkerhed	5.108
Dekorative virkemåder	5.108
Temperaturbevægelser	5.109
<u>AFSNIT B. KONKLUSIONER OG FORSØG</u>	6.01
1. RESUME AF NUVÆRENDE PRAKSIS	6.03
2. FORSØGSARBEJDETS ORGANISATION OG PLANLÆGNING	6.07
3. APPARATUR OG METODER	6.09
4. FORELØBIGE RESULTATER	6.11
5. PÅTÆNKTE FORSØG	6.13
6. FREMTIDIGT ARBEJDES MÅL OG MULIGHEDER	6.14

	Side
Bilag I: Arbejdsgrundlag	7.01
II: Amerikanske letvægtsfacader	7.03
III: Rapport over produktion og prøvning af forsøgselementer	7.11
IV: Litteraturfortegnelse	7.23
V: Summary	7.25

Indledning

I det følgende skal redegøres for resultaterne af udvalgets arbejde med ovennævnte problemer. Arbejdet blev påbegyndt på et arbejdsgrundlag som findes som bilag I til denne beretning.

Således som bevillingen til udvalgsarbejderne var givet, var det klart, at arbejdet i hovedsagen måtte tage sigte på de for montagebyggeriet gældende forhold. Der er derfor ikke i større udstrækning forsøgt uddraget noget erfaringsgrundlag fra det traditionelle byggeri, men henvisninger til dets konstruktionsformer er foretaget enkelte steder, hvor systematik eller andre hensyn gør det påkrævet, ligesom en del af konklusionerne af arbejdet må kunne overføres til sådant byggeri og finde anvendelse også der.

Afsnit A indeholder en beskrivelse af facadeelementernes nuværende opbygning og virkemåden, idet dog tid og midler kun har muliggjort teoretiske overvejelser og indsamling af eksisterende viden i et begrænset omfang.

En del afgrænsede problemer er blevet nærmere behandlet, herunder varmetabs- og fugtighedsforholdene, kuldebroer og overvejelser vedrørende anvendelse og bestandighed af beton. Varmetabs- og fugtighedsforholdene er belyst teoretisk, og i næste afsnit refereres de igangværende forsøg på dette område. En del problemer (f.eks. vedrørende fuger, og nøjagtighed i produktionen) er belyst i andre udvalg, specielt giver udvalg 1's rapport en generel oversigt over montagebyggeriet.

Afsnit B må betragtes som ufuldstændigt, idet udvalget ikke har fundet tidspunktet modent til at forsøge at forfatte egentlige retningslinier for den rationelle udformning af facadeelementer. Dette afsnit er derfor i sin foreløbige form en redegørelse for det nu igangværende forsøgsarbejdes tilrettelægning og foreløbige resultater og indeholder som afslutning en antydning af et eventuelt fortsat arbejdes mulige resultater og fremgangsmåderne for at nå disse.

Afsnit A

FACADEELEMENTERNES
NUVÆRENDE OPBYGNING
OG DERES VIRKEMÅDE

1. Definition

Ved et facadeelement forstås i det følgende en helt eller delvis færdigfremstillet bygningsdel til et montagebyggeri, der helt eller delvis tjener som ydervæg (klimaskærm).

2. Skematisk inddeling

På figuren pag. 2.02 har udvalget forsøgt at inndele en række eksempler på eksisterende ydervægskonstruktioner. Som første delepunkt har man valgt bæreevnen da dette også for indvendige vægge er et hovedskel.

Såvel bærende som ikke bærende facadeelementer er derefter inddelt i 2 hovedgrupper: monolitiske og opdelte. De monolitiske kan så være homogene eller lagdelte (sandwichelementer).

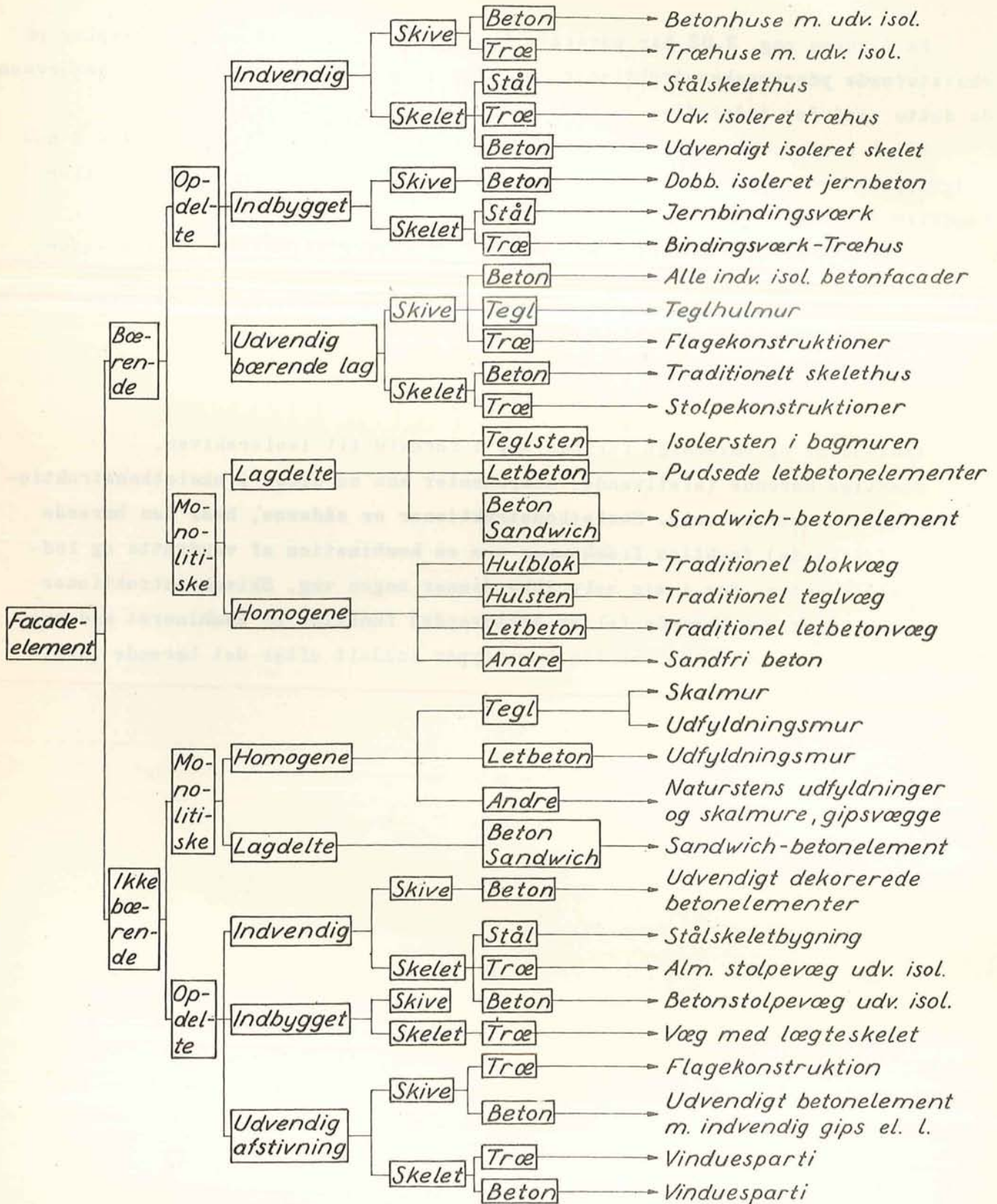
De opdelte facadeelementer kan deles i 3 grupper efter, hvor det bærende (eller afstivende) lag er placeret:

- 1) Indvendigt bærende (afstivende).
- 2) Indbygget bærende (afstivende).
- 3) Udvendigt bærende (afstivende).

Indvendigt og udvendigt forstås her i forhold til isolerskiven.

Samtlige bærende (afstivende) komponenter kan nu deles i skeletkonstruktioner og skivekonstruktioner. Skeletkonstruktioner er sådanne, hvor den bærende (eller afstivende) funktion fremkommer som en kombination af vandrette og lodrette delelementer, der i sig selv ikke danner nogen væg. Skivekonstruktioner er sådanne, hvor den bærende (eller afstivende) funktion er kombineret med vægfunktionen. Herefter er de enkelte hovedtyper inddelt efter det bærende (afstivende) materiales art.

Ydervægskonstruktioner



3.

EKSEMPLER PÅ
UDFØRTE KONSTRUKTIONER

Eksempler på udførte konstruktioner

Nedenfor er beskrevet nogle repræsentative eksempler på facadeelementer, som har været udført i Danmark og de øvrige nordiske lande.

Eksemplerne er ordnet i 2 hovedgrupper:

- a) Betonelementer og lign.
- b) Letvægtsfacadeelementer.

Betonelementer

Betonfacadeelementer er udført i et stort antal variationer. De udførte konstruktioner adskiller sig fra hinanden dels ved deres grad af færdigfabrikation - herunder størrelse - og dels ved selve lagopbygningen, hvor der kan være tale om flere eller færre lag, isolationsmaterialevalg, valg af indvendig overflade, eventuel udførelse af ventilerede hulrum, damptætte lag o.s.v.

Facaderne skal ofte dække en række felter, hvoraf hver enkelt begrænses af tværvægge eller søjler i vandret retning og af etageadskillelser i lodret retning. Størrelsen af de enkelte elementer må ses i relation til disse felters dimensioner, d.v.s. etagehøjden, brystningshøjden og afstanden mellem de lodrette begrænsninger, som kaldes rumbredden.

Skal hidtil udførte betonfacadeelementer forsøges typeinddelt, kan det i henhold til ovenstående ske dels efter lagopbygningen og dels efter størrelsen i forhold til et helt felt (rumstørrelsen). I det følgende er forsøgt en inddeling efter disse principper:

A. Lagopbygning.

1) 1-lags elementer.

Herved forstås støbte fliser eller elementer, der udgør den færdige yderside. Sådanne elementer forudsætter, at isolering og indvendig overflade opbygges uafhængigt af elementmontagen. Dette kan tænkes at ske ved opmuring, ved montering af tilsvarende indvendige elementer, ved støbning eller ved opbygning af en snedkerbagklædning.

2) 2-lags elementer.

Disse indeholder foruden det færdigstøbte yderlag et isoleringslag, sæd-

vanligvis støbt i letbeton i forbindelse med yderlaget. Den manglende indvendige færdigoverflade fremkommer efter montagen ved snedkerbeklædning eller simpelthen ved spartling eller udførelse af et pudslag på isolationsbetonen.

3) 3-lags elementer.

Disse har foruden det støbte yderlag og isoleringslaget tillige et indre lag med færdig indvendig overflade, almindeligvis udført ved støbning eller ved påføring af et kraftigt cementpudslag. Isoleringslaget kan f.eks. være letbeton, træuldsbeton, måtteisolering eller skumplastic. Sådanne elementer kræver ikke væsentlig behandling efter montagen. I forbindelse med 3-lags elementerne kan der være tale om indskydelse af et ventileret eller afdrænet hulrum bag det yderste lag.

B. Elementstørrelse.

1) Fliseelementer.

Denne gruppe omfatter relativt små elementer, for hvilke såvel højde som bredde er mindre end henholdsvis etagehøjden og rumbredde. Montagen, der kun kræver let grej, kan ske enten ved successiv opstilling og sammenstøbning - nærmest en slags opmuring i stort format - ved opstilling i formen for en støbt væg, eller ved montage på ankre på en støbt eller muret væg.

2) Plankeelementer.

Herved forstås elementer af ret lille højde og med længde svarende til afstanden mellem facadesøjlerne. Elementerne stables over hinanden og tilsluttes søjlerne ved fjer og not eller ved udstøbt dobbeltnot. Elementerne har fundet en vis udbredelse til lav bebyggelse og til parcelhuse, hvor søjleafstanden - for at overflødiggøre svært løftegrej - sjældent overstiger ca. 150 cm.

3) Brystningshøje elementer.

Disse kan være af vinduets længde eller af hele rummets længde. I sidste tilfælde anvendes de ofte i forbindelse med lette elementer over brystningshøjden.

4) Stavelementer.

Denne gruppe omfatter elementer med bredde mindre end rumbredde, og de anvendes ofte i forbindelse med ovennævnte vinduesbrede, brystningshøje elementer.

5) Rumstore elementer.

Disse dækker et helt felt og indeholder evt. hul for vindue (måske med faststøbte karme).

Der er ved inddelingen ovenfor ikke taget hensyn til, om elementerne er bærende, ikke bærende eller selvbærende. Da alle de her omhandlede elementer imidlertid indeholder en betonforstøbning samt en del tillige en støbt isolering, vil de alle ved det rette valg af dimensioner, ved eventuel udformning af forstærkningsribber, samt ved rigtigt valg af betonkvaliteter kunne opfylde disse rent statiske krav.

Den foretagne inddeling indeholder en lang række kombinationsmuligheder mellem gruppeinddelingerne A og B. Ligeledes bemærkes det, at inddelingen under hver af de to grupper er foretaget efter stigende grad af færdigfabrikation.

I udvalg 4's rapport (Fuger, publ. nr. 4, Teknisk Forlag) er vist en række typiske konstruktioner, og de er behandlet specielt med henblik på fremstillings- teknik samt udførelse af fuger og samlinger.

I det følgende er der udtaget nogle ganske enkelte af disse, idet der samtidig er tilknyttet nogle bemærkninger med hensyn til virkemåden over for kulde, vind og fugtpåvirkninger (jvf. undersøgelserne i nærværende rapports afsnit 5).

Fig. 1. Faststøbt 2-lags fliseelement.

Dette element repræsenterer et af de første forsøg på en fabriksfremstillet facade. Som ved alle konstruktioner, der støbes sammen af forskellige materialer - og i særdeleshed i dette tilfælde, hvor forstøbningen bæres af isolationslaget gennem sammenstøbningsfladen - kræves der en meget omhyggelig kontrol med betonkvaliteterne, ligesom der kræves anvendelse af en bestemt teknik med hensyn til støbning og lagring.

Fliserne støbes med ydersiden nedad imod en glat form. I mange tilfælde indstøbes kobberstritter, der går fra forstøbningen til forankring i den på stedet støbte væg bagved. De lodrette fuger udfuges med bastardmørtel.

I nogle tilfælde har man bag disse fuger indlagt paprør, som danner en slags lodret dræn og bryder kapillarvirkningen.

Der har været nogen usikkerhed med hensyn til udformningen af de vandrette fuger. De viste helt åbne fuger er udført for at sikre udluftning og dræning af klinkerbetonen. En så tæt inddeling med helt åbne fuger som vist kan dog tænkes at frembyde en vis fare for, at isolationsevnen nedsættes noget på grund af vindens pumpevirkning eller gennemblæsning af isoleringen. På den anden side er der næppe tvivl om, at isoleringen altid vil have et minimum af fugtighedsindhold.

Det er et spørgsmål, om dampvandringen gennem betonvæggen er af en sådan størrelse, at nogen egentlig udluftning er nødvendig - derimod er det utvivlsomt rigtigst, at udføre en afdræning for at fjerne vand, der under ekstreme forhold kan tænkes presset ind gennem de lodrette fuger.

I andre tilfælde har man reduceret antallet af åbne vandrette fuger til een pr. etage, eller man har foretaget udfugning af alle vandrette fuger og blot forsynet fliserne med små drænhuller ved indstøbning af plasticrør ved underkanten.

Fig. 2. 2-lags plankeelement.

Fremstilles på samme måde som fliseelementet på fig. 1.

Indvendig suppleres det støbte isoleringslag ved opsætning af bløde fiberplader. Den indvendige beklædning udføres af hårde fiberplader.

Elementerne samles tørt ved indlægning af de viste vatsnore m.v., hvorfor der stilles store krav til produktionsnøjagtigheden.

Disse samlinger kan næppe tænkes at blive helt vindtætte, selv om elementerne fremstilles meget nøjagtige, således at variationerne i fugebredde er små.

Vindtætheden beror derfor væsentligt på tætheden af den indvendige beklædning, til hvis udførelse der følgelig må stilles store krav. Da der ikke kan opstå noget væsentligt lufttryk-fald gennem forstøbningen vil den viste udførelse af elementets overside antagelig sikre imod, at der presses vand ind til bagklædningen.

I de lodrette fuger ved søjlenoterne vil der være mulighed for nogen vandindtrængen. Således indtrængende vand vil gennem den meget grovporede klinkerbeton kunne drænes ud ved de vandrette fuger.

Overfor dampvandringer indefra må konstruktionen med de mange åbne fuger anses for at være sikker. Det er derimod et spørgsmål, om der kan være tale om så store luftstrømninger og "pumpevirksomheder" i klinkerbetonen, at isolationsevnen forringes af betydning.

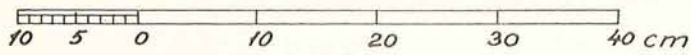
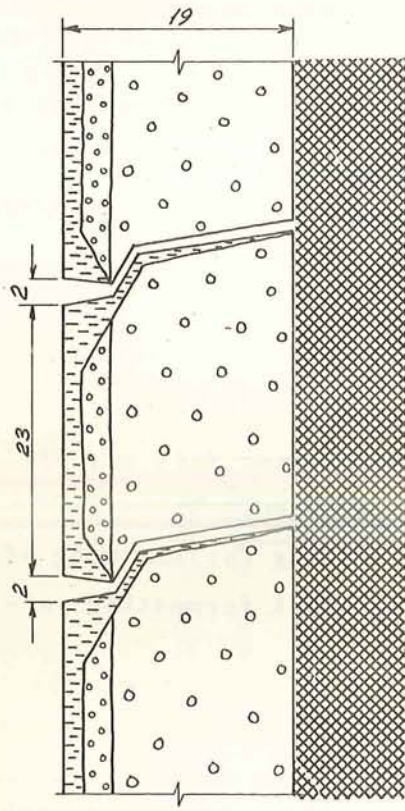
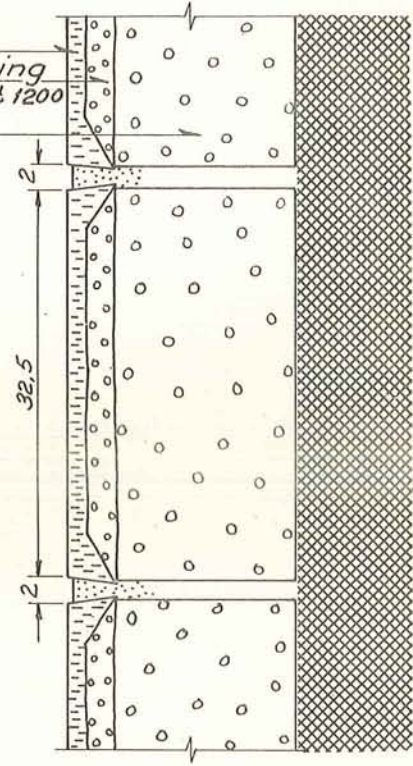


Fig. 1.



Lodret snit

1,5 cm forstøbning
 2,5 cm mellemstøbning
 Klinkerbeton rumvægt 1200
 15 cm klinkerbeton
 rumvægt 600



Vandret snit

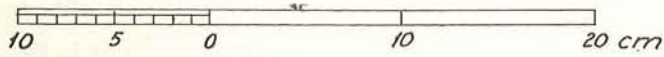
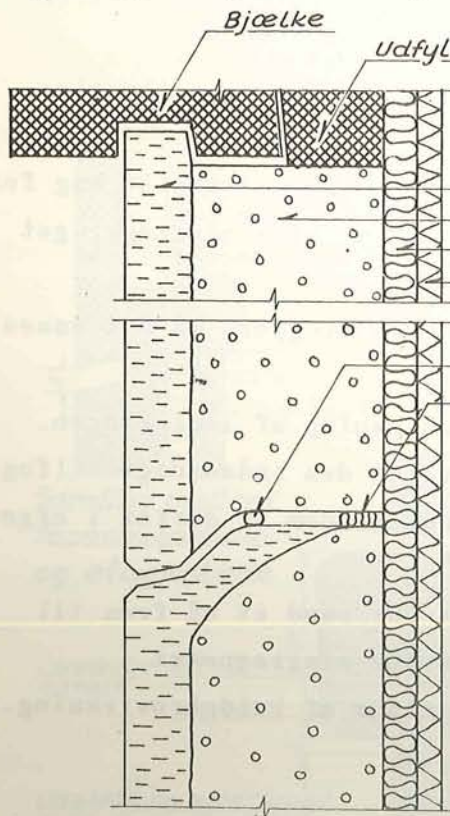


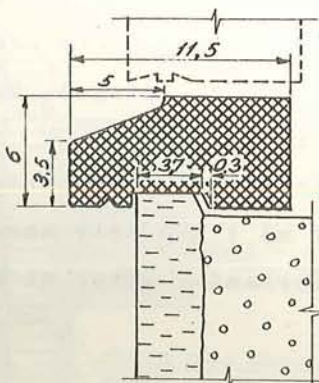
Fig. 2.



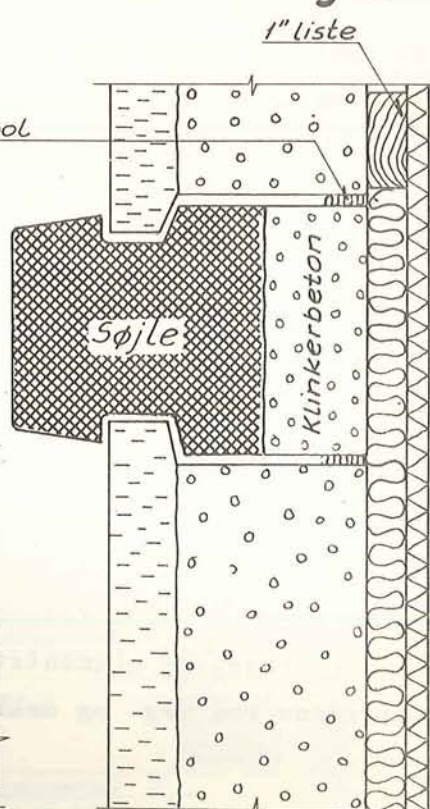
Lodret snit

3,5 cm forstøbning
 10 cm klinkerbeton
 2,5 cm batts
 12mm halvhard fiberpl.

Vatsnor
 Rockwool



Snit i saalbænk



Vandret snit

Fig. 3. 3-lags rumstort element med kraftig udvendig kantribbe.

Elementet fremstilles ved støbning i 3 tempi med ydersiden nedad.

Den ret svære forstøbning giver en mulighed for dannelse af kondensvand eller is på dennes inderside - specielt ved elementets øverste kant, hvor der ikke er nogen bagstøbning.

Dette er forsøgt afhjulpet ved udførelse af ventilationshuller foroven i brystningen samt huller ved elementets underkant. De nederste huller er anbragt således, at de samtidig er i stand til at virke som dræn, hvilket kan tænkes at være nødvendigt i tilfælde af, at der sker afsmeltning af rim eller is fra forstøbningens inderside.

Elementet i sig selv må anses for at være absolut vand- og vindtæt.

Dræn- og udluftningshullerne er så små, at der næppe bliver tale om, at gennemblæsning eller "pumpeeffekt" vil forringe isolationsevnen.

Det er et spørgsmål, om hullerne vil have nogen betydning for sænkning af damptrykket i midten af elementet. Her vil fugtighedsindholdet formentlig være en del større end i nærheden af hullerne.

Fig. 4. 3-lags element af brystningshøjde eller etagehøjde.

Elementet støbes med ydersiden nedad - de faststøbte stritter stikkes gennem måtterne til indstøbning i bagstøbningen. Denne udlægges på bitumenpapir, der under udstøbningen holdes oppe af el-rør, der stikkes gennem formsider og glasuldsmatte. Bagstøbningen afrives til færdig overflade.

Denne metode er besværlig; de nye, stive skumplasticisoleringsmaterialer vil her byde store produktionstekniske fordele.

Som ved konstruktionen i fig. 3 er der mulighed for kondensdannelse bag forstøbningen. De åbne fuger forneden sikrer en vis udluftning af isoleringslaget og i hvert fald en effektiv dræning.

I betragtning af, at glasulden kun kan binde små vandmængder, må det anses for fuldt tilstrækkeligt med den viste afdræning.

Der er mulighed for en vis pumpeeffekt og gennemblæsning af isoleringen.

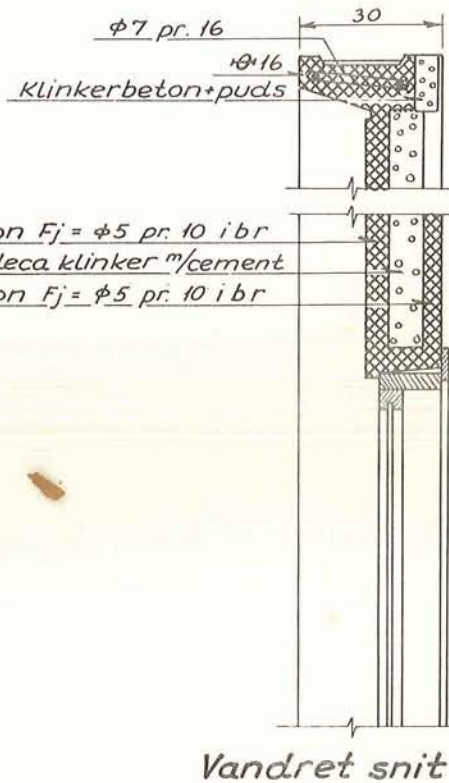
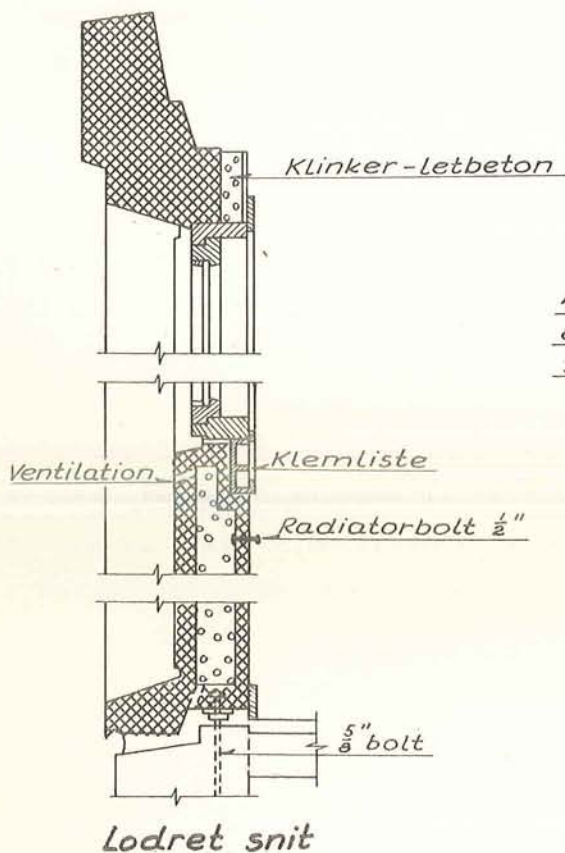
De åbne fuger i forstøbningen stiller store krav til den indvendige tilfugning, hvor hele lufttrykdifferensen skal optages. Vindtætheden er derfor i afgørende grad afhængig af disse fuger.

Udformningen af fugen gør, at det ikke er muligt for vand at nå frem til den indvendige fuge, og elementet må i sig selv anses for slagregnstat.

Detallerne ved væg- og dækforkanter giver et minimum af kuldebrovirkning.

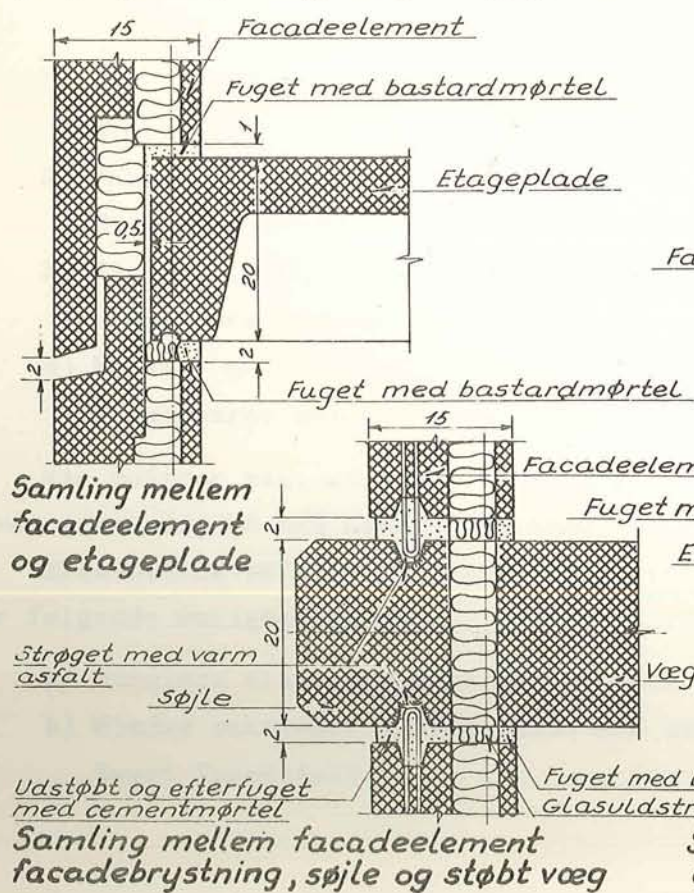
10 5 0 10 20 30 40 50 cm

Fig. 3.



10 5 0 10 20 30 40 cm

Fig. 4.



Lette facadeelementer

Herved forstås sædvanligvis elementer bestående af et lægteskelet, over hvilket ud- og indvendig beklædning, isoleringslag samt eventuelle vind- og diffusionstætte membraner er opbygget.

Mulighederne for valg af materialer til sammensætning af sådanne funktionelt stærkt differentierede konstruktioner er mangefold, og man må derfor i særlig grad gøre sig klart, hvilke krav der må stilles til de forskellige lag.

Det vil føre for vidt her at forsøge en fuldstændig behandling af de materialer og konstruktionsdetaljer, der har været anvendt i de senere års elementbyggerier. Ved udformningen af sådanne elementer kan man med fordel benytte sig af norske og svenske erfaringer og undersøgelser vedrørende ydervægge i træhuse.

Hovedsagelig på grundlag af disse skal der i det følgende gives en oversigt over de problemer, der specielt knytter sig til letvægtsfacadeelementerne.

KONSTRUKTIONSPRINCIPPER

Der gives følgende muligheder for anbringelse af letvægtsfacadeelementerne i felterne, begrænset af tværvægskanter eller søjler på de 2 lodrette sider og af etageadskillelsernes forkanter eller randbjælker langs de 2 vandrette sider:

1) Ren let facade.

Elementerne anbringes udenpå såvel væg- som dækforkanter.

2) Facade med vandrette bånd.

Elementerne anbringes udenpå vægforkanterne, men mellem dækforkanterne.

3) Facade med lodrette bånd.

Elementerne anbringes udenpå dækforkanterne, men imellem vægforkanterne.

4) Facader med lodrette og vandrette bånd.

Elementerne omsluttet af såvel dæk- som vægforkanter.

Man noterer sig, at denne inddeling fra 1) til 4) ofte samtidig giver voksende svarhedsgrad med hensyn til løsning af fugeproblemerne.

Elementerne udføres i større eller mindre enheder. I princippet foreligger der følgende muligheder:

a) Rumstore elementer dækkende et helt facadefelt.

b) Mindre sektioner i etagehøjde med een eller flere lodrette samlinger i hvert facadefelt.

- c) Sektioner i feltets bredde delt ved vandret samling i brystningshøjde.
- d) Elementer over brystningshøjde, idet selve brystningen udgøres af beton-element, støbt brystning eller udmuring.

KRAV TIL ELEMENTERNES OPBYGNING.

I rapportens afsnit 5 er givet en mere almindelig behandling af de påvirkninger et facadeelement skal svare til.

Da der imidlertid i hele den øvrige rapport er lagt hovedvægt på betonfacadeelementer, skal der her foruden en kort omtale af specielle problemer for letvægtsfacader gives en lidt udførligere behandling af den del af de senere nævnte almindelige krav til facadeelementer, der har særlig betydning for opbygningen af letvægtsfacadeelementer.

A. Statistiske påvirkninger.

Den bærende konstruktion i elementet udgøres af skelettet, der skal være tilstrækkelig stift til at optage vindtrykket uden mærkbare deformationer.

Ved meget lange elementer vil det være at foretrække fortrinsvis at lade de lodrette stolper være gennemgående.

Fastgørelserne ved kanterne skal naturligvis ligeledes være tilstrækkelig solide. Ved store elementer har man i nogle tilfælde udført fastgørelserne ved hjælp af indstøbte rustfri bolte.

Endvidere bør man - ligeledes specielt ved store elementer - være opmærksom på de ofte betydelige belastninger, skelettet vil blive udsat for i form af op-hængte støbejernsradiatorer, brede naturstensvinduesplader eller lignende.

B. Klimatiske påvirkninger.

1) Vindpåvirkning.

En undersøgelse af de faktorer, der har betydning for lette vægges vindtætheder er gennemført af Norges Bygg-forskningsinstitut.

Vinden vil forøge varmetabet gennem ydervæggen på grund af følgende virkninger:

- a) Nedsættelse af overgangsmodstanden fra ydersiden.
- b) Stærkere fordampning fra ydersiden.
- c) Gennemblæsning på langs eller "pumpning" af kold luft i selve isolerings-

materiallet.

- d) Gennemblæsning af elementet som helhed specielt gennem fugerne om dette samt omkring vinduerne.
- e) Med tiden udtørring af træværk og dermed mere utætte samlinger.

De to førstnævnte virkninger er i praksis af relativt lille betydning i forhold til de øvrige.

De norske undersøgelser har alle beskæftiget sig med konstruktioner med et ydre paplag mellem yderbeklædningen og isoleringen samt et såkaldt diffusionstæt indre paplag mellem den indre beklædning og isoleringen.

Ved undersøgelserne blev prøveelementer - 195 x 195 cm store - udsat for overtryk på den ene side, og de gennemstrømmende luftmængder samt trykfordelingen gennem konstruktionen målt. Undersøgelserne omfattede ligeledes elementer med vinduer og elementer med mere eller mindre tætte samlinger ved kanterne.

Ved at variere konstruktionen og materialerne og samtidig undersøge de enkelte materialers tæthedsegenskaber nåede man frem til en god forståelse af virkemåden.

Der skal her fremhæves følgende:

- a) Det indvendige pap samt inderbeklædningen optager almindeligvis den største del af trykforskellen.
- b) Det udvendige pap har derefter til opgave at beskytte isoleringslaget mod gennemblæsning og "pumpeeffekt".
- c) Luftrykvariationer forplanter sig næsten øjeblikkeligt igennem de fleste former for yderbeklædning.
- d) Et paplag er uden betydning for vindtætheden med mindre samlingerne overlappes og klemmes mellem plane, glatte plader.
- e) Overlapingens størrelse har indtil et ganske lille minimum ingen betydning. Det anbefales dog at overlappe i lægtebredden.
- f) Et blødt, glat pap giver mulighed for de tætteste samlinger.
- g) Sammenklæbning af papbanerne har kun ringe betydning med mindre fugerne klemmes.
- h) Lækager i form af revner og sømhuller kan forøge luftstrømmen ganske betydeligt.
- j) Maling over fugerne på udvendig eller indvendig beklædning kan virke betydeligt vindtættende. Virkningen aftager dog ret hurtigt med tiden.

Selv når samlingerne mellem papbanerne udføres som ovenfor angivet er det alligevel for de allerfleste paptyper luftstrømmen gennem samlingerne, der er den overvejende: dette gælder i særlig grad for det udvendige pap.

Af hensyn til luftgennemstrømningen er der derfor ingen mening i at bruge et særlig tæt pap. Den grænse for tæthed, ved hvilken luftstrømmen gennem samlingerne er overvejende, angives at svare til en gennemstrømningskonstant

for det udvendige pap $0,1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h mm Vs.}$

for det indvendige pap $0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h mm Vs.}$

Det udvendige paplag med klemte overlapninger kan, som senere omtalt, have uheldige virkninger med hensyn til øget fare for kondensdannelse i isoleringen. Ved beliggenhed, hvor det blæser forholdsvis lidt, kan man antagelig uden større ulempe bruge ikke klemte overlapninger.

De svageste punkter i konstruktionen er tilslutningerne langs kanterne. Utætheder langs den nederste kant vil kunne forårsage en langsgående gennemblæsning af isoleringslaget eller en kold luftstrøm fra fodpaneler og lignende.

Den direkte gennemblæsning har især mulighed for at ske igennem tilslutningsfuger samt gennem fugerne ved vinduerne.

Til tætning af disse blev der ved de norske forsøg opnået de bedste resultater med imprægneret stønuld. Sømmetæthed i de indvendige dæklistes viste sig at have stor betydning.

Norges Bygg-forskningsinstitut angiver forskellige effektive metoder til opnåelse af større tæthed i fugerne. De går alle ud på, at i hvert fald det ydre pap gøres kontinuerligt over fugerne ved hjælp af lister, der sømmes over klemte overlapninger langs elementets kanter og på vindueskarmtræet.

Hvor elementet står på betonunderlag, foreslås det at trække paplagene ind efter til fastklæbning på betonen. Hvor der er træbjælkelag har en helt effektiv tætning udfør disse ikke vist sig mulig.

Som det ses, er væggenes vindtæthed i allerhøjeste grad afhængig af den håndværksmæssige udførelse. Utilstrækkelig sømning, skødesløs udførelse af papoverlappingerne - selv i ringe omfang - kan have afgørende uheldige følger.

En trækonstruktion, i hvilken de tætte samlinger er af så stor betydning, vil med tiden blive mere utæt efterhånden som træet udtørres og svinder.

Det er også en almindelig erfaring, at træhuse med tiden bliver mere kolde og utætte.

Man må i hvert fald aldrig bruge andet end virkelig vellagret træ til sådanne ydervægge.

2) Slagregn.

Slagregns virkning hænger nøje sammen med vindens påvirkninger. Man må her ligeledes støtte sig til Norges Bygg-forskningsinstituts undersøgelser.

Det karakteristiske for slagregnen er, at regndråbernes vandrette bevægelseskomponent er den overvejende. De enkelte dråbers bevægelsesenergi er imidlertid af ret ringe betydning for disses indtrængningsevne i facaden. Betydningen af den vandrette bevægelseskomponent ligger derfor snarere deri, at den er bestemmende for den vandmængde, der rammer facaden.

Som grundlag for de laboratoriemæssige norske forsøg blev der af Norges meteorologiske institut foretaget en del målinger af de "horizontale" regnmængder. I mange egne blev der på denne måde målt regnmængder, der langt oversteg de mængder, der registreredes af de almindelige meteorologiske regnmålere.

Ved de fleste tidligere udførte forsøg er slagregnstæthedens blevet undersøgt ved hjælp af en ret voldsom påsprøjtning af store vandmængder, som på grund af bevægelsesenergien slynges mere eller mindre ind i konstruktionen.

Undersøgelser af denne art kan give et falsk billede af slagregnstæthed. Som ovenfor nævnt er dråbernes bevægelsesenergi under de virkelige forhold af ringe betydning, hvorimod den ved den samtidige vindpåvirkning frembragte lufttryksforskel gennem facaden er i stand til at føre vandet ind i konstruktionen.

Dette er erkendt ved de norske forsøg, hvor der er anvendt et overtryk samtidig med en mere moderat overstækning af facaden. Denne forsøgsteknik har i mange henseender stillet langt større krav til de undersøgte konstruktioner end tilfældet har været ved de ovenfor nævnte mere primitive vandprøver.

Af de norske undersøgelser har man lært følgende:

I konstruktioner med en tilstræbt tæt facadebeklædning viser det sig, at lufttrykfaldet gennem denne bliver så stort, at der fra den vandfilm, der dannes på ydersiden, bliver presset vand ind gennem selv de tætteste fuger i stor mængde og med ret stor styrke.

Langt bedre stiller det sig med beklædninger med ret åbne fuger, gennem hvilket trykfaldet er praktisk taget nul; her er det kun de enkelte dråber, der rammer fugen direkte, som trænger ind. Beklædningens bagside bør ventileres eller

i hvert fald drænes, således at eventuelt vand kan løbe ud.

Facadebeklædningens funktion er således nærmest at danne en ret åben regnskærm. Vindtætheden skaffes derefter ved hjælp af de tidligere omtalte tætte lag længere inde i konstruktionen.

3) Kuldepåvirkning.

Ved udformningen af letvægtsfacadeelementer må der tages fornødent hensyn til den ringe varmeaccumuleringsevne, som bevirker, at den indvendige overfladetemperatur på elementet ved diskontinuert opvarmning hurtigt synker i afkølingsperioden, hvilket særlig i ugunstige tilfælde kan medføre indvendig dugdannelse muligvis i meget koldt vejr endog rimdannelse. I genopvarmingsperioden vil den indvendige overfladetemperatur på elementet til gengæld stige tilsvarende hurtigt.

Den ringe varmeaccumuleringsevne vil ved etagebyggeri med tunge etageadskillelser og indervægge ikke gøre sig mærkbar gældende, men kan iøvrigt modvirkes ved en forøgelse af varmeisoleringssevnen f. eks. til $k = 0,30$.

Det er som tidligere omtalt af stor vigtighed, at facadeelementerne udføres helt vindtætte, i særdeleshed at varmeisoleringslaget ikke kan gennemblæses eller udsættes for "pumpevirkning", da isoleringslaget ellers ikke kan være effektivt.

FUGTIGHEDSVANDRING.

Udover de eventuelle fugtdannelser, slagregnen vil kunne forårsage, foregår der i kolde perioder almindeligvis en strøm af vanddampe fra den varme rumluft, hvor damptrykket er højt til den kolde yderluft med lavt damptryk. Den afkøling, der sker af vanddampene ved disses passage gennem facaden, vil give anledning til afgivelse af frit vand med mindre vanddampenes tryk forinden reduceres betydeligt. Disse forhold er behandlet udførligere i rapportens afsnit 5.

For at sænke damptrykket i isoleringslaget og dermed formindske kondensfaren i denne, anbringes ofte et lag af stor dampæthed mellem den indvendige beklædning og isoleringen.

Kravet om anbringelse af pap også udenfor isoleringen står imidlertid noget i modstrid hermed, idet et sådant lag medvirker til at hæve damptrykket i isoleringslaget.

Det gælder derfor om at finde en løsning, der giver væggen størst mulig tæt-

hed mod luftgennemtrængning og samtidig giver mindst mulig risiko for kondensdannelse.

I Norge er det foreslået at anvende et udvendigt pap, hvis diffusionstal er 50 gange så stort som for det indvendige pap.

Betydningen af overlapninger af pappet, sømhuller og lignende for den virkelige dampmodstand er imidlertid desværre meget lidt kendt.

Ligesom ved betragtningerne i forbindelse med vindtætningspappet, må der her være en praktisk grænse for diffusionstæthed, ved hvilken fugernes og sømhullernes indflydelse bliver overvejende.

Normalt bør diffusionstallet for det indvendige pap være mindre end $0.01 \text{ \AA } 0.02 \text{ g/m}^2 \text{ h mm Hg}$, og antallet af samlinger bør begrænses mest muligt.

Den af hensyn til slagregnstæthed anbefalelsesværdige åbne yderbeklædning med bagvedliggende hulrum er derimod velegnet til hurtigt at skaffe konstruktionen af med fugtigheden. Under sådanne betingelser er det sikkert i højere grad forholdet mellem de to paplags diffusionstal end et særlig tæt indvendigt pap, der har betydning.

SAMMENFATNING.

En analyse af letvægtsfacadeelementets funktion fører frem til følgende principielle konstruktion:

a) Udvendig beklædning bør have følgende egenskaber:

- yde beskyttelse mod regn,
- være æstetisk tiltalende,
- være holdbar,
- helst ikke brændbar,
- udformes således at lufttryksforskelle på de to sider undgås, d.v.s. med forholdsvis utætte fuger,
- fugerne udformes regneskyttede, hvilket lettest opnås med horizontale fuger,
- fugerne udformes under hensyn til beklædningens bevægelsesbehov.

b) Luftlag

indenfor udvendig beklædning sættes med fuger og dræn i forbindelse med yderluften. Vertikale imprægnerede lægter bør foretrækkes.

c) Vindbeskyttende lag

skal hindre yderluften i at trænge ind i isoleringen. Laget udføres med så få samlinger som muligt, og samlingerne bør være klemte.

Luftgennemgangstallet bør være mindre end $0.1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \text{ h}$.

d) Varmeisolerende materiale

skal have lavt varmeledningstal, god holdbarhed og bestandighed overfor fugt og brand.

e) Diffusionshindrende lag

skal hindre dampvandring med deraf følgende kondensation i væggen.

Graden af diffusionstæthed bør afvejes under hensyn til facadens øvrige tætte lag. Normalt bør diffusionstallet være mindre end $1/50$ af diffusionstallet for det udvendige pap. Antallet af samlinger bør begrænses mest muligt.

f) Indvendig beklædning

bør have følgende egenskaber:

- passende styrke,
- ikke brændbart,
- sømfast,
- besidde en vis fugtkapacitet.

Hvorvidt denne konstruktion kan forenkles, må bero på de stedlige klimatiske forhold, på bygningens brug samt på valg af materialer.

I det følgende er der vist nogle eksempler på udførte letvægtsfacadeelementer - to her fra landet, samt et enkelt fra Sverige. Til eksemplerne er knyttet nogle bemærkninger med hensyn til opbygningen og virkemåden.

Fig. 5 viser en ren let facade, der løber forbi såvel væg - som dækforkanter. Aluminiumsbeklædningens bagside er drænet ved huller i elementets fodrem.

Fugerne i beklædningen er udført tilstræbt lufttætte ved afbrydelser i den bituminerede pap, der er indlagt i samlingerne. Slagregn vil derfor ikke kunne trænge ind, ligesom eventuelt vand hurtigt vil kunne drænes ud af konstruktionen.

Vindens pumpevirkning i isoleringen er hindret af den viste gibsplade.

Indersiden med gibsplader på åben bræddebeklædning må betagnes som ret dampgennemtrængelig. I betragtning af det rigelige og godt ventilerede hulrum bag facadebeklædningen er det dog sandsynligt, at selv de ret store dampmængder, der kan transporteres gennem de indre lag, vil kunne skaffes ud af konstruktionen.

Lufttrykforskellen vil på grund af dæklisterne vel nok hovedsagelig blive optaget af den inderste gibsplade.

Ud for vægge og dæk stilles der større lufttæthedskrav til den udvendige gibsplade, idet den indvendige beklædnings tilslutninger til betonen efterhånden vil kunne blive utæt. Stopningen med mineraluld i de vandrette samlinger gør dog, at disse fuger i ringere grad bliver utætte efterhånden som træet svinde.

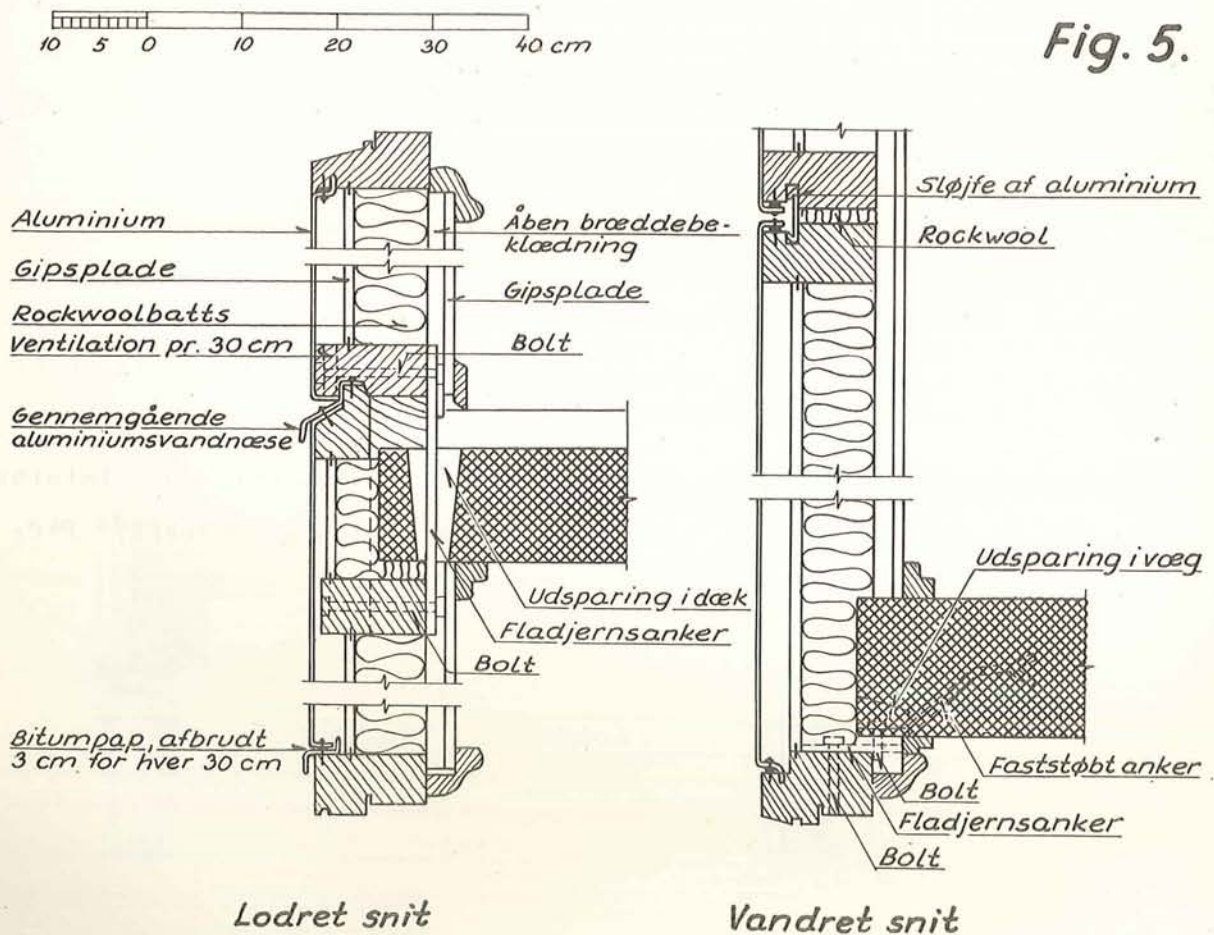


Fig. 6 viser en facade, der afbrydes ved dækforkanterne.

Bag beklædning med emaljerede jernplader er der skaffet nogen dræn- og ventilationsmulighed ved indlægning af det viste bølgepap.

Som bølgepappet er anbragt, vil det ikke yde nogen beskyttelse af isoleringen mod pumpevirkning.

På grund af det ret beskedne omfang af drænhuller, vil der dog næppe blive særlig store muligheder for vindindtrængning i isoleringen.

Inderbeklædningen med brætter og hård fiberplade er meget vindtæt og ret damptæt, hvilket vel berettiger de mere beskedne foranstaltninger til fjernelse af kondensvand.

Ved elementets over- og underkanter kan utætheder ved de viste dækbrætter tænkes at frembyde en vis fare for, at vinden presses ind henholdsvis over det akustiske loft og under gulvet.

Fig. 7 er en svensk konstruktion af en facade, der løber forbi dragere og søjler.

Den udvendige beklædning er særdeles lufttæt og er opsat på et ekstra lægtesystem, der skaffer et klart og effektivt ventileret hulrum.

Slagregn vil derfor ikke kunne trænge ind i konstruktionen, ligesom mulighederne for kondensvandsdannelser bag beklædningen ikke er til stede.

Isoleringen er beskyttet af et paplag, hvis samlinger er klemt mellem ekstra lister udenpå det bærende lægteskelet.

Paplaget er gennemgående foran såvel søjler som dragere.

Den indvendige beklædning med brætter og gipsplader er noget dampgennemtrængelig, men da der er valgt et ydre pap, der er damptæt, vil ventileringen sikkert udelukke fugtdannelse i konstruktionen.

Den indvendige side må på grund af muligheder for utætheder ved tilslutningerne regnes for at være væsentligt mere utæt end det ydre, gennemgående pap, som derfor vil optage størstedelen af lufttryksforskellen.

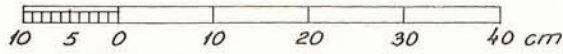
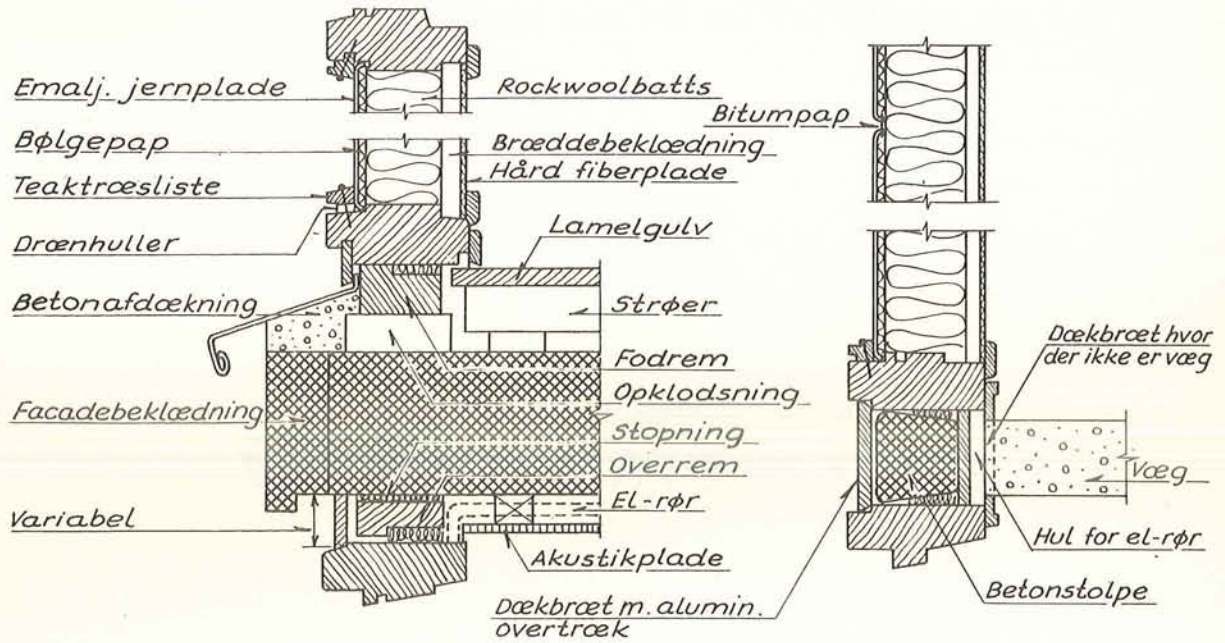


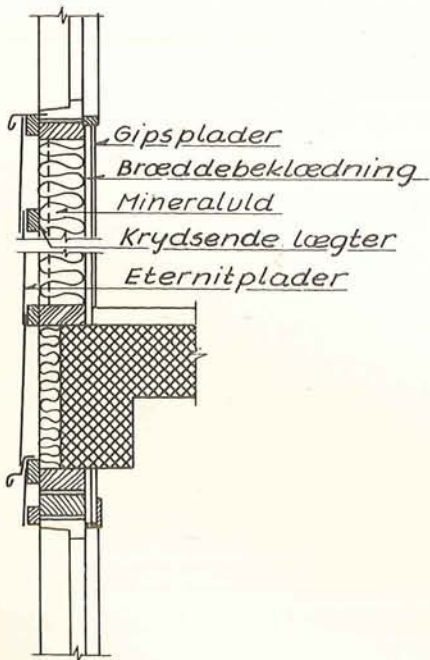
Fig. 6.



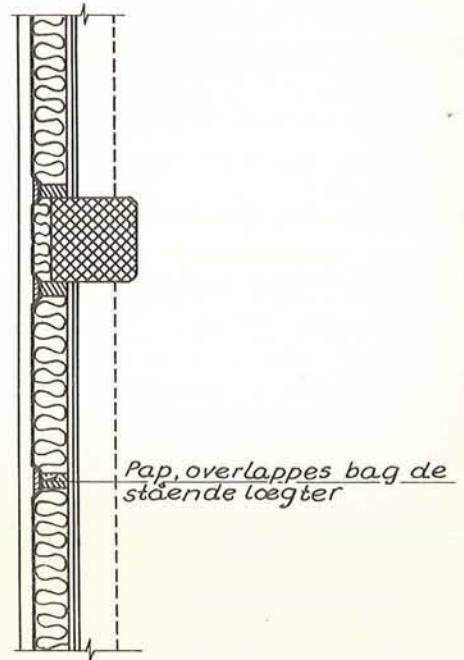
Lodret snit

Vandret snit

Fig. 7.



Lodret snit



Vandret snit

4.

VIGTIGE MATERIALER
I FACADFELEMENTER

Vigtige materialer i facadeelementer

Det har ikke været muligt indenfor udvalgets rammer at give en fyldestgørende oversigt over alle til konstruktion af facadeelementer anvendte materialer. Udvalget har koncentreret opmærksomheden om betons forhold, når den anvendes som konstruktiv del af et facadeelement, da en overvejende mængde af de i de senere år udførte konstruktioner, der falder ind under ovennævnte definition af et facadeelement, er udført af beton. Dette materiales stærkt forøgede anvendelse til facadeelementer har medført en række problemer, hvoraf igen er fremkommet en praksis, hvis nærmere omfang skal beskrives i det følgende.

Det har derimod af udvalget været anset for mindre vigtigt at gennemgå de materialer, som allerede inden montagebyggeriets stærke vækst fandt anvendelse til facadebrug.

Udvalget har endvidere ment, at en oversigt over de til facadeelementer oftest anvendte isoleringsmaterialer burde behandles oversigtsmæssigt med særligt henblik på en klarlæggelse af disse materialers egenskaber og dermed deres egnethed ved rationel opbygning af facadeelementer.

Endelig har udvalget anset det for vigtigt at påpege, at en stor gruppe materialer, grundet på de fleste facadeelementers inhomogene karakter, er nødvendige som forbindelsesmaterialer mellem facadeelementets enkelte komponenter. Udviklingen mod mere rationelt opbyggede facadeelementer fører uværgerligt mod meget inhomogene elementer, og de enkelte delkomponenters indbyrdes forbindelse bliver derfor af største betydning.

I beskrivelserne af materialerne er der ikke omtalt fremstillingsmetoder i større omfang. Der må her henvises til udvalg l's rapport.

Betons anvendelse i facadeelementer

Facadeelementer af beton kan bestå af indtil fire sammenstøbte lag: Forstøbning, afstivende lag, isolationslag (herunder eventuelle overgangslag) samt indvendigt lag.

Disse forskellige lag har hver sin særlige mission i forhold til de andre lag, hvorfor de hver især kræver sin særlige beton. Da der endvidere stilles strenge krav til facadeelementernes holdbarhed og udseende, er det nødvendigt ved fremstilling og udstøbning af de forskellige betoner og ved lagring af elementerne at tage en række hensyn og vise en omhu, der på mange punkter går ud over, hvad der er almindeligt i sædvanlig betonpraksis.

De krav, der må stilles til elementernes holdbarhed angår væsentligst styrke og vejrbestandighed. Men yderligere må det forlanges, at overfladen bevarer et tiltalende udseende, at den "patineres på en smuk måde".

Kravene til de frisk fremstillede elementers udseende angår overfladens beskaffenhed og karakter, f. eks. om den skal være glat eller ru, profileret eller plan, "tæt" eller "poret", farvet eller ufarvet.

I det følgende skal forsøges givet en oversigt over de krav, der stilles til elementerne og til fabrikationen af disse. Oversigten vil i det store og hele tage sigte på en elementtype, bestående af et bærende lag med en ydre forstøbning og en indre støbt isolering, hvis indadvendende flade undertiden er forsynet med et lag puds. Oversigten inddeles i nedenstående afsnit:

1. Betonfremstilling.
2. Forstøbning.
3. Det bærende lag.
4. Isolationslag.
5. Det indvendige lag.
6. Kontrol af elementernes kvalitet.

Iøvrigt kan der henvises til udvalg I's beretning, der giver en almindelig oversigt over elementernes projektering, fremstilling, montage o.s.v.

1. BETONFREMSTILLING (generelle krav).

Betonen skal, hvor andet ikke er anført, fremstilles i nøje overensstemmelse med Dansk Ingeniørforenings normer for beton- og jernbetonkonstruktioner DS 411, klasse A (16.2) (forkortet DS 411, 16.2).

Disse bestemmelser må dog stort set betragtes som absolutte krav for beton til facadeelementer, idet man på en række punkter har fundet det nødvendigt at stille strengere krav end normerne i almindelighed gør. Det gælder ikke mindst ved fremstilling af forstøbningsbeton.

Betonmaterialerne.

Cement. (DS 411, 4).

Der må kun anvendes ubeskadiget cement, ikke blot stenløben, men også "grynet" cement bør kasseres.

Alle de danske cementsorter, både de grå, den hvide og de farvede typer kan anvendes.

I arbejdsbeskrivelser bør der ikke - bortset fra havvands cement - stilles noget krav om, hvilken af de grå cementsorter, almindelig Portlandcement, Rapid (eller Record) eller Super Rapid, der skal anvendes.

Betonens kvalitet er ikke afhængig af, om der anvendes hurtighærdende cement eller ikke, blot der gives betonen de lagringsforhold, som den anvendte cementtype kræver. Produktionskapaciteten (støbeplads, formantal og lagerplads) og det økonomiske spørgsmål er i reglen afgørende for dette cementvalg.

Tilslagsmaterialer. (DS 411, 5. 1-2).

Sand er materiale med korn ≤ 4 mm □

Sten er materiale med korn ≥ 4 mm □

Renhed. (DS 411, 5.2. 3-4).

Kornstyrke. (DS 411, 5-1).

For at undgå frostsprængninger i forstøbningen skal tilslagsmaterialerne hertil, både i den grove part af sandet og i stenene, være fri for svage og stærkt vandsugende korn, f. eks. lerklumper og porøse kalkkorn.

Frosne materialer må ikke anvendes.

Alkalireaktioner.

Der skal ikke her tages stilling til, hvilke forholdsregler, der må træffes for at undgå alkalireaktioner, der som bekendt kan forårsage omfattende revnedannelser i betonen. Resultatet af de indgående undersøgelser, der for tiden er i gang her i landet, må afventes.

Kornform. (DS 411, 5.1).

Den kubiske eller den afrundede kornform må, hvor det er muligt, foretrakkes frem for den aflange og flade form, der nedsætter betonens støbelighed. Sidstnævnte kornform nødvendiggør enten en forøgelse af betonens mørtelindhold, eller en kraftigere bearbejdning eller begge dele, når samme tæthed skal opnås.

Kornene skal, for at være brugbare, opfylde betingelsen, at største længde (l) ikke overstiger 4 gange den mindste tykkelse (t). Endvidere bør middelbredden (b) opfylde betingelsen: $1/2 l \leq b \leq 2 t$.

Kornkurve. (DS 411, 5.1.7).

Sandets kornkurve skal ligge mellem kurverne A og B. Den må vælges så lavtliggende som muligt, altså sandet grovest muligt, for at få mindst mulige vandcementtal, alt under hensyn til den konsistens og støbelighed, som betonen må have, for at den valgte bearbejdningsmetode kan give et tilfredsstillende resultat.

Største stenstørrelse vælges så stor som muligt under iagttagelse af følgende betingelser:

Minimum for største stenstørrelse er 4 - 5 mm □

Maksimum for største stenstørrelse $\leq 1/3$ x tykkelsen af betonlaget eller $\leq 2/3$ x mindste afstand fra armeringen til betonoverfladen, eller mellem armeringsjernene.

(Se også under afsnittet "Forstøbning").

Vand. (DS 411, 6.).Tilsætningsmidler.

1. Luftindblandingsmidler.
2. Dispergerende midler.
3. Hærtningsfremmende midler.

Der bør anvendes luftindblanding i forstøbningsbetoner.

Luftmængden varierer efter følgende skala:

Største kornstørrelse:	Luftmængde:
mm □	%
32	4 ± 1
16	5 ± 1
8	6 ± 1
4	7 ± 1

I det bærende lag og i bagstøbningen er luftindblanding ikke nødvendig, men forbedring af betonens bearbejdelighed og formindskelse af dens vandudskillelse under transport og udstøbning kan opnås ved at tilsætte f. eks. halv normal mængde luftindblandingsmiddel eller et dispergerende middel.

Brug af klorkalcium o.l. som hærdningsfremmende middel må ikke finde sted (DS 411, 14). Tilsætning af klorkalcium bevirker, at betonen bliver hygroskopisk og får skæmmende skjolder, og at faren for revnedannelse øges, hvad der kan være helt ødelæggende for en forstøbningsbeton, medens denne tilsætning måske turde tillades for indre lag, jvf. den brug, der gøres af klorkalcium i f. eks. England.

Blanding af beton. (DS 411, 7).

Afmålingen af cement og tilslagsmaterialer skal ske ved vejning.

Cement kan dog også afmåles i et helt antal sække.

Den tilsatte vandmængde skal umiddelbart kunne måles.

Blandemaskinen bør være en modstrømsblender af en størrelse, der passer til den betonportion, der sædvanligvis skal blandes.

Blandetiden skal være tilstrækkelig lang, mindst 1 1/2 minut. Blandeprocessen må ikke ophøre, før betonen har den rigtige konsistens overalt i maskinen.

Kontrol af materialer og beton. (DS 411, 5.2, 18 og 16.2).

Såvel forud for som under en produktion skal cement, tilslagsmaterialer og tilsætningsmidler holdes under stadig kontrol, ligesom den fremstillede beton underkastes en løbende kontrol og prøvning omfattende konsistens, vandcementtal og styrke.

Udstøbning og afformning. (DS 411, 12).

Udstøbningen foregår bedst indendørs, om sommeren for ikke at risikere en for hurtig udtørring, om vinteren for ved opvarmning af støbehal at undgå forsinkel- se af afbinding og første del af hærdningen på grund af lav temperatur. I frost- temperatur må udstøbning ikke finde sted.

Udstøbningen skal udføres under iagttagelse af den for den anvendte støbe- metode nødvendige omhu, og bearbejdningen, så vidt muligt maskinel, skal gennem- føres effektivt, således at betonens tæthed opnås med mindst muligt vandcementtal.

Afformningen må ikke foretages, før den kan ske uden beskadigelse af elementet. Den skal altid udføres med omtanke og forsigtighed. Om nødvendigt bestemmes tidligste afformningstidspunkt (såvel som tidligste tidspunkt for levering) ved hjælp af nogle af de udtagne betonprøver.

Ønskes afformningen fremmet væsentligt, må der anvendes enten hurtighærdende cement eller damphærdning.

Lagring.

Efter afformningen skal elementerne under lagringen beskyttes mod træk, blæst og sol for at undgå en hurtig udtørring.

Der anvendes her til lands en af følgende fire lagringsmåder:

1. Almindelig lagring.
 - a) Tildækning og vanding.
 - b) Dækning med vandtæt hinde.
2. Damphærdning efterfulgt af almindelig lagring.
3. Damphærdning alene.

Lagring under vand har endnu ikke fundet anvendelse her i Danmark i modsætning til f. eks. Sverige, hvor det har været brugt i visse tilfælde.

Almindelig lagring.

Lagringstiden ved "normal" temperatur ($10 - 25^{\circ}$ C) for opnåelse af fuld styrke, er for elementer med:

Alm. Portland cement	28 døgn,
Rapid og Record cement	14 døgn,
Super Rapid cement	7 døgn.

Ved temperatur under 10° C må lagringstiden forlænges, om nødvendigt kan den bestemmes ved hjælp af betonprøver, der har været lagret sammen med de pågældende elementer.

Under lagringen, navnlig i den første tid, bør betonen holdes tildækket og eventuelt vandes for at undgå en for hurtig udtørring.

Man har forsøgt at hindre denne udtørring ved så hurtigt som muligt, i reglen ved afforskallingen at påføre elementet en vandtæt hinde, for at holde på den i betonen værende fugtighed. Denne fremgangsmåde må dog endnu siges at være på forsøgsstadiet.

Kravene til en sådan hinde må foruden vandtæthed være, at den er let at påføre (i reglen ved sprøjtning) samt let at fjerne igen. Bedst er det naturligvis, hvis den forsvinder af sig selv, f. eks. under vejrligets påvirkning, når betonen er tilstrækkelig gammel. Desuden må en sådan hinde ikke efterlade nogen form for skæmmende spor på betonen.

Lagring i frostvejr må ikke finde sted, før betonen har opnået styrke nok til at være "frosthård" (se anvisning nr. 17 om vinterstøbning, udsendt af Statens Byggeforskningsinstitut).

Ved damphærdning kombineres fugtigholdelse af betonen med en hærdningsfremmende opvarmning. Herved opnås en forkortelse af fremstillingstiden, ikke mindst om vinteren, gennem tidligere afformning og kortere lagringstid. Dette giver en bedre udnyttelse af forme samt støbeplads og således en større produktionskapacitet.

Damphærdning giver ikke en bedre beton- og varekvalitet end bedst mulig almindelig lagring, men den kan i sammenligning med almindelig lagring yde en større sikkerhed for, at lagringen og dermed kvaliteten af varen bliver mere ensartet.

Endvidere må der undertiden lægges vægt på, at spændinger hidrørende fra ensidigt udtørringssvind ikke indtræffer under damphærdningen.

Her i landet er der hidtil brugt damphærdning ved lavt tryk. Varerne kan anbringes i specielt bygget hærderum, under en "dampkasse" af træ eller, hvis der er mangel på hærderum, under en tildækning af presenninger.

Ved brug af damphærdning om vinteren, er det vigtigt at sørge for afkøling af elementerne inden de tages ud af hærderummet, da de ellers vil kunne tage skade som følge af de indre spændinger, der opstår i dem ved en pludselig stor temperaturforandring.

Den ved damphærdning opnåede effektive alder eller lagringstid, målt i døgn ved normal lagring, kan ret nøje bestemmes som forholdet

$$\frac{\text{antal grader C x antal timer}}{432 \text{ gradtimer}}$$

idet 432 gradtimer = 18° C x 24 timer svarer til lagring i normal temperatur i eet døgn.

Fremgangsmåden ved damphærdning kan være meget forskellig fra fabrik til fabrik.

Stabling og læsning.

Der må drages omsorg for, at elementerne ikke beskadiges hverken under stabling på lagerplads eller ved læsning.

2. FORSTØBNING.1. Udseende.Overfladens beskaffenhed.

Overfladen kan være:

1. glat, fremstillet uslebet eller slebet,
2. ru, fremstillet kostet (vasket), afsyret, sandblæst eller behugget.

De glatte uslebne overflader kan fremstilles med eller uden småhuller og porer, altså henholdsvis mindre eller mere "tæt", undertiden støbes overfladen spejlblank. Den hul- og porefri, eventuelt blanke overflade er mere udsat for revnedannelse end den mindre tætte overflade, da den må fremstilles af en vådere beton (beton med større V/C tal).

Forstøbningen kan fremstilles grå (ufarvet), hvid eller farvet: rød, brun, gul, grøn, blå og sort.

2. Holdbarhed.Udseende.

For bevarelse af overfladens karakter og farve samt renholdelse er tætheden af afgørende betydning. Jo mindre fugtighedssugende overfladen er, i desto mindre grad bliver støvpartikler fastholdt, og jo bedre kan regn skylle støvet bort.

Der kan være grund til at gøre opmærksom på, at overflader, der er efterbehandlede, således at de fremtræder ru, synes at have bedre vandafvisende egenskaber end glatte, muligvis som følge af mindre kapillær sugning. I England og Frankrig anses man børstede eller sandblæste overflader (exposed aggregates) for at være nødvendige i sodmættet luft. Yderligere sikring af facadeelementets selvrensning kan ske ved at sprøjte eller smøre overfladen med en vandafvisende vædske. En sådan behandling af overfladen vil først og fremmest være formålstjenlig på lysere overflader, der ellers hurtigt bliver snavsede og skjoldede. Den selvrensende virkning menes at kunne holde sig i adskillige år.

Farver i farvet forstøbningsbeton skal være lys- og alkaliægte.

Styrke.

Bevarelsen af styrken i selve forstøbningen forudsætter en beton som er vejrbestandig og tæt. Det er derfor absolut nødvendigt at bruge vejrbestandige betonmaterialer, omhyggelig betonproportionering og effektiv bearbejdning m.m., som nævnt ovenfor.

Betonen i forstøbningen må ligeledes være tæt for at hindre fugtighed i at trænge ind i elementet, hvor denne vil bevirke rustdannelse på armeringen og forringelse af isolationen og give anledning til frostsprængninger. Der må derfor ikke findes gennemgående huller, porer eller revner i forstøbningen.

Materialer.Cement.

Ved brug af hvid eller farvet cement må der udvises særlig omhu under fremstilling og lagring, da enhver beskadigelse, revnedannelse og misfarvning er mere iøjnefaldende, når forstøbningen har en anden farve end grå.

For at undgå misfarvninger under stabling, må man bruge malede træstrøer, eventuelt betonklodser, som under- og mellemlag. Halmmåtter bør undgås som til-dækningsmateriale.

Til farvede forstøbninger bør færdigfarvede cementer foretrækkes, da de synes at give mere ensartethed i farven og større sikkerhed for styrken end tilsætning af farvestof til grå eller hvid cement. Anvendes tilsætning af farvestof til cementen må mængden af farvestoffet højst udgøre 5 %, beregnet i forhold til cementens vægt, da større mængder synes at forårsage væsentlig forringelse af betonens styrke.

Cement og farvestof blandes for sig, inden blanding af betønen. De skal blandes grundigt på maskine. Farvestoffet tilsættes grå eller hvid cement, afhængig af hvilken farvetone der ønskes.

Tilslagsmaterialer.

Tilslaget må ikke indeholde porøse, frostfarlige korn større end 4-5 mm □ De naturligt forekommende grusmaterialer, sø- og bakkematerialer, skal derfor finharpes og deres sten kontrolleres og sorteres for at få et tilstrækkeligt kalkstensfrit materiale.

Da kornkurverne for sandets vedkommende, som foran nævnt, skal ligge mellem kurverne A og B (DS 411, 5.1), vil det være nødvendigt at "vaske" bakkematerialer-

ne for at få reduceret mængden af de mindste korn (ler), der som regel er alt for store.

Med disse reservationer for de "naturlige" materialers vedkommende, kan der til forstøbningsbeton anvendes følgende materialer:

Sømaterialer.

Bakkematerialer.

Granitskærver.

Hvide terrazzoskærver.

Farvede terrazzoskærver.

Kalcinerede flintskærver ("kalcineret flint").

Granitskærverne er helt kalkfrit materiale.

De hvide terrazzoskærver består af meget tæt og hård kalk, der ikke er frostfarlig.

Der anvendes hovedsagelig danske terrazzoskærver (af Faxemarmor), men undertiden også tyske, der er mere hårde og hvidere end de danske.

De farvede skærver har ikke så stor kornstyrke som de hvide.

Kalcinerede flintskærver er hvide med et svagt grønligt skær, men de indeholder dog enkelte mørkere, ikke helt kalcinerede korn. Flintskærverne er som regel meget rene, da de har været stærkt opvarmede. Af fremmed stof indeholder de kun en ganske ringe mængde mindre kalkkorn, som normalt ikke skader noget, blot skærverne er blevet behandlet rigtigt med vanding efter brændingen. Kalken er da blevet læsket inden leveringen. Hvis der - som det en gang er indtruffet - ved en fejltagelse bliver udleveret uvandede skærver, vil de ulæskede kalkkorn først blive læsket efter indblanding i betonen og giver så anledning til sprængninger i forstøbningen kort tid efter betonens afbinding.

Hvorvidt der kan finde alkalireaktioner sted i beton med kalcineret flint er endnu et uafgjort spørgsmål.

Til lys, hvidlig forstøbning anvendes hvid cement og som tilslag enten sømateriale eller bakkegrus + søsten eller granitskærver.

Hvid forstøbning fremstilles af hvid cement og hvide terrazzoskærver eller kalcineret flint.

Farvet forstøbning fremstilles af farvet cement eller cement tilsat farve og søgrus + søsten eller granitskærver.

Kornkurve.

Det har vist sig, ved proportionering af beton til forstøbninger, at det ikke er nødvendigt, at kornkurven forløber jævnt, en beton med "spring" i kornkurven ("gab-grading") kan være lige så brugbar som en beton med en mere jævnt forløbende kurve.

Prøvestøbninger.

Forud for den egentlige udstøbning af elementer foretages en eller flere prøvestøbninger af forstøbningsbetonen for ved en bedømmelse af dens overflades udseende at sikre sig:

1. Betonens egnethed.
2. Rigtigt udseende af forstøbning, såvel med hensyn til farve som overfladestruktur.

Blandingsforhold.

Ved valg af blandingsforhold må der tages hensyn til, at der skal fremstilles både en tæt, vejrbestandig beton og en beton, hvis overflades beskaffenhed og karakter kan tilfredsstille kravene til udseendet. Erfaringer har vist, at disse betonegenskaber helst skal opnås under anvendelse af et cementindhold, der afviger det mindst mulige fra cementindholdet i det tilstødende lag, hvorfor der til forstøbningen i reglen anvendes blandingsforhold mellem 1:2:2 og 1:3:4.

3. DET BÆRENDE LAG.

Dette lag vil normalt være jernbeton (DS 411) med en forholdsvis lille tykkelse, hvorfor de foran nævnte regler om maksimale stenstørrelser må følges.

Det er af vigtighed, at sammenhængen med forstøbningen gøres så effektiv som mulig. Dette opnås ved:

1. Undgåelse af slamlag og støbeskel.
2. Valg af tilnærmelsesvis lige store betonstyrker i de to lag; for stor styrkeforskel imellem dem vil i reglen bevirke så stor en forskel i deres svind, at sammenhængen mellem dem kan brydes.

Af samme grund skal der benyttes samme cementtype til et elements forskellige lag. Til hvid cement i forstøbning svarer almindelig Portland i de øvrige lag.

Isolationslag.Materialer.

For at dette lag kan få så stor en isolationsevne som muligt, må det fremstilles af letbeton, f. eks. gasbeton, cellebeton, træbeton eller lecabeton.

Letbetonen kan enten fås leveret i form af plader i passende dimensioner færdige til indstøbning eller kan fremstilles og udstøbes samtidig med den øvrige beton.

Ved indstøbningen af letbetonplader må man sikre sig tilstrækkelig god sammenhæng med det tilstødende lag, f. eks. ved forankring.

Leca-letbeton.

Ved blanding af leca-betonen skal der udvises særlig omhu, idet det er meget vigtigt, at konsistensen bliver rigtig. Betonen må hverken være for våd eller for tør. I det første tilfælde vil der for nemt ske en afblanding, i det andet vil der på grund af opsugning af vand i leca-klinkerne blive for lidt vand til betonens afbinding og hårdning. I begge tilfælde vil følgen blive en forringelse af betonens styrke.

Ved blandingen af betonen må det foretrækkes at anvende klinkerne i fugtig tilstand i stedet for i tør, da blandetiden ved brug af tørre, vandsugende klinker må forøges væsentligt. Leca-letbetonen består normalt kun af cement og klinker. Der anvendes to fraktioner: 0-3 mm og 3-10 mm. De har en rumvægt i tør tilstand på henholdsvis $450-500 \text{ kg/m}^3$ og $350-380 \text{ kg/m}^3$.

Blandingsforholdet for en beton med rumvægt $600-700 \text{ kg/m}^3$ er ca 1:11, når der udelukkende anvendes 3-10 klinker.

Man kan opnå en noget stærkere og praktisk talt lige så let beton ved at erstatte indtil halvdelen af de store klinker med små (0-3mm). Med et cementforbrug på ca. 180 kg/m^3 har man således opnået en terningsstyrke af 28 kg/m^2 og en tørrumvægt på $600-650 \text{ kg/m}^3$.

Overgangslag.

Da letbetonen har en ringe styrke i forhold til det tilstødende lag, bliver der stor risiko for, at det stærkere lag på grund af sit større svind vil slå fra senere. For at modvirke dette, har man derfor med held i flere elementtyper imellem de to lag indskudt et overgangsisolationslag, hvis styrke da

omtrentlig skal være middeltallet af de to lags.

Man kunne måske tænke sig at bruge en tæt klinkerbeton som forstøbning for på denne måde at undgå nogle af overgangslagene, samtidig med at elementets tykkelse vil kunne gøres mindre for samme isolationsevne. Det er dog et spørgsmål om klinkerbetonen er tilstrækkelig vejrbestandig. I Norge skal den med held være blevet anvendt på ovennævnte måde, men et enkelt forsøg foretaget her i landet i vinteren 1955-56, viste flere frostsprængninger, så fremgangsmåden kan ikke anbefales før efter nærmere undersøgelse.

Det indvendige lag (puds).

Efterhånden som manglen på faglært arbejdskraft har gjort sig gældende, er man kommet ind på at lave de præfabrikerede elementer helt færdige fra fabrik, klar til maling. Dette er blevet så meget mere naturligt, som man er kommet ind på, at store dele af facaderne kun består af udfyldningselementer.

De krav, der stilles til det indvendige lag, er hovedsagelig:

1. Det skal være glat, så maling eller tapetsering kan foregå direkte derpå.
2. Det skal eventuelt beskytte et isolationslag.

For at få en glat overflade er det, hvis denne dannes i formens overside, hvad vel sker i mindst 90 % af tilfældene, nødvendigt at anvende en beton uden sten. Det vil i reglen være en almindelig cementpuds 1:3, der enten glittes eller filttes. Materialerne er almindelig Portland cement og sand, i enkelte tilfælde klinker 0-3 mm. Pudsen udlægges i reglen meget tørt. Tykkelsen varierer fra nogle få mm på de steder, hvor intet beskyttelseskrav gør sig gældende, til 2-3 cm på steder, hvor pudsen skal beskytte et isoleringslag.

I særlige tilfælde, hvor der kræves en ensartet ru overflade, kan man bruge specielle grussorter, der hovedsagelig består af korn fra 0,5-2,0 mm, medens de finere og grovere fraktioner så godt som ikke er repræsenteret. Grus af denne slags har man f. eks. i det filtergrus, der anvendes ved vandværkerne, og som fremstilles ved fra almindeligt bakkegrus at frasortere visse fraktioner, eller bedre i det bornholmske Robbedalegrus, der kan bruges, som det er, uden sortering. På grund af det ejendommelige forløb af disse grussorters kornkurve, må man udvise den største omhyggelighed med udstøbningen, da man ellers let får store uregelmæssigheder i overfladen.

Der er også brugt en såkaldt akustisk puds, der skal virke lydabsorberende.

Den indvendige, beskyttende beton kan i visse rum, f. eks. badeværelser og

køkkener, ønskes udført som tæt beton. Her har man brugt et almindeligt terrazzo-lag på 3-4 cm tykkelse, der er slebet og spartlet på ganske normal måde.

Kontrol med elementernes kvalitet.

Lige så nødvendigt det er at kontrollere materialerne, betonen og dennes udstøbning og lagring, lige så nødvendigt er det at føre kontrol med, at kvaliteten af de fremstillede elementer svarer til de stillede krav, da en sådan kontrol kan give nyttige oplysninger angående muligt begåede fejl under fremstillingen, således at man kan undgå gentagelser heraf.

Kontrollen skal bl. a. omfatte en konstatering af antallet og karakteren af eventuelle revner og beskadigelser.

Eftersom det desværre er en kendsgerning, at man trods al omhu fra tid til anden, navnlig i hvide og farvede elementer, ikke kan undgå mindre og fine revner, er det ikke muligt at levere elementer med garanti for, at de ikke vil krakelere.

Hvad reparation af beskadigelser angår, må reglen være den, at mindre reparationer er tilladelige, når de udføres omhyggeligt og ikke forringer elementets holdbarhed og udseende.

Isoleringsmaterialer

Til facadeelementer anvendes i dag en lang række forskellige isoleringsmaterialer, og der kommer stadig nye typer på markedet.

Det burde have været muligt her at give en oversigt, der besvarer følgende spørgsmål:

- a) Hvilke materialeegenskaber er det af betydning at kende ?
- b) Hvilken indflydelse har disse materialeegenskaber på facadens virkemåde under forskellige ydre påvirkninger ?
- c) Hvilke påvirkninger (fugt, vind og temperatur) skal man regne med at en facade udsættes for ?
- d) Hvorledes opbygger man mest rationelt en facade under hensyn til isoleringsmaterialets egenskaber ?
- e) Hvilket materiale er bedst egnet under givne ydre påvirkninger ?
- f) Hvilke materialeegenskaber har de vigtigste isoleringstyper ?

Det må desværre erkendes, at det i dag ikke er muligt at bringe udtømmende oplysninger om alle disse spørgsmål.

Dette skyldes først og fremmest de kendsgerninger, at man i dag kun er i besiddelse af sparsomme konkrete oplysninger om de betydende materialeegenskaber hos isoleringsmaterialerne, og at man savner undersøgelser til belysning af hvilke ydre påvirkninger en facade udsættes for.

Trods denne mangel på konkret viden, er det dog lykkedes at opbygge facader, hvis virkemåde stort set må siges at have været tilfredsstillende. I mangel af de nøjagtige oplysninger, har det for en stor del beroet på den enkelte konstruktørs subjektive vurdering af materialeegenskaber og virkemåde, hvorledes det færdige resultat er blevet.

En følge af denne fremgangsmåde har naturligvis været en tilsvarende mere eller mindre kompliceret opbygning af facaderne, uden at man i grunden er i stand til at sige, hvilken konstruktion der er tilstrækkelig god.

I erkendelse af, at en sådan vurdering af materialer og virkemåde er det væsentligste grundlag for materialevalg og opbygning af konstruktionen, må man mene, at det dog vil være til nogen nytte - udfra ovenstående række af spørgsmål - at opstille en oversigt, der dels samler de kendte oplysninger og dels stiller problemerne op til behandling af fabrikanter og forskere.

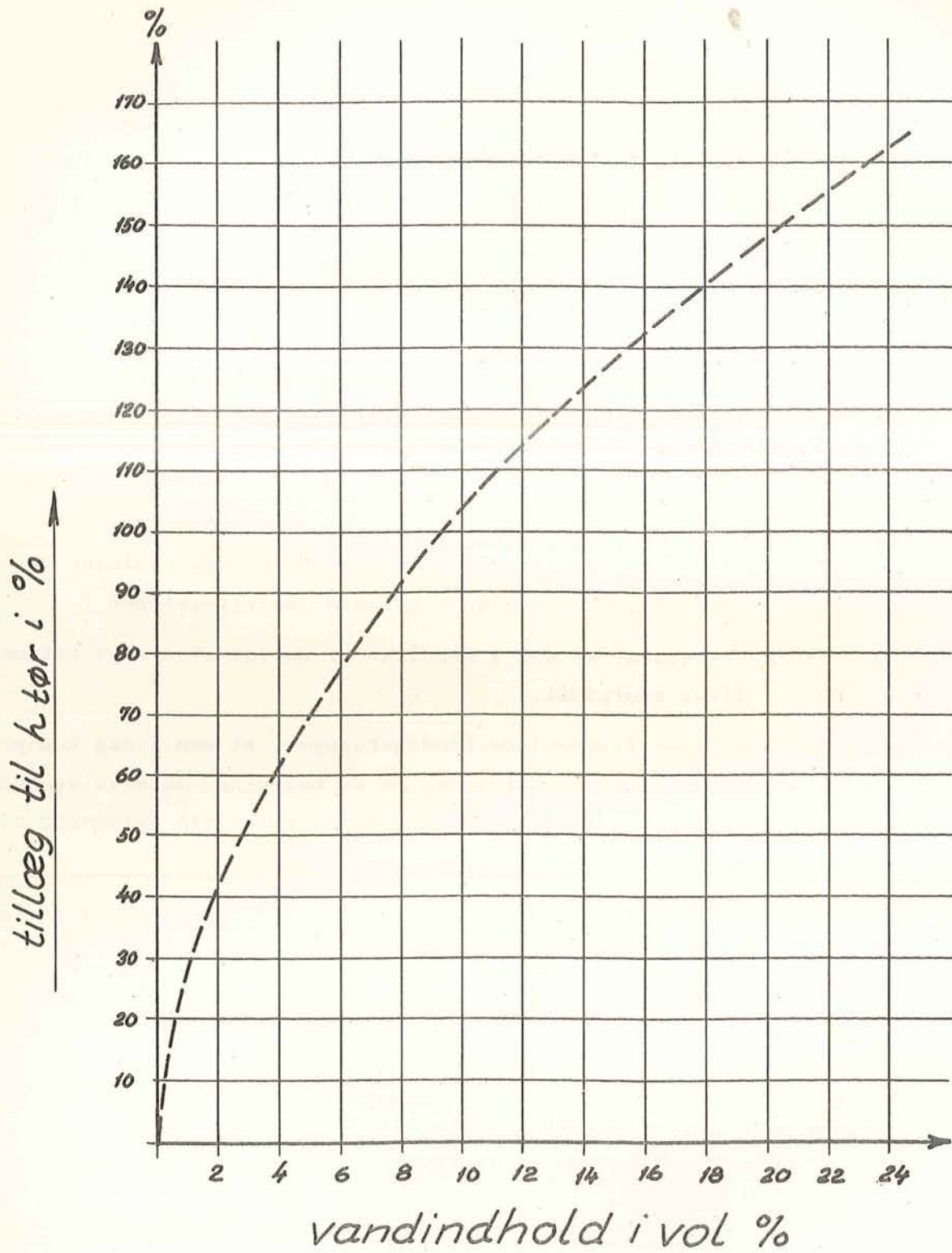


Fig. 1.

OVERSIGT OVER MATERIALEEGENS KABER OG DISSES INDFLYDELSE PÅ VIRKEMÅDEN.

1. Varmeisoleringsevne.

Udfra betragtningen at en facade skal være varme-, vand og vindtæt og at isoleringen skal fremskaffe den første af disse egenskaber, er det naturligt, at man først og fremmest spørger om et materiales varmeisoleringsevne. Praktisk taget alle fabrikanter opgiver materialets λ -værdi, dog ofte uden angivelse af, ved hvilken temperatur og materialefugtighed den er målt.

Da λ -værdien varierer overordentlig meget med materialefugtigheden kan en objektiv vurdering kun foretages, såfremt man for det første kender denne variation og for det andet har kendskab til den materialefugtighed, der forekommer i den færdige konstruktion.

Som demonstration af disse forhold er på fig. 1 vist I. S. Cammerers kurve for uorganiske materialer. Kurven angiver for uorganiske materialer sammenhængen mellem vandindholdet i volumen % og tilvæksten i λ -værdien. Forsøg har vist nogenlunde overensstemmelse, men der burde bestemmes en tilsvarende kurve for ethvert materiale.

Da man ved fortsat udtørring af et materiale i hovedsagen først driver det frie vand ud og derefter i højere og højere grad bringer det finkapillært- og krystalbundne vand til at undvige, er det vanskeligt at angive et nulpunkt for en sådan kurve. Der må derfor vedtages en eksakt definition af, hvad man forstår ved absolut tør tilstand.

2. Varmeaccumuleringsevne.

Denne egenskab i forbindelse med varmeledningsevnen har betydning ikke alene ved valget af isoleringsmateriale, men også ved dettes placering samt ved valg af facadens øvrige materialer.

De krav, man skal stille i så henseende, er alene afhængig af bygningens brug og opvarmningssystem.

Anvendes således stråleopvarmning, har man som oftest fordel af en lille varmeaccumuleringsevne, der giver hurtig udnyttelse af anlægget, men naturligvis også en hurtig afkøling, når der afbrydes for varmen. Det samme gælder vel også nok for traditionelt opvarmede bygninger med udpræget diskontinuert drift, mens man i almindeligt boligbyggeri oftest ikke er interesseret i for store og pludselige temperaturændringer. Hvor samme rum udnyttes både som opholds- og soverum, er en

hurtig afkølingsmulighed dog ønskelig.

Spørgsmålet må dog ikke tillægges for stor vægt, da rummets øvrige 5 flader ligeledes har en vis varmeaccumuleringsevne, og da man for facadens vedkommende ikke kan ændre egenskaberne væsentligt for glasarealet.

Nøjere undersøgelse til belysning af hvilke krav man bør stille til varmeaccumuleringsevnen under hensyn til brug og økonomi savnes, og man må i dag indskrænke sig til i grove træk at gøre sig klart, hvilken betydning disse egenskaber kan have ved valg af ydervægskonstruktion.

3. Fugttransportevne.

Dette emne er behandlet udførligt af udvalget i en særlig artikel. Vi skal blot her pege på, at kendskab til materialernes egenskaber i den henseende er en absolut betingelse for at opbygge en rigtig konstruktion. Det skal endvidere nævnes, at evnen til diffusion i hovedsagen har betydning for rumfugtighedens transport udefter, mens evnen til kapillær transport som regel er en faktor, der modvirker de på grund af diffusionen opståede fugtighedstilstande. På samme måde virker materialets evne til vandtransport ved gennemsivning.

At et materiale har udprægede fugttransporterende egenskaber betyder derfor ingenlunde, at det er et dårligt egnet materiale - blot skal det anvendes på den rigtige måde. Man behøver blot at se på et så udmærket og prøvet materiale som almindelige teglsten, hvor samspillet mellem diffusionstransportevne og kapillarsugningsevne viser sig at kunne opretholde en tilfredsstillende ligevægt under fugtindtrængen såvel udefra som indefra.

4. Fugtaccumuleringsevne.

Et isoleringsmateriales evne til at optage og binde fugtighed kan have betydning på 2 måder:

- a) På grund af de fugttransporterende faktorer vil materialet optage en vis fugtighedsmængde. Denne er afhængig dels af konstruktionens opbygning og dels af de klimatiske faktorer såvel på den kolde som på den varme side. Da varmeledningstallet i meget høj grad afhænger af materialets fugtighed, ville det være af stor betydning blot tilnærmelsesvis at vide, ved hvilken fugtighed, der er ligevægt i konstruktionen.
- b) Under ekstreme fugtighedspåvirkninger kan det have sin betydning, at isoleringsmaterialet optager og binder frit vand, som påny afgives når nor-

male tilstande indtræder. I mange tilfælde anbringer man på udsatte indvendige overflader en såkaldt dugisolering. Denne har som opgave dels at hæve den indvendige overfladetemperatur og dels at virke som accumulator for fugtighed, således at overfladen skånes for fugtighedsskjolder.

5. Lufttæthed.

Efterhånden som man er blevet klar over, at et isoleringslag bør kunne "ånde" til den kolde side, er materialets lufttæthed en faktor, man bør være opmærksom på.

I et materiale med åbne porer kan der under vindpåvirkninger forekomme enten en direkte langsgående gennemstrømning med kold luft, eller en "pumpevirking", der forårsager en indre luftcirkulation mellem porerne i den varme og den kolde side af isoleringslaget.

Det er indlysende, at påvirkninger af denne art kan nedsætte isoleringsevnen i overordentlig høj grad.

6. Volumenbestandighed.

For at kunne opbygge en konstruktion på rigtig måde, må man være klar over, hvilke volumenændringer materialet kan tænkes at få. Der er i hovedsagen tale om volumenændringer under følgende påvirkninger:

- a) Fugtighed.
- b) Temperaturændringer.
- c) Svind.

Disse egenskaber har særlig interesse, når man faststøber isoleringsmaterialet til beton. Såfremt man får for store volumenændringer i forhold til betonen, kan der opstå krumninger og afsprængninger af både skæmmende og direkte farlig karakter.

7. Elasticitetskoefficient.

Specielt for bærende facader, der i mange tilfælde er bygget sammen af forskellige materialer, er det af værdi at kende de forskellige materials elasticitetskoefficienter. Ved et grundigt kendskab til disse egenskaber burde der være en mulighed for, i højere grad end hidtil, at kunne udnytte også isoleringslagets bæreevne.

8. Styrke, sømfasthed.

For bærende isoleringsmaterialer er styrken en egenskab, der fra fabrikanternes side er udtømmende belyst.

For ikke bærende materialer bør styrken imidlertid også kendes, dels af hensyn til de spændinger, der kan opstå mellem isolering og tilstødende lag og dels af hensyn til mulighederne for fastgørelse af søm, radiatorbæringer o.s.v.

9. Vedhængning til andre materialer.

Der tænkes her på f. eks. sammenstøbningsflader for letbetoner, klæbeflader for måtte- eller skumisoleringsmaterialer samt på evnen til fastholdelse af pudslag.

Styrken og varigheden af sådanne forbindelser bør man klargøre sig.

10. Modstandsdygtighed overfor høje temperaturer.

Dette er en egenskab, der på grund af brandmyndighedernes krav er vel oplyst, hvorfor uegnede materialer udskilles med det samme, når der er krav om brandsikkerhed.

Man bør dog være opmærksom på, at der findes enkelte isoleringsmaterialer, der skifter karakter ved de relativt høje temperaturer, som kan tænkes at opstå ved en kraftig solpåvirkning.

11. Modstandsdygtighed overfor kemiske angreb, råd og svamp.

Disse egenskaber tages med for fuldstændighedens skyld. Almindeligt gælder vel, at organiske materialer - særlig når de udsættes for fugt - vil være udsat for råd. Endvidere bør det nævnes, at visse træimprægneringsmidler angriber beton.

YDRE PÅVIRKNINGER.

De krav man vil stille til sine isoleringsmaterialer vil afhænge dels af konstruktionsformen, d.v.s. af f. eks. isoleringens anbringelse indvendig, udvendig eller i midten af eventuelle tætte lag, dels af de påvirkninger de kan tænkes udsat for.

Det er derfor af betydning, at man inden valget af isoleringsmateriale - og for så vidt også inden fastlæggelsen af facadekonstruktionen som helhed - skaffer sig det størst mulige kendskab til disse påvirkninger, d.v.s.:

Indvendigt klima

temperatur,
 fugtighedsgrad,
 kontinuert eller diskontinuert opvarmning,
 brugsintensitet.

Udvendigt klima

temperaturer,
 vindpåvirkninger,
 regnpåvirkninger (slagregn),
 solpåvirkninger,
 udstrålingsmuligheder.

Der er her i landet ikke foretaget noget systematisk forskningsarbejde til nøjere belysning af disse faktorer. I Norge har man indledt et samarbejde med meteorologisk institut, hvorefter der - sammen med normale observationer - udføres specielle slagregnsmålinger, og endvidere foretages der sammenstilling af normale observationer, således at disse kan bedømmes ud fra byggetekniske synspunkter og anvendes til fastlæggelse af modelforsøg.

OPBYGNING AF FACADEN UNDER HENSYN TIL ISOLERINGENS MATERIALEEGENSKABER.

Alt efter hvilke materialeegenskaber isoleringslaget besidder, deles facaden op i flere eller færre lag, der hver for sig fremskaffer een eller flere af de egenskaber isoleringslaget ikke har. I det følgende er angivet de almindeligst forekommende lag.

A. Udenfor isoleringslaget.

Regnbeskyttende lag kan fremskaffes efter 2 principper:

- a) Tæt lag med en vis begrænset fugtaccumuleringsevne samt evne til hurtig afgivelse af fugtigheden - f. eks. pudslag o.l.
- b) Tæt, ikke-sugende beklædning, f. eks. eternit-, metalplader e.l. For at undgå slagregns indtrængen igennem fugerne, bør der være ventileret hulrum bag beklædningen - eventuelt åbne fuger. Derved udlignes lufttryksforskellen, der er en forudsætning for at slagregn presses gennem fugerne, og beklædningen virker udelukkende som "paraply".

Ventileret hulrum kan løse følgende 2 opgaver:

- a) Udligning af trykket gennem beklædningen som ovenfor nævnt.
- b) Borttransport af fugtighed fra isoleringslaget, for så vidt dette ikke ved kapillær tilbagesugning eller på anden måde er i stand til at skaffe sig af med eventuelt opstående fugt.

Vindtæt lag anvendes såfremt isoleringslaget i sig selv ikke er vindtæt, eller hvis det regnbeskyttende lag ikke samtidig løser denne opgave. Såfremt et ventileret hulrum skal skaffe isoleringen af med fugtighed, må dette lag naturligvis samtidig være passende dampgennemtrængeligt.

B. Indenfor isoleringen.

Damptæt lag anvendes såfremt isoleringen i sig selv ikke er damptæt, eller ikke er i stand til hurtig borttransport af fugtighed - eventuelt i forbindelse med et ventileret hulrum.

Bærende lag kan være isoleringslaget i sig selv, eller det kan kombineres med eet eller flere af de øvrige her nævnte lag, d.v.s. at det også kan anbringes udenfor isoleringen.

Indvendig overflade skal være æstetisk tiltalende og sømfast. Dette lags egenskaber overfor fugtighedstransport bør endvidere være bekendt. Det afhænger i høj grad af materialernes egenskaber og facadens ydre påvirkninger, i hvor høj grad facadens funktioner bør differentieres. For almindelige teglstensmure samt i mange tilfælde for mure af letbetoner har man ladet materialet i sig selv løse samtlige opgaver, idet pudslag stort set kun udføres af æstetiske hensyn.

DE VIGTIGSTE ISOLERINGSTYPERS MATERIALEEGENSKABER.

Efter angivelse af de betydende materialeegenskaber er det nedslående at konstatere, at dette afsnit, der skulle give nogle konkrete oplysninger, på mange punkter må blive ret mangelfuldt.

Da man imidlertid, som tidligere nævnt, er henvist til at fremstille facader udfra et delvis subjektivt skøn over materialeegenskaber, er der dog i det følgende gjort forsøg på at opstille en oversigt, hvori der for de forskellige materialer angives dels de egenskaber, der foreligger oplysninger om, og dels en mere subjektiv vurdering af de egenskaber som ikke er udtømmende oplyst.

De kendte materialer kan grupperes i følgende skema:

	TABEL 1		Eksempler
uorganiske materialer	ikke-bærende	løs	løs leca, vermiculite.
		sammenhængende	glasuld, mineraluld, plastic-uld
	bærende	egent. bærende	tegl, moler, letbetoner
		selvbærende	letbetoner, skumplastics
organiske materialer	ikke-bærende	løs	korksmuld
		sammenhængende	halmplader, tangmætter
		egent. bærende	træ
		selvbærende	trældsbeton, kork, fiberplader, papcelleplader

Herudfra er der for en række materialer i tabel 2 foretaget en gennemgang, idet der for de forskellige materialeegenskaber anvendes følgende subjektive vurderingsskala:

- (0) meget lille,
- (1) lille,
- (2) middel,
- (3) stor,
- (4) meget stor.

Hvor en materialeegenskab må skønnes at være uden interesse, er rubrikken overstreget, og hvor der foreligger mere konkrete oplysninger, er disse tillige anført.

Oversigten må naturligvis læses med den alleryderste kritik, men skulle gøre det klart, at i en tid hvor så mange nye materialer dukker frem, må der gøres et virkeligt forskningsarbejde, således at disse materialers egnethed kan påvises. Dette arbejde burde være en nødvendig erstatning for de hundreder af års erfaring, der ligger bag de kendte byggematerialer.

Fabrikanterne burde derfor sætte et arbejde ind på at udfylde rubrikkerne med mere konkrete oplysninger om betydende materialeegenskaber, ligesom de projekterende, ved at interessere sig for disse problemer, vil kunne medvirke til at ethvert materiale benyttes på den rigtige måde.

TABEL 2.	Varmeledningsevne λ	Varmeaccu- mulerings- evne	Fugttransportevne			Fugtaccu- mulerings- evne	Lufttæthed	Volumenbe- standighed	Elastici- tetskoef- ficient	Styrke	Pudsfast- hed, ved- hængning til andre materialer	Modstands- dygtighed mod høje temperatu- rer	Modstands- dygtighed mod råd og kemiske angreb
			Diffusion k_d	Kapillar- sugning k_u	Gennemsv- ningsevne								
Løs leca	λ tør ⁽¹⁾ 0,075	(1)	(4)	(1)	(4)	(1)	(0)	(2)			(3)	(4)	
Vermiculite	λ = 0,08 ved 5 vægt-% fugt ⁽¹⁾	(1)	(4)	(2)	(2)	(2)	(1)	(2)			(2)	(4)	
Granuleret skumplastic	λ tør ⁽⁰⁾ 0,03	(1)	(4)	(1)-(2)	(3)	(1)-(4)	(1)	(2)				(4)	
Mineraluld	λ tør ⁽⁰⁾ 0,03	(1)	(4)	(1)	(3)	(1)	(1)				(3)	(4)	
Plasticuld	λ tør ⁽⁰⁾ 0,025	(1)	(4)	(2)	(2)	(2)	(1)				(0)	(3)	
Tegl	λ tør ⁽²⁾ 0,40	(3)	$k_d \sim 1$ $k_d \sim 2 - 3$ ⁽²⁾	ved 40 % 80 % ⁽²⁾	rel. fugt rel. fugt ⁽⁰⁾	(2)	(4)	(2)	$E \sim 10^5$ ⁽³⁾	$\sigma_T \sim 150$ á 300 kg/cm ² ⁽³⁾	(3)	(4)	(3)
Letbetoner	λ tør ⁽¹⁾ 0,13 á 0,20	(3)	$k_d \sim 2 - 3$ $k_d \sim 7$ ⁽³⁾	ved 30 % 80 % ⁽³⁾	rel. fugt rel. fugt ⁽⁰⁾	(3)	(3)	(2)	$E \sim 10^4$ ⁽²⁾	$\sigma_T = 30$ á 70 kg/cm ² ⁽²⁾	(3)	(3)	(3)
Skumplastics	λ tør ⁽⁰⁾ 0,025	(1)	(1)-(4)	(1)-(3)	(1)	(1)-(4)	(3)-(4)	(2)	(1)	(0)-(1)	(0)-(2)	(0)-(2)	(4)
Halmplader	(1)	(1)	(4)	(2)	(2)	(3)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)	(1)
Træ	λ tør ⁽¹⁾ 0,10	(3)	$k_d \sim 0,1$ $k_d \sim 1,3$ ⁽²⁾	ved 30 % 80 % ⁽³⁾	rel. fugt rel. fugt ⁽⁰⁾	(3)	(4)	(1)	$E \sim 10^5$ ⁽³⁾	$\sigma_T \sim 500$ kg/cm ² ⁽³⁾ ₂	(2)	(1)	(1)
Træuldsbeton	λ tør ⁽¹⁾ 0,07	(1)	(4)	(2)	(2)	(2)	(1)	(2)	(1)	(1)	(2)	(2)	(2)
Fiberplader	λ tør ⁽⁰⁾ 0,05	(1)	$k_d = 1$ á 6 ⁽³⁾	(3)	(0)	(3)	(2)	(2)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)
Kork	λ tør ⁽⁰⁾ 0,04	(2)	$k_d \sim 0,2$ á 0,5 ⁽¹⁾	(2)	(0)	(2)	(3)	(2)	(1)	(1)	(2)	(1)	(2)

Forbindelsesmidler

Ved monolitiske ydervægskonstruktioner fremkommer forbindelsen mellem de enkelte dele som adhæsion ved anvendelse af mørtel uanset om de i opbygningsoversigten henregnes til de homogene eller lagdelte. Elementets bæreevne og stivhed er nøje forbundet med denne adhæsions styrke. Det ligger uden for dette arbejdes omfang at gå nærmere ind på disse problemer.

Ved opdeltede facadeelementer fremkommer forbindelsen mellem enkeltdelene ved "bindere", "stritter" eller andre forbindelsesmidler.

I mange tilfælde rummer disse forbindelsers etablering problemer, og det skal her forsøges rent skematisk at opstille og inddele disse problemer.

På oversigten er givet en opstilling over de vigtigste forbindelsesmidler, inddelt efter, hvorvidt forbindelsesmidlerne er bærende, d.v.s. om de skal overføre vægten fra elementet eller dele af dette samt de herpå virkende kræfter til selve bygningens bærende konstruktion, eller forbindelsesmidlerne er stabiliserende, d.v.s. at de kun har til formål at holde de enkelte elementer eller elementdele på plads i forhold til hinanden.

De bærende forbindelsesmidler er dernæst underopdelt efter vedligeholdelsesmåden, idet dette punkt på grund af forbindelsernes store betydning for elementets sikkerhed og kvalitet indtager en central plads ved materialevalget til forbindelserne.

Underopdelingen af de stabiliserende forbindelser er sket efter, hvorvidt denne stabiliserende virkemåde kun er noget, der er af midlertidig betydning, f. eks. indtil elementet er placeret på sin rette plads i bygningen, eller om virkemåden er af mere permanent karakter.

Ud fra denne opdeling deler de problemer, der knytter sig til forbindelsesmidlerne, sig naturligt i 3 afdelinger.

- a) Generelle problemer, hvad enten forbindelsen er "bærende" eller kun "stabiliserende".
- b) Specielle problemer ved "bærende" forbindelser.
- c) Specielle problemer ved "stabiliserende forbindelser".

a. Generelle problemer.

Temperaturbevægelighed.

Der findes ved alle typer af facadeplader temperaturbevægelser, og disse må kunne optages af konstruktionselementerne, hvilket kræver en vis fjedrende evne hos forbindelserne. Hvor stor denne fjedring skal være, afhænger både af elementstørrelsen og materialet. Et stort element udvider sig mere i absolut mål end et lille for samme temperaturstigning. Ligeledes vil et element af letmetal udvide sig mere end f. eks. et element af stål.

Kuldebroer.

Forbindelsesmidlerne er i reglen gode varmeledere, og da de forbinder ydre og indre skal, vil de danne kuldebroer, se afsnittet pag. 5.51 ff.

Dræning af kondensvand.

Forbindelserne må udformes på en sådan måde, at de ikke hindrer en dræning til det fri af det kondensvand, der dannes i facaden, et problem, der er af særlig stor betydning ved lette facadekonstruktioner.

Montage, justering og efterspænding.

Både de bærende og de stabiliserende forbindelser må udformes sådan, at montagen af facadeelementet bliver den simplest mulige og således, at de ikke hindrer en justering og efterspænding af elementet.

Korrosion.

Det er absolut nødvendigt, at en bærende forbindelse er vejrbestandig. Noget tilsvarende kan fremføres for en stabiliserende forbindelse, der skal være af permanent karakter, men i nogle tilfælde er forbindelsens opgave afsluttet, når elementet er monteret, i så fald behøver forbindelsen ikke at være bestandig, men det er vigtigt, at der ikke sker korrosion af en sådan art, at den kan virke direkte nedbrydende på elementet eller forårsage skæmmende skjolder og pletter på dette. Ved letmetalfacader kan man f. eks. risikere at få dannet et galvanisk element, hvis forbindelsen udføres af et uegnet metal. I betonfacader kan man f. eks. ikke anvende normale Al-legeringer som stritter.

b. Specielle problemer ved "bærende" forbindelser.

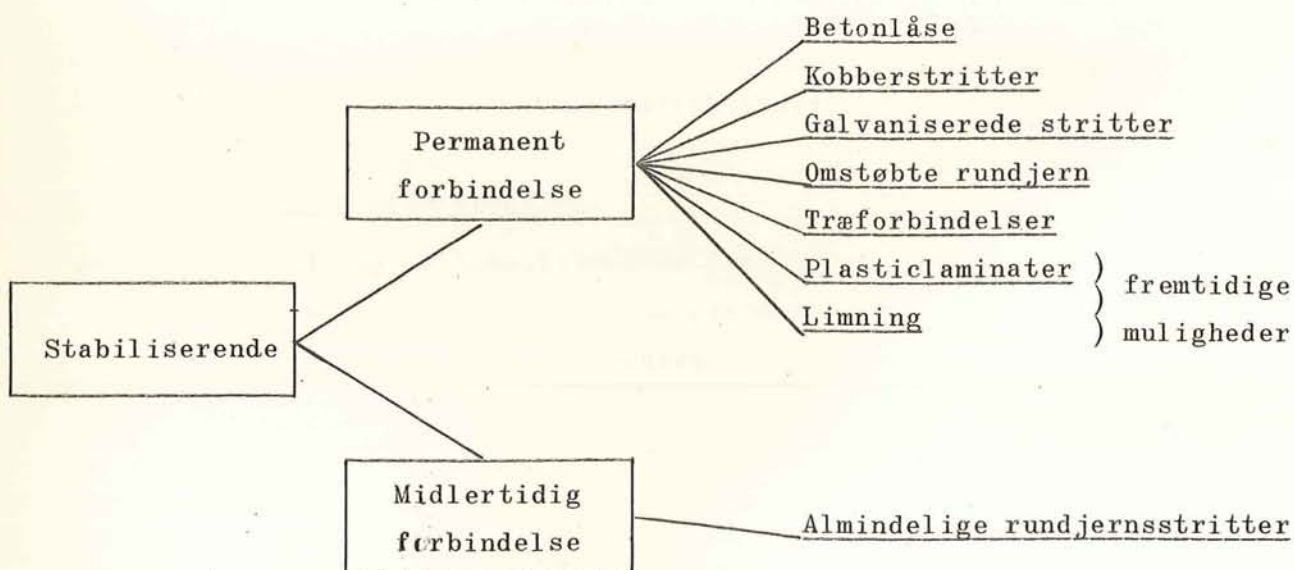
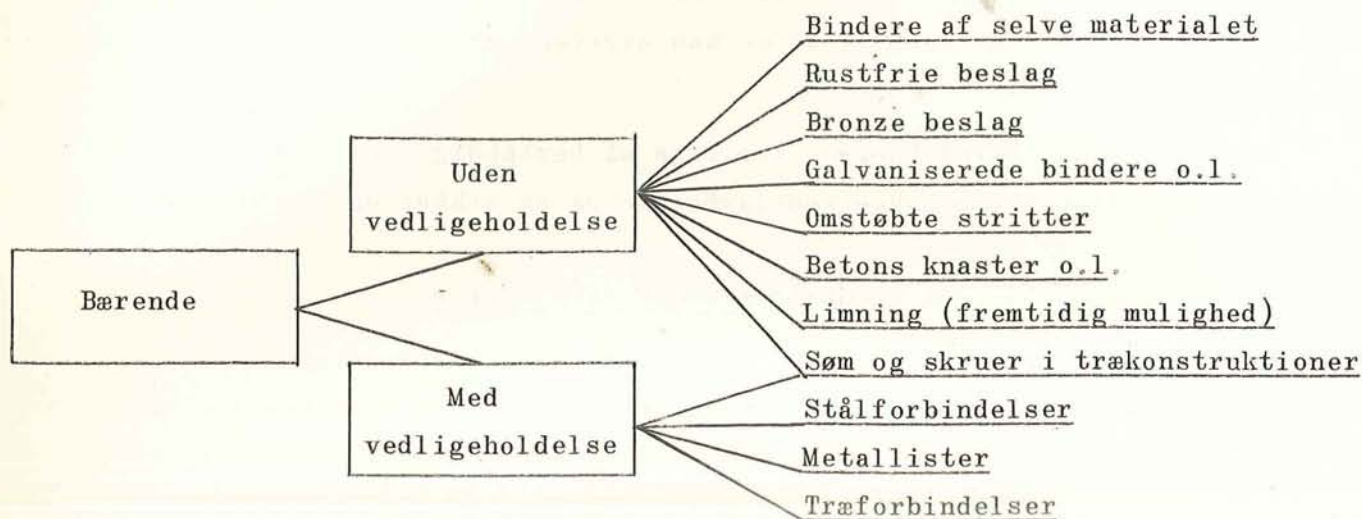
Det er naturligvis en betingelse, at forbindelserne har en sådan styrke, at de kan bære elementets vægt, og at de kan overføre de andre på elementet virkende kræfter.

Endvidere må forbindelserne være lige så bestandige som de øvrige delkomponenter i elementet eller kunne vedligeholdes på en sikker og simpel måde.

c. Specielle problemer ved "stabiliserende" forbindelser.

De konstruktive forhold ved denne form for forbindelse indskrænker sig i det væsentlige til et forlangende om, at sammenhængen mellem de enkelte elementkomponenter er tilstrækkelig stærk. Her er det ikke alene forholdene i det færdige bygværk, der gør sig gældende, men det kan meget vel være et styrkekrav, der er betinget af fabrikation, transport eller montage af elementet.

Drejer det sig om midlertidige forbindelser, kan man vist roligt regne kvaliteten for god nok, når de ovennævnte konstruktive krav er opfyldt.

Oversigt over forbindelsesmidler.

5.

FACADEELEMENTERS
VIRKEMÅDE

Et facadeelements virkemåde afhænger af en række forhold, hvoraf her skal nævnes:

a) Varmetransmissionsmodstand	(pag. 5.03)
b) Vindtæthed	(" 5.05)
c) Vandtæthed	(" 5.07)
d) Fugttransport	(" 5.09)
e) Varmekapacitet	(" 5.49)
f) Fugtkapacitet	(" 5.49)
g) Kuldebroer	(" 5.51)
h) Vejrligets indflydelse	(" 5.101)
j) Brandsikkerhed	(" 5.108)
k) Dekorative virkemåder	(" 5.108)
l) Temperaturbevægelser	(" 5.109)

Udvalget har ved gennemgangen af disse egenskaber især hæftet sig ved de under d), f) og g) nævnte, og disse er behandlet udførligt nedenfor. De øvrige egenskaber vil kun blive kort omtalt for så vidt egenskaben berører selve valget af facadeelementkonstruktion eller konstruktionsmateriale.

a) Varmetransmissionsmodstand

I DIF's regler for beregning af varmetab fra bygninger er angivet λ -værdier for en lang række materialer. Ved anvendelse af disse kan man udregne k -værdien for en ydervæg.

Den således udregnede varmetransmission kan imidlertid meget vel være en del på den usikre side, idet der i facadeelementet kan optræde en række virkninger, som det ikke er muligt at tage hensyn til ved opstilling af sådanne enkle regler.

Når man har at gøre med facadeelementer, må man ved transmissionsberegningen have opmærksomheden henvendt på følgende faktorer:

- 1) Er fugerne ved elementernes samlinger vindtætte ?
- 2) Forøges transmissionen væsentligt på grund af kuldebroer ved betonribber eller ved tilslutninger til vægge og dæk ?
- 3) Er konstruktionen således opbygget, at der er grund til at regne med et lavt fugtighedsindhold i isolationsmaterialet ?

Der tænkes her på foranstaltninger imod indtrængen af slagregn og foranstaltninger til fjernelse af fugtdannelser på grund af dampdiffusionen indefra.

- 4) Er der mulighed for at vinden kan blæse igennem isoleringen ?
- 5) Endelig skal nævnes, at igangværende forsøg synes at tyde på, at der igennem porøse isolationsmaterialer samt ventilerende hulrum kan forekomme en indre termisk luftcirkulation, der nedsætter isolationsevnen mærkbart.

Flere af disse faktorer kan således indvirke på transmissionen i overordentligt høj grad, hvilket i det følgende vil blive nærmere uddybet.

b) Vindtæthed

Det er en betingelse for, at et facadeelement er brugeligt, at det er yderst vindtæt.

Opstår der et overtryk på den ene side af elementet, vil lufttrykket være faldende gennem elementets lag i relation til disses lufttæthed. Den samlede lufttæthed skal være så stor, at gennemstrømningen bliver umærkelig. Selv om dette krav tilfredsstilles, er det imidlertid ikke ligegyldigt, hvorledes lufttrykket varierer igennem facadekonstruktionens lag. Hensynet til slagregnstæthed og til diffusion gør, at man i mange tilfælde er nødsaget til at gøre det ydre lag ret vindutæt.

Dette vil betyde, at vindens pulsationer har mulighed for at nå ind i isoleringen, hvilket kan give anledning til langsgående luftstrømninger gennem grovporøse isolationsmaterialer.

Det er indlysende, at en sådan påvirkning kan nedsætte isoleringsevnen betydeligt. Ligeledes vil en såkaldt "pumpeeffekt" uden egentlig gennemstrømning kunne erstatte den varme luft i isolationsmaterialets porer med kold luft i en sådan grad, at transmissionen påvirkes væsentligt.

Under hensyn hertil kan der være tale om at indskyde et mere vindtæt, men diffusionsutæt lag til beskyttelse af isoleringen.

Facaders virkemåde overfor vind er behandlet udførligt i Norges Bygg-forskningsinstituts rapport nr. 7: Lette treveggers vindtetthed. H. Granum, Svend D. Svendsen og Annanias Tveit.

c) Vandtæthed

Af facadeelementet kræves ikke egentlig vandtæthed over for hydrostatisk vandtryk; derimod skal det være således opbygget, at slagregn ikke trænger ind i konstruktionen, hvor den kan skade isoleringen, endsige trænger igennem facaden som helhed.

Til forståelse af slagregns virkemåde kan henvises til "Driving rain" af Sv. D. Svendsen, hvori der er redegjort for nogle meget indgående undersøgelser foretaget af Norges Bygg-forskningsinstitut. Denne rapport er udførligere refereret under afsnittet om letvægtsfacadeelementer.

Slagregnen virker dels ved vanddråbernes vandrette bevægelse imod facadens yderside og dels derved, at den vind, der er årsag til slagregnen, fremkalder et overtryk.

Dråbernes bevægelsesenergi er imidlertid kun af ganske minimal betydning - den enkelte dråbe vil selv på en ret porøs overflade være standset ved en ganske lille indtrængen bag overfladen. Kun dråber, der direkte rammer huller eller helt åbne fuger vil trænge længere ind; men selv disse dråber vil blive standset meget hurtigt, fordi den drivende kraft fra vinden ikke forekommer inde i konstruktionen.

Forløbet af lufttrykket igennem facaden er derimod af stor betydning, fordi kun en lufttrykforskel er i stand til at drive større vandmængder igennem fuger eller andre utætheder.

Beton og de fleste andre moderne facadebeklædningsmaterialer bliver ved slagregnspåvirkning meget hurtigt mættet med vand på overfladen, hvorefter vandet driver ned ad denne som en sammenhængende vandfilm. På de steder, hvor vandfilmen får forbindelse med en utæthed - nok så lille - vil vandet drives igennem med en kraft svarende til lufttrykforskellen. Findes der større åbninger i beklædningen, er en lufttrykforskel udelukket, og da vil der ikke være betingelser for, at vand drives ind i konstruktionen.

Det med hensyn til slagregnstæthed sikreste konstruktionsprincip vil derfor som regel være: en ydre, vindutæt "regnskærm" og mellem denne og isolationen en "vindskærm", som hindrer pulsationer i isolationslaget.

Det er en udbredt misforståelse, at man kan eftervise en facades slagregns-

tæthed ved påsprøjtning ved hjælp af en vandslange, eller ved en lignende metode. Derved sprøjter man vand gennem beklædningens store utætheder, som netop er til gunst for konstruktionen, mens der fuldstændig mangler luftovertryk til at presse vand gennem fine utætheder, som er de farligste.

FUGTTRANSPORT I YDERVÆGGE

Passage of Moisture through Outer Walls

M. Egeskjold

I N D H O L D S F O R T E G N E L S E

INDLEDNING	5.13
SAMMENDRAG AF GRUNDLÆGGENDE TEORI	5.15
Hygroskopisk fugtighed	5.16
Absorption, adsorption, sorption	5.17
Desorption	5.18
Sorptionsisoterm	5.18
Desorptionsisoterm	5.18
Kapillær hysteres	5.18
Materialets struktur	5.20
Kapillarfordelingsdiagram og kapillær tilbagesugning	5.21
NØDVENDIGE FORUDSÆTNINGER FOR EN FULDSTENDIG UNDERSØGELSE	5.25
EKSEMPLER	5.29
Eksempel 1	5.29
Eksempel 2	5.32
Ventileret hulrum	5.34
Tilstand efter begyndelsesstadiet	5.35
Ikke stationær tilstand	5.39
SAMMENFATNING	5.40
LITTERATURHENVISNINGER	5.41
SUMMARY	5.42

I N D L E D N I N G

Fugtbevægelser i byggematerialer kan ske på følgende måde:

A. Transport af vanddamp.

- 1) under påvirkning af forskelle i vanddampens partialtryk (diffusion).
- 2) under påvirkning af forskelle i det totale lufttryk og deraf følgende luftstrømninger.

B. Transport af frit vand.

- 3) under påvirkning af kapillære kræfter.
- 4) under påvirkning af forskelle i lufttryk og deraf følgende luftstrømninger.
- 5) under påvirkning af tyngdekraften.

De i praksis forekommende vandbevægelser kan ske under samtlige ovennævnte påvirkninger på een gang.

Opgaven er imidlertid at finde frem til et materialekendskab, der gør det muligt at overse konsekvenserne af vandbevægelserne, så man kan træffe de nødvendige og rigtige foranstaltninger imod disse.

Med hensyn til en dyberegående undersøgelse vil vi udskyde et par af ovennævnte virkninger, som er forholdsvis velkendte.

Dette gælder punkt 2 og punkt 4, som har at gøre med vindtæthed og slagregnstæthed; disse egenskaber er behandlet udførligere i de foregående afsnit.

Virkningen 5 kan være vandstrømninger ned ad lodrette overflader, mens det som fugttransporterende faktor i det indre af et materiale kun har væsentlig betydning for materialer med meget åbne porer, og man kan her udnytte denne materialeegenskab til at skaffe eventuelt vand bort ved en afdræning. Det vil dog være nyttigt at have nøjere kendskab til, hvor hurtigt en afstrømning af små vandmængder kan ske igennem de forskellige materialer.

Man må dog gøre sig klart, at ovennævnte 3 virkninger kan have betydning for de to resterende virkninger, som særlig vil blive behandlet her - nemlig

diffusionen og den kapillære transport. F. eks. vil ændringer i fugtighedsindhold og relativt damptryk have en ofte ganske væsentlig indflydelse på diffusionskonstanterne samt på temperatur- og trykforløbet og dermed på forudsætningerne for en idealiseret teoretisk beregning.

For at få hul på problemerne er det imidlertid nødvendigt at udføre en sådan beregning. Denne må derefter suppleres med en bedømmelse af materialer og konstruktion med samtlige 5 virkninger for øje. Jo bedre forudsætninger for beregningen kan fastlægges, med desto større sikkerhed kan man i hvert enkelt tilfælde nå frem til den konstruktion, der er tilstrækkelig god og billigst mulig.

SAMMENDRAG AF GRUNDLÆGGENDE TEORI

Fugtighedsvandringer ved diffusion og ved kapillærsugning kan behandles teoretisk, når følgende materialeegenskaber og grundbegreber fastlægges:

For diffusion:

Damptryk p mm Hg er partialtrykket af den i luften indeholdte vanddamp.

Diffusionstallet K_d $g/m^2 \cdot h$ mm Hg for en væg er den mængde vanddamp, målt i g, som i løbet af en time passerer gennem $1 m^2$ af væggen, når forskellen mellem de partielle damptryk på de 2 sider er 1 mm Hg.

Diffusionsmodstanden $M_d = \frac{1}{K_d}$.

Diffusionstallet k_d $g \text{ cm}/m^2 \cdot h$ mm Hg for et materiale er den mængde vanddamp, målt i g, som i løbet af en time passerer gennem $1 m^2$ af et 1 cm tykt lag af materialet, når forskellen mellem de partielle damptryk på de to flader er 1 mm Hg.

Overgangstallet k'_d $g/m^2 \cdot h$ mm Hg for en overflade eller en hinde er den dampmængde, målt i g, som i løbet af en time passerer gennem $1 m^2$ af overfladen eller hinden, når damptrykket har et spring på 1 mm Hg.

Diffusionsmodstanden m_d for et homogent lag af tykkelsen e cm og diffusionstallet k_d er $m_d = \frac{e}{k_d}$.

For overflader eller tynde hinder med overgangstal k'_d er tilsvarende $m_d = \frac{1}{k'_d}$.

Ovenstående definitioner svarer ganske til definitioner ved varmetransmissionsberegninger. Ved beregningen af diffusionen gælder da også ganske analoge love:

For en væg sammensat af lag af tykkelserne e_1, e_2, \dots cm med diffusionstallene k_{d1}, k_{d2}, \dots cm samt et antal tynde hinder eller overflader med overgangstallene k'_{d1}, k'_{d2}, \dots cm har man:

$$\frac{1}{K_d} = M_d = \sum \frac{e}{k_d} + \sum \frac{1}{k'_d} = \sum m_d$$

Er det totale trykfald gennem væggen ΔP , transporteres en vanddampmængde:

$$V_d = K_d \cdot \Delta P \text{ g}/m^2 \cdot h$$

Damptrykkurven $p = f(x)$ bestemmes af:

$$V_d = -K_d \cdot \frac{dp}{dx} \text{ g}/m^2 \cdot h \quad (1)$$

hvorved man kan bestemme trykfaldet Δp gennem et homogent lag med diffusionsmod-

standstallet m_{dl} af:

$$\Delta p = \sum \frac{m_{dl}}{m_d} \cdot \Delta P \text{ mm Hg}$$

og damptrykkurven kan optegnes efter successiv beregning.

For kapillær sugning kan opstilles analoge love, og man har:

Relativ fugtighed u % for et materiale angiver vægtmængden af frit vand i materialet i % af tørvægten.

Kapillarsugningstallet k_u g cm/m² · h % for et materiale er den mængde vand, målt i g, som i løbet af en time passerer gennem 1 m² af et 1 cm tykt lag af materialet, når forskellen mellem de relative fugtigheder af materialet i de 2 flader er 1 %.

Kapillarsugningsmodstanden m_u for et e cm tykt lag af et materiale er:

$$m_u = \frac{e}{k_u}$$

For den ved kapillær sugning transporterede vandmængde har man:

$$V_u = -k_u \cdot \frac{du}{dx} \text{ g/m}^2 \text{ h.} \quad (2)$$

Den samlede fugtighedstransport bliver herefter:

$$V = V_d + V_u \text{ g/m}^2 \cdot \text{h} \quad (3)$$

og betydningen af de to led afhænger af materialets struktur og den relative luftfugtighed.

Det kan imidlertid i praksis være svært at afgøre hvor stor andel hver af leddene har i den samlede fugtighedstransport, hvorfor det er vanskeligt at udføre nogen rigtig pålidelig bestemmelse af transportfaktorerne k_d og k_u .

Dette forstås ved i de følgende afsnit at se lidt nærmere på, hvorledes fugtoptagelsen i et materiales mikroskopiske porer foregår.

HYGROSKOPISK FUGTIGHED

Det vand der findes i et materiales kapillarrør er bundet til materialets overflader i røret med kræfter, der er større jo mindre rørdiametren er. Det vil sige, at der her kan dannes og forefindes vand i stabil tilstand selv om damptrykket i den omgivende luft er lavere end mætningstrykket.

Der kan udregnes følgende afhængighed mellem kapillær radie og den relative luftfugtighed, ved hvilken vanddampen kondenserer i kapillarrøret:

TABEL 1		
Kapillær radie mm	Relativ luftfugtighed i %	
	ved 20° C	ved 0° C
10^{-3}	99,9	99,9
10^{-4}	99	99
10^{-5}	90	89
10^{-6}	35	31
$0,38 \cdot 10^{-6}$	5	3

Til sammenligning kan anføres, at vandmolekylets diameter er af størrelsesordenen 10^{-7} mm.

Ved luftfugtigheder lavere end mætningstrykket vil dette vand altså kunne transporteres ved kapillær sugning.

ABSORPTION, ADSORPTION, SORPTION

Den overfor omtalte optagelse af vand i kapillarporer må for de større porers vedkommende karakteriseres som en adsorption af vand til porernes indre overflader, mens den for de fineste porer, der nærmer sig molekyledimensioner snarere må karakteriseres som absorption (d.v.s. optagelse i selve molekylestrukturen).

Da det er vanskeligt at definere nogen klar grænse mellem disse fænomener kaldes optagelsen af vand i materialets porer, store som små, - med en fælles betegnelse for sorption.

Anbringes et absolut tørt materiale i luft af en bestemt relativ fugtighedsprocent, vil der således efterhånden sorberes vand i de af materialets porer, der har mindre radier end angivet for denne fugtighedsprocent i tabellen ovenfor.

Optagelsen af fugt vil i begyndelsen ske relativt hurtigt, men derefter med stadig aftagende hastighed, således at ligevægt først indtræffer efter meget lang tid - i mange tilfælde vil det dreje sig om flere år.

Det er derfor praktisk talt uoverkommeligt for et materiale at foretage en helt korrekt undersøgelse af sammenhængen mellem relativ luftfugtighed og sorption.

DESORPTION

Ændres den relative fugtighed fra en højere til en lavere værdi vil materialet afgive vand fra sine porer og nærme sig en ny ligevægtstilstand med mindre fugtighedsindhold. Denne proces kaldes desorption. På samme måde vil i dette tilfælde den fuldstændige ligevægt almindeligvis først opnås efter uhyre lang tid.

SORPTIONSISOTERM

Udføres et forsøg med et tørt materiale, der ved konstant temperatur udsættes for luft af efterhånden tiltagende relativ fugtighed, og måles de tilsvarende materialefugtigheder siger man, at man har bestemt materialets sorptionsisoterm. Denne kan optegnes i et diagram som vist på fig. 1.

Ifølge de foregående betragtninger er kurven imidlertid stærkt afhængig af den hastighed hvormed forsøget udføres.

DESORPTIONSISOTERM

På tilsvarende måde kan der udføres forsøg med et fugtigt materiale, for hvilket fugtighedsindholdet bestemmes efterhånden som luftens relative fugtighed aftager ligeledes under konstant temperatur. Derved siger man at have bestemt materialets desorptionsisoterm.

KAPILLÆR HYSTERESE

Sorptions- og desorptionsisoternerne vil almindeligvis ikke være sammenfaldende alene af den grund, at det er praktisk taget umuligt at tage den tid til forsøgene, som er nødvendig for at der bliver fuldstændig ligevægt ved hver enkelt måling.

De 2 kurver siges at danne en hysterese-sløjfe, og man kalder fænomenet for kapillær hysteresese. Hysterese-sløjfen bliver større jo hurtigere forsøget gennemføres.

Selv om forsøget tænkes gennemført så langsomt at ligevægt opnås for hver enkelt aflæsning, menes der at blive en vis hysteresese tilbage. Dette forklares ud fra følgende betragtning (se fig. 2).

I et materiale betragtes en enkelt pore som skitseret. Ved stigende relativ luftfugtighed vil der sorberes en vandhinde af voksende tykkelse på porens vægge.

Ved fugtighedsprocenten φ_1 er tykkelsen blevet så stor, at vandhinderne når sammen på porens smalleste sted. Derved løber hinderne sammen og danner en menisken, og yderligere sorption sker på meniskens overflade til delvis fyldning af poren.

Aftager derefter den relative fugtighed, sker der en desorption ved fordampning fra meniskens overflade. Menisken vil imidlertid ikke brydes ved φ_1 - der skal ske en yderligere udtørring til en relativ fugtighedsprocent φ_2 inden kontakten mellem vandhinderne brydes.

FIG. 1.

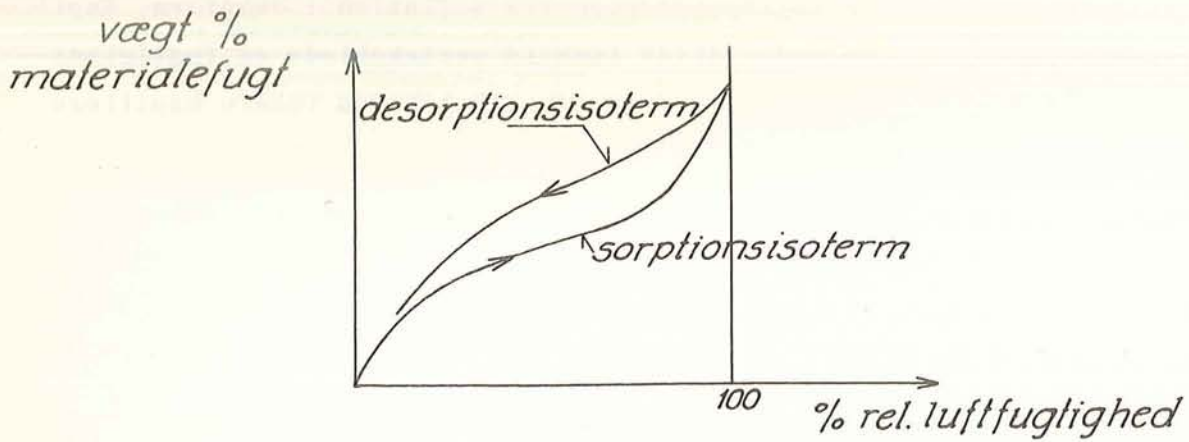
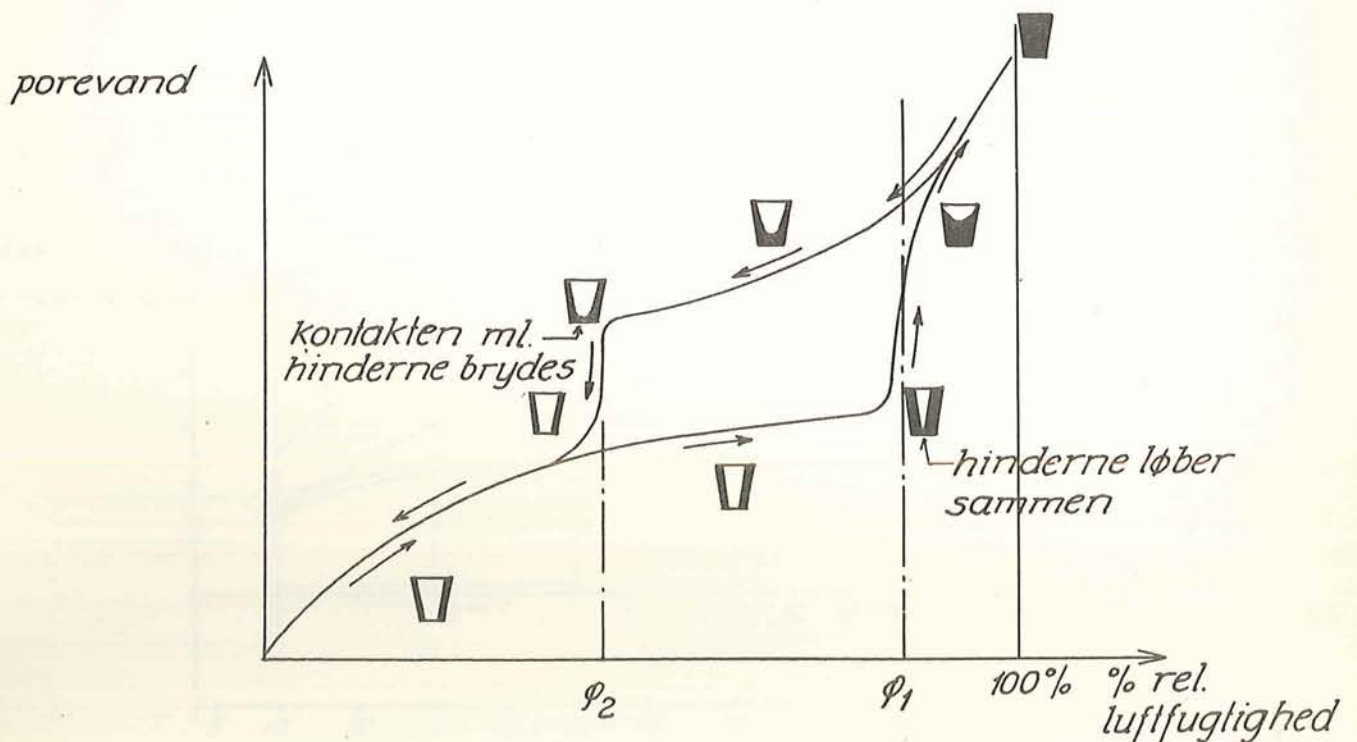


FIG. 2.



MATERIALETS STRUKTUR

Det er et spørgsmål om materialets struktur, om den kapillære sugning ved lavere fugtighedsprocenter overhovedet kan komme i gang.

Herom angiver Carl Munters i tidsskrift VVS, nr. 2 og 3, 1950, følgende:

"Har vi at gøre med et materiale, som indeholder større porer forbundet gennem kapillærer af mindre størrelsesorden, bliver ved lavere relativ luftfugtighed kun kapillærer med mindre radie vandfyldte. Fugtighedstransporten kan da ikke ske ved kapillær sugning gennem materialet i sin helhed i form af sammenhængende vædskerør, men kun lokalt i de fine kapillærer fra en pore til en anden. Gennem de større luftfyldte porer sker fugttransporten ved diffusion i dampform. Kapillær sugning og dampdiffusion er under disse forhold seriekoblede og fugtighedstransporten bestemmes alene af $\frac{dp}{dx}$. Derimod påvirkes k_d af den lokale kapillære sugning således, at den øges med voksende relativ luftfugtighed".

Ved den lokale kapillære sugning må forstås den vandstrømning, der sker i den enkelte vandfyldte pore, der forbinder to luftfyldte porer, når der ved diffusion modtages vandmolekyler i den ene overflade og afgives vandmolekyler fra den anden overflade. Denne strømning sker formentlig med en hastighed, der er langt større end diffusionen.

I materialer af denne karakter, vil der først når luften når mætningspunktet, og der forekommer egentlig kondensation, hvorved også de store porer bliver vandfyldte, komme en kapillær sugning i gang.

Fugtighedstransporten ved relativ luftfugtighedsprocent lavere end 100 % (kaldet diffusion) består således i virkeligheden af følgende 2 virkninger:

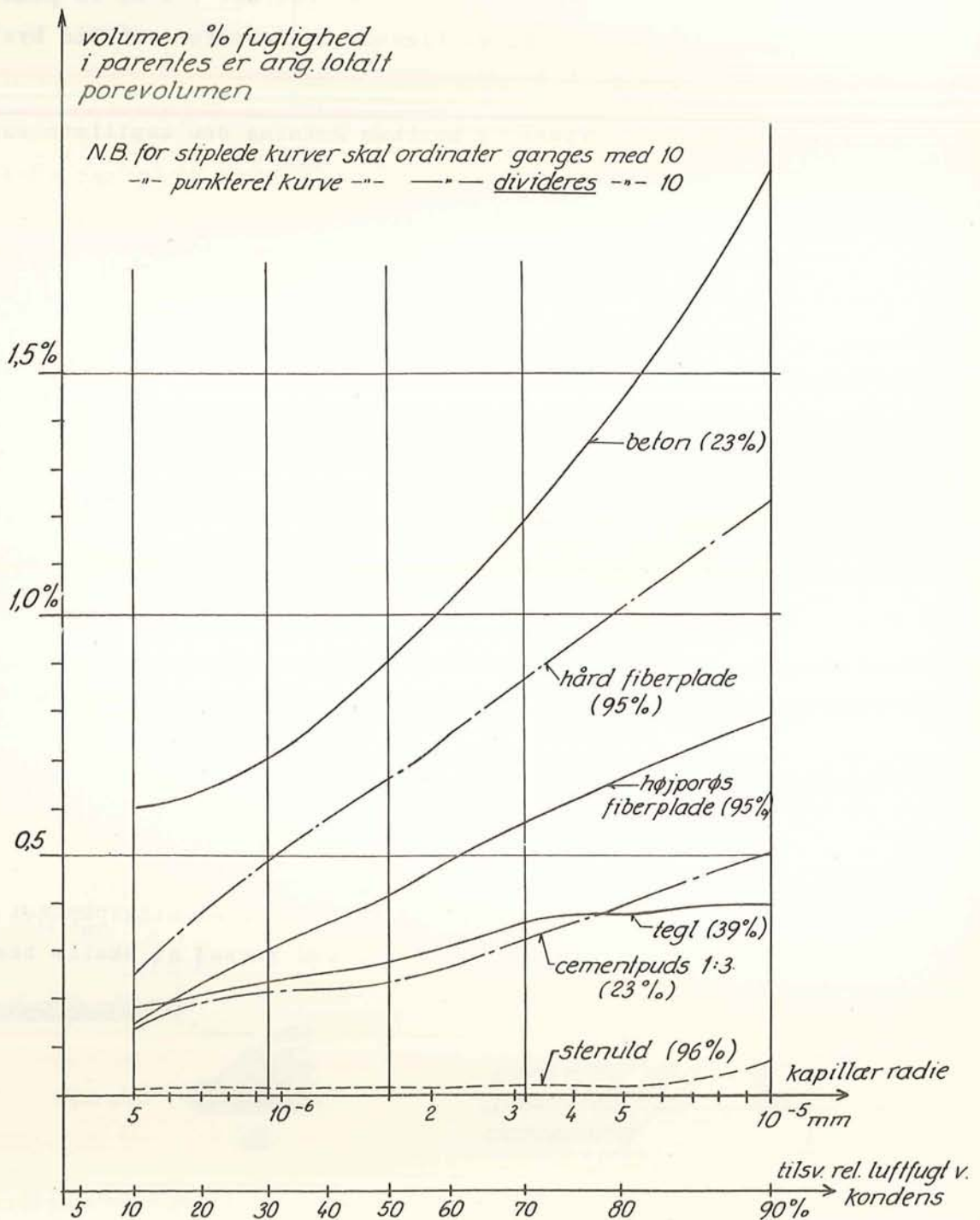
- 1) seriekoblet diffusion og strømning i enkeltporer,
- 2) kapillær transport af hygroskopisk fugtighed.

Ud fra kendskabet til et materiales struktur vil man kunne anstille betragtninger over, under hvilke forhold henholdsvis diffusionen og den kapillære sugning vil være dominerende.

KAPILLARFORDELINGSDIAGRAM OG KAPILLÆR TILBAGESUGNING

En nærmere undersøgelse af fordelingen af de kapillære porer i et materiale kan f. eks. tænkes afbildet ved et kapillarfordelingsdiagram som vist på fig. 3. Man afsætter som abscisse (log. målestok) den kapillære radie og som ordinat den del af porevolumenet, der udgøres af porer med mindre radier.

FIG. 3. KAPILLARFORDELINGSDIAGRAM.



Til enhver relativ luftfugtighed svarer en maksimal radius for de porer, der binder vand, og ordinaten på diagrammet er da et mål for den hygroskopisk bundne vandmængde, d.v.s. de tilsvarende relative luftfugtigheder kan passende afsættes på abscissen sammen med kapillarradierne.

Et sådant diagram kan således bestemmes ud fra materialets sorptionsisoterm. Kurverne på fig. 3 er bestemt på denne måde. Man bemærker, at ved 90 % relativ fugtighed er for cementpuds 22 % af det samlede porevolumen vandfyldt. De tilsvarende tal er for beton 8,3 %, for hård fiberplade 50 %, for porøs fiberplade 0,9 %, for tegl 1 %, for stenuld 0,007 %.

Der gøres opmærksom på, at de viste kurver er bestemt ved så få punkter, at det kan tænkes, at der forekommer spring, ligesom den ovenfor omtalte hysteresevirkning giver nogen usikkerhed.

Ud fra diagrammet kan man afgøre, i hvilken retning den kapillære sugning vil gå.

Er kurven stejl på et stykke, vil det sige, at man indenfor det tilsvarende interval af relativ fugtighed vil få en kraftig stigning i mængden af hygroskopisk vand. Hvis således damptrykkurven konvergerer med mætningskurven, d.v.s. $\frac{p}{p_m}$ vokser (se fig. 4), vil der i dette område være stigende hygroskopisk vandindhold efterhånden som damptrykket aftager, og der vil altså blive en kapillær sugning, der er modsat rettet diffusionen (kapillær tilbagesugning). Hældningen for kapillarfordelingskurven i det pågældende luftfugtighedsinterval er altså et mål for $\frac{du}{dx}$, som jo er den drivende kraft for kapillarsugningen. Omvendt vil kapillær sugning gå i samme retning som diffusionen, når damptrykkurven divergerer fra mætningskurven.

På fig. 4 er vist, hvilken indflydelse på kapillarsugningen en aftrapning af kapillarfordelingskurven vil have. Det vand, der transporteres ved kapillær tilbagesugning, vil ved bevægelsen imod det varmere område efterhånden påny afgives ved fordampning under optagelse af varme indtil en stationær tilstand med ændret temperatur- og trykkurve opstår. Denne virkning er vist ved en punkteret linie på fig. 4.

Transporten af hygroskopisk vand ved damptryk under mætningspunktet har som tidligere nævnt betydning, når man står over for ved forsøg at skulle bestemme diffusionskonstanterne.

FIG. 4. HYGROSKOPISK TRANSPORT VED DAMPTRYK UNDER MÆTNINGSPUNKT.

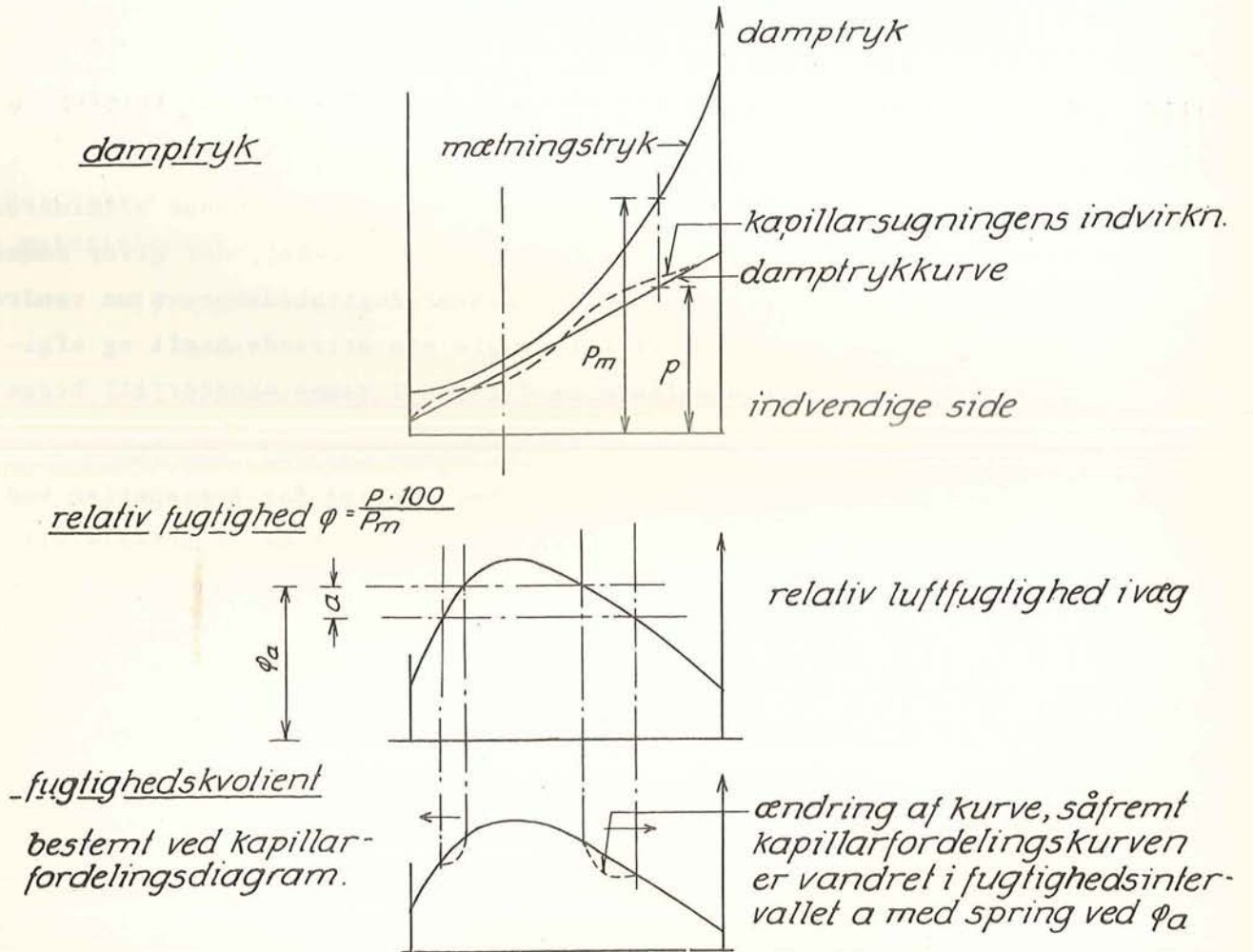
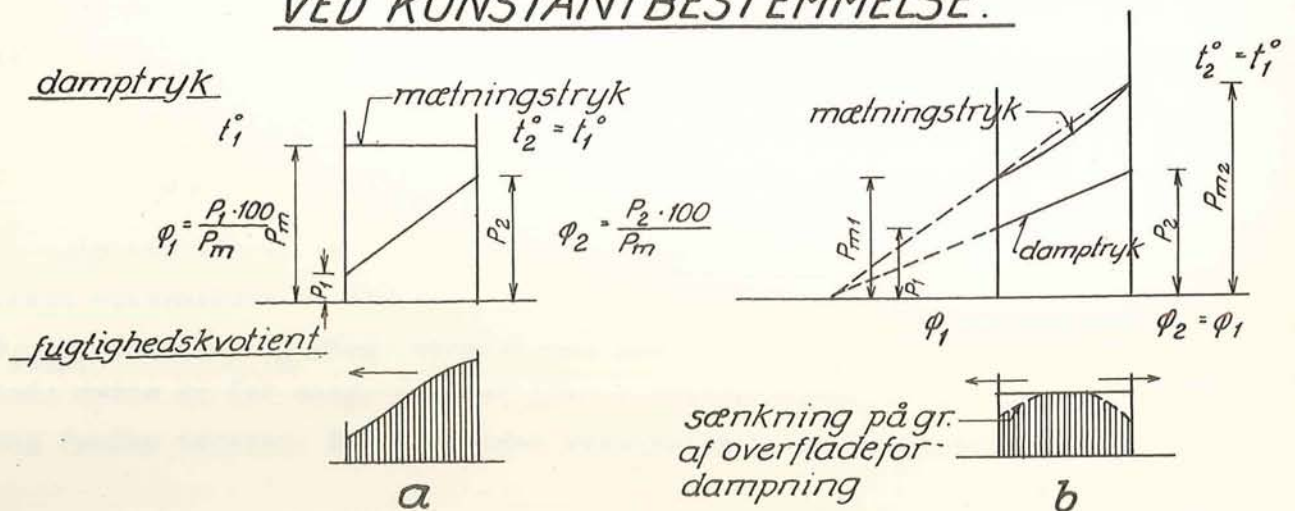


FIG. 5. KAPILLARSUGNINGENS INDFLYDELSE VED KONSTANTBESTEMMELSE.



Måler man således - som vist på fig. 5 a - diffusionen gennem et materiale, hvor der på to sider hersker samme temperatur, mens der er en damptrykforskel, bliver kurven for de mættede dampes tryk en vandret linie, og damptrykkurven vil divergere stærkere fra denne, jo større damptrykforskel der er mellem de to sider. Der vil derved - som vist - til diffusionen komme et tillæg hidrørende fra kapillær sugning. Tillæget vil vokse med stigende forskel i relativ luftfugtighed.

Den kapillære sugnings indflydelse må i hvert fald delvis kunne elimineres, hvis man - som vist på fig. 5 b - skaffer en temperaturforskelle, der giver samme relative luftfugtighed på begge sider. Derved bliver fugtighedskurven en vandret linie, og transporten inde i materialet vil mangle sin drivende kraft og afgivelsen af hygroskopisk vand fra overfladerne vil ske i samme mængder til begge sider.

Forsøgsbetingelser som i fig. 5 a - med samme retning for transporten ved diffusion og kapillær transport - har været almindelig anvendt. I praksis vil - som det fremgår af de senere gennemregnede eksempler - kapillarsugningen næsten altid være modsat rettet diffusionen. Der er således grund til at formodé, at de ved tidligere forsøg målte diffusionskonstanter i mange tilfælde er større end de diffusionskonstanter, der vil have betydning i praksis.

Ved en konstantbestemmelse under betingelser som vist i fig. 5 b vil kun indflydelsen af den tidligere omtalte seriekobling være tilbage. Dennes indflydelse, som for de fleste materialer giver en stærk afhængighed af den relative luftfugtighed φ_1 , er det imidlertid af mindre interesse at udskille, blot må det understreges, at k_d altid bør opgives som en kurve, hvoraf afhængigheden fremgår.

Forekommer der dampmætning og egentlig kondensation, vil der forekomme kapillarsugning af en mere direkte betydende karakter. For kapillær tilbagesugning gælder da samme betragtninger som ovenfor, at vandet ved benævnelsen mod det varme område efterhånden fordamper - hæver damptrykket og diffunderer udefter til fornyet kondensation.

NØDVENDIGE FORUDSÆTNINGER FOR EN FULDSTÆNDIG UNDERSØGELSE

For at kunne foretage en tilfredsstillende teoretisk behandling af en vægkonstruktion, er det iflg. det foregående nødvendigt at have kendskab til følgende materialekonstanter:

- 1) hygroskopisk bundne vandmængder ved forskellige relative luftfugtigheder.
- 2) diffusionstal k_d ved forskellige relative luftfugtigheder.
- 3) kapillarsugningstal k_u .
- 4) varmeledningstal ved forskellige relative materialefugtigheder.
- 5) afstrømningshastigheder ved forskellige relative materialefugtigheder.

Om 1) og 4) foreligger der ret gode oplysninger, om punkt 2) ret sparsomme og noget divergerende oplysninger, og om punkterne 3) og 5) ingen oplysninger. I tabel 2 er samlet nogle af disse oplysninger for de almindeligste bygningsmaterialer.

Hofbauer angiver følgende udtryk for k_d :

$$k_d = \frac{D''}{\mu \varphi} \cdot \frac{1}{RT} \cdot \frac{P_{\text{total}}}{P_{\text{total}} - P_{\text{damp}}}$$

hvor

D'' er diffusionstallet for vanddamp i luft.

R gaskonstanten for vanddamp.

T vanddampens absolutte temperatur.

P_{total} totaltryk for luft + vanddamp.

P_{damp} vanddampens partialtryk.

$\mu \varphi$ er diffusionsmodstandsfaktor for materialet.

$\mu \varphi$ angives at være afhængig af materialets relative fugtighed, og der gives ingen oplysninger om størrelsesordenen. Da P_{damp} som regel er lille i forhold til P_{total} påvirkes k_d iflg. ovenstående kun i ringe grad af luftens relative fugtighed; dette er for mange stoffer ikke i overensstemmelse med de ved hidtidige forsøg fundne værdier. Dette skyldes sandsynligvis at de værdier, der er bestemt ved

forsøg, i højere eller mindre grad kan indeholde tillæg fra den kapillære sugning.

Iøvrigt gælder for alle værdierne undtagen Suensons og Munters og en del af Bäckströms, at det ikke er opgivet for hvilke relative fugtighedsprocenter de er fundet. De opgivne fugtighedsprocenter er da målt som middeltal af to ret forskellige værdier på prøvens to sider.

Selv med nøje kendskab til ovennævnte materialeegenskaber vil en teoretisk behandling af fugtighedsvandringen kun kunne udføres under idealiserende forudsætninger.

Det er dog givet, at man med nøjagtigere oplysninger vil have et uvurderligt middel i hænde til vejledning ved udformningen af en rigtig og rationel facadekonstruktion.

TABEL 2.

Materiale	Vægtprocent hygroskopisk fugtighed		Varmeledningstal λ kcal/m ² · h · °C				Diffusionstal k_d g cm/m ² h mm Hg (i parantes er angivet rel. luftfugtighedsprocent)						
	ved 30 % relativ luftfugtighed	ved 90 % relativ luftfugtighed	Laboratorier	tillæg ved rel. luftfugtighed		tillæg vandmættet	Iflg. Ingeniørhandboken	Iflg. ASRE Data Book	Iflg. Carl Munters tidsskrift VVS, nr. 2 og 3, 1950	Iflg. Hofbauer Warmetechnik 1954, nr. 8	Iflg. Bäckström Kylteknikeren	Iflg. K.Egner	Iflg. E. Suenson
				30 %	90 %								
Tegl, rumvægt 1600	0,15	0,25	0,40				rumv. 1800 1 á 3	2,22	1,0 (40 %) 2,1 (80 %)	1,2 á 2,04			1 á 2
Tegl, rumvægt 1200	0,32	0,60	0,30				rumv. 1800 1 á 3		1,15 (40 %) 1,6 (55 %)				
Beton	0,35	0,95	0,70			100 %	0,1 á 1,0	1,74	0,08 (45 %) 0,35 (80 %)	1,68	0,217 (1:2:4)		0,112 (28 %) 0,33 (68 %)
Cement puds	1,1	2,50	0,70			70 %	0,5 á 1,0		0,12 (35 %) 0,30 (75 %)		0,49 (72 %)		0,18 (28 %) 0,50 (68 %)
Kalkpuds	0,4	0,95	0,40				0,5 á 1,0		0,25 (35 %) 0,85 (75 %)	bastard	1,32 (72 %)	0,77	0,14 (68 %)
Gibs	0	1,80	0,36	0,05 %	15 %	130 %		0,15				1,23	
Siporex	2,7	3,80	0,15						2,7 (42 %) 6,3 (70 %)	skum- beton	5,25		5,0
Gasbeton	3,0	8,0	0,15				3 á 6		2,7 (42 %) 6,3 (70 %)	skum- beton	5,25		5,0
Træbeton	5 á 7	8 á 21	0,07										
Træ (fyr)	6,5	18,0	0,09			550 %	0,5 á 0,1	0,064 á 0,075	0,2 (40 %) 1,3 (80 %)	↓ fibre	0,102 á 0,125		0,05 á 0,1
Træfiberplade, blød			0,04					1,35 á 2,04	2,0 (55 %) 8,5 (80 %)		3,15 á 3,95	1,82 (66 %)	1,03 (28 %) 1,84 (68 %)
Træfiberplade, halvhard	4,1	8,7	0,066	12 %	35 %	1150 %		1,35 á 2,04	1,0 (35 %) 1,9 (75 %)		1,0		
Træfiberplade, hard	3,8	8,2	0,12	12 %	35 %	1150 %	0,05 á 0,1		0,05 (35 %) 0,08 (75 %)		0,168	0,052 á 0,07 (67 %)	0,044 0,058 (28 %) 0,075 (68 %)
Glasuld	0,01 á 0,45	0,07 á 1,0	0,030										
Mineraluld	0,01 á 0,45	0,07 á 1,0	0,030						7,4 (40 %) 7,4 (70 %)		pr. 1,71 á 2,85 alm. ($\varphi = 68\%$) 7,5		8
Kork	1,1	2,3	0,033	5 %	13 %	300 %		0,17			0,625	0,15	
Luft	0	0	0,02				8 á 10						
Betonklinker, løse			0,07										
Asfaltering, 0,025 mm							< 0,02				0,014		
Aluminiumsfolie							< 0,02				0,0007		
Kraftpapir							0,2 á 1,0		2,16		(0,1 mm) 2,10 (49 g/m ²) 3,95		
Asfaltimprægneret pap							0,1 á 0,2				0,11		
Avispapir							4 á 6				5,8		

E K S E M P L E R

I det følgende er ved 2 eksempler vist, hvorledes bestemmelsen af temperatur og damptrykkurver foretages, og hvorledes man kan drage slutninger ud fra sådanne undersøgelser.

EKSEMPEL 1 (se fig. 6)

Temperatur:

$$M = \frac{1}{k} = 0,05 + \frac{0,08}{1,8} + \frac{0,05}{0,04} + \frac{0,02}{1,2} + 0,15 = 0,05 + 0,0445 + 1,25 + 0,0165 + 0,15 = 1,511 = \frac{1}{0,662}$$

$$\Delta T = 30^{\circ}; \quad k \cdot \Delta T = 30 \cdot 0,662 = 19,9$$

$$\begin{aligned} t_1 &= -10 + 19,9 \cdot 0,05 = -10 + 1,0 = -9,0 \\ t_2 &= -9,0 + 19,9 \cdot 0,0445 = -9 + 0,9 = -8,1 \\ t_3 &= -8,1 + 19,9 \cdot 1,25 = -8,1 + 24,9 = +16,8 \\ t_4 &= 16,8 + 19,9 \cdot 0,0165 = 16,8 + 0,3 = 17,1 \\ t_i &= 17,1 + 19,9 \cdot 0,15 = 17,1 + 2,9 = 20,0 \end{aligned}$$

Tryk:

$$M_d = \frac{1}{k_d} = \frac{8}{0,3} + \frac{5}{7} + \frac{2}{0,15} = 26,70 + 0,71 + 13,32 = 40,73 = \frac{1}{0,0246}$$

$$\Delta P = 9,3 \text{ mm Hg}; \quad k_d \cdot \Delta P = 0,0246 \cdot 9,3 = 0,229 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$p_1 = \quad \quad \quad = 1,1 \text{ mm Hg}$$

$$p_2 = 1,1 + 26,7 \cdot 0,229 = 1,1 + 6,1 = 7,2 \quad "$$

$$p_3 = 7,2 + 0,71 \cdot 0,229 = 7,2 + 0,16 = 7,36 \quad "$$

$$p_4 = 7,36 + 13,32 \cdot 0,229 = 7,36 + 3,04 = 10,4 \quad "$$

Kurverne for det beregnede damptryk samt for mættede dampes tryk ved samme temperaturer er indtegnet på fig. 7, og det ses, at der ved punkt A indtræder mætning, hvorfor der fra A til B vil afgives frit vand samtidig med at damptrykkurven vil følge mætningskurven.

FIG. 6. SKITSE TIL EKS. 1.

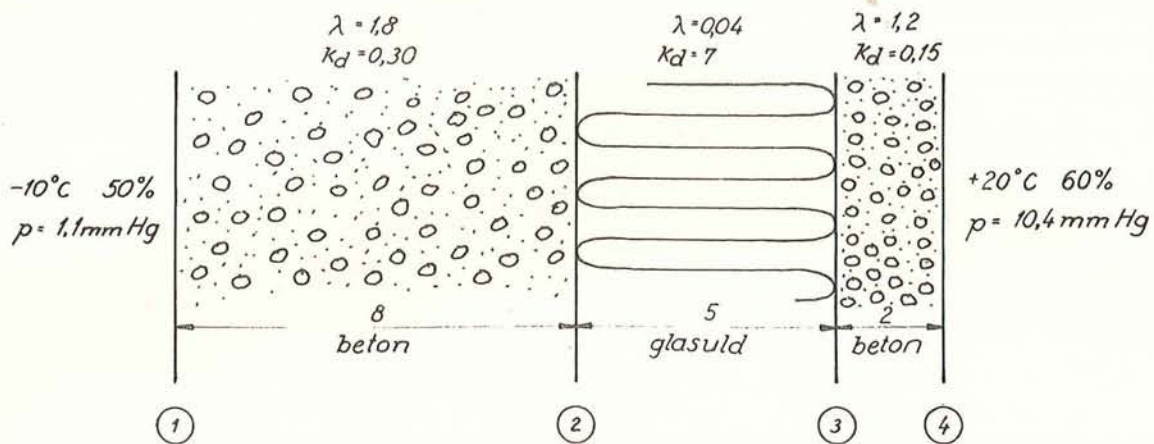
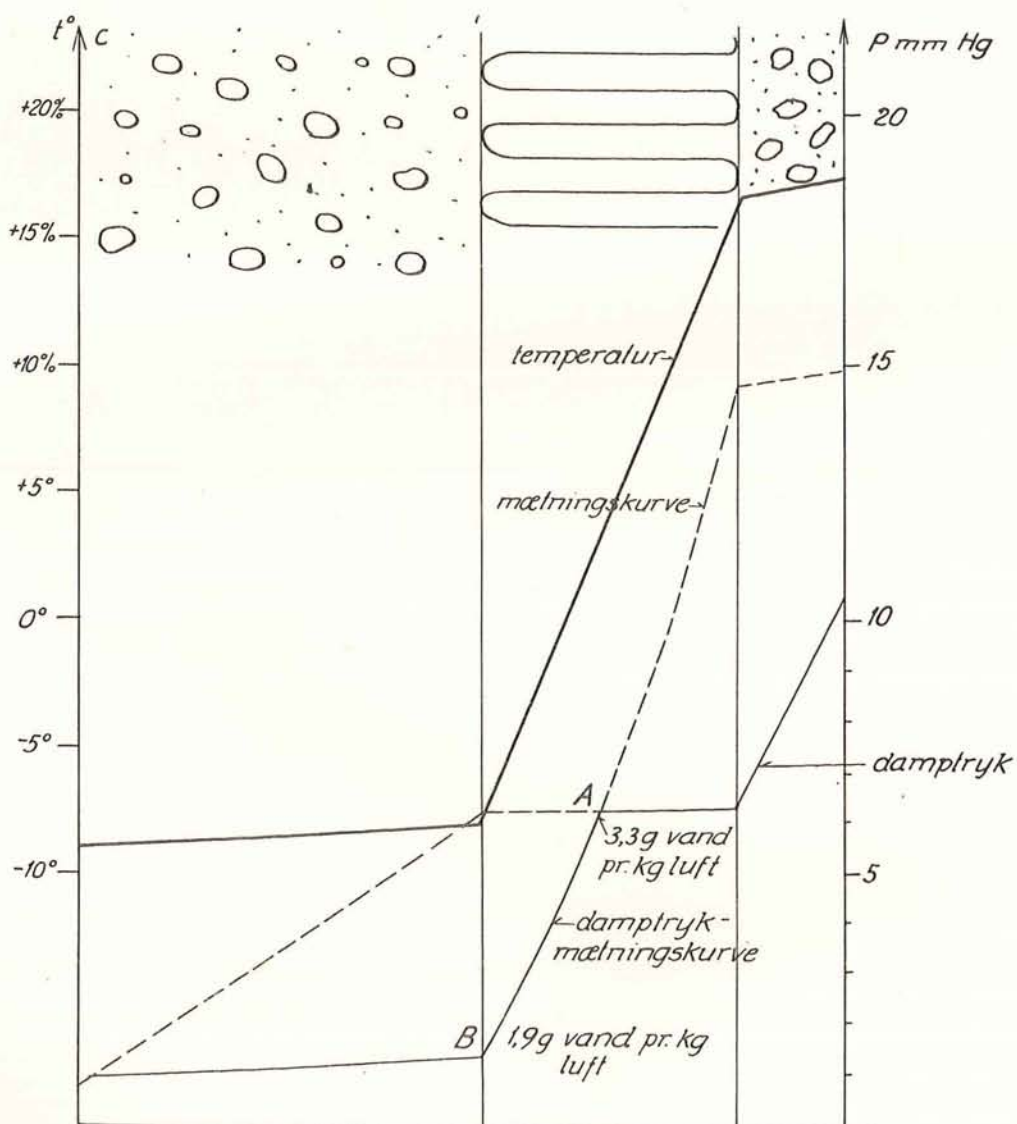


FIG. 7. DIAGRAM FOR EKS. 1



På strækningen A-B afgives: $100 \frac{3,3-1,9}{3,3} = 42,5\%$ af den gennemstrømmende damp d.v.s. $42,5\%$ af $0,229 = 0,097 \text{ g/m}^2 \text{ pr. time}$

FIG. 8. SKITSE TIL EKS. 2.

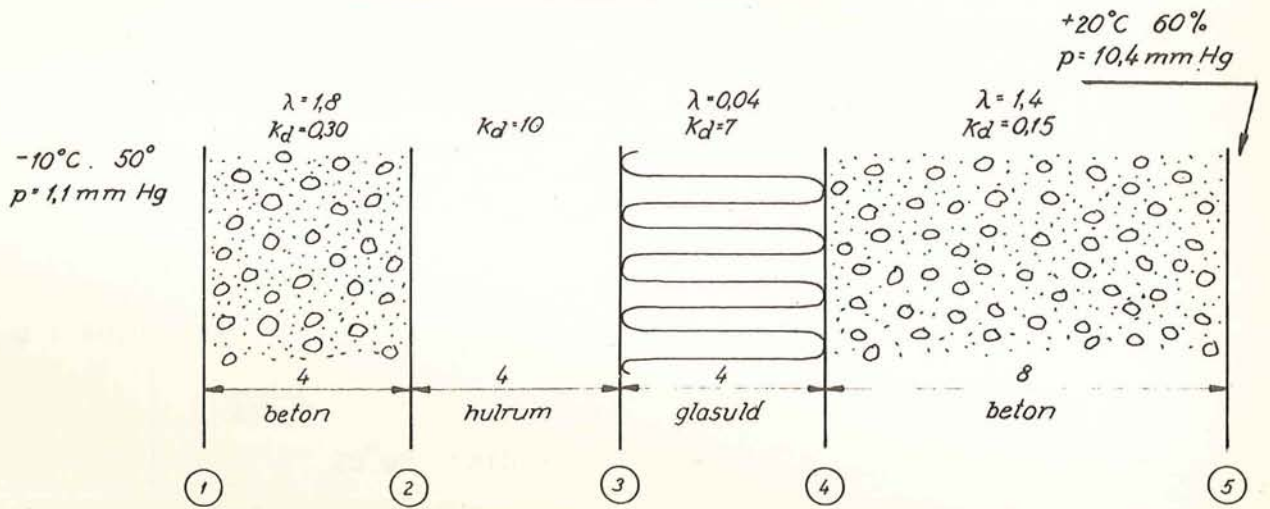
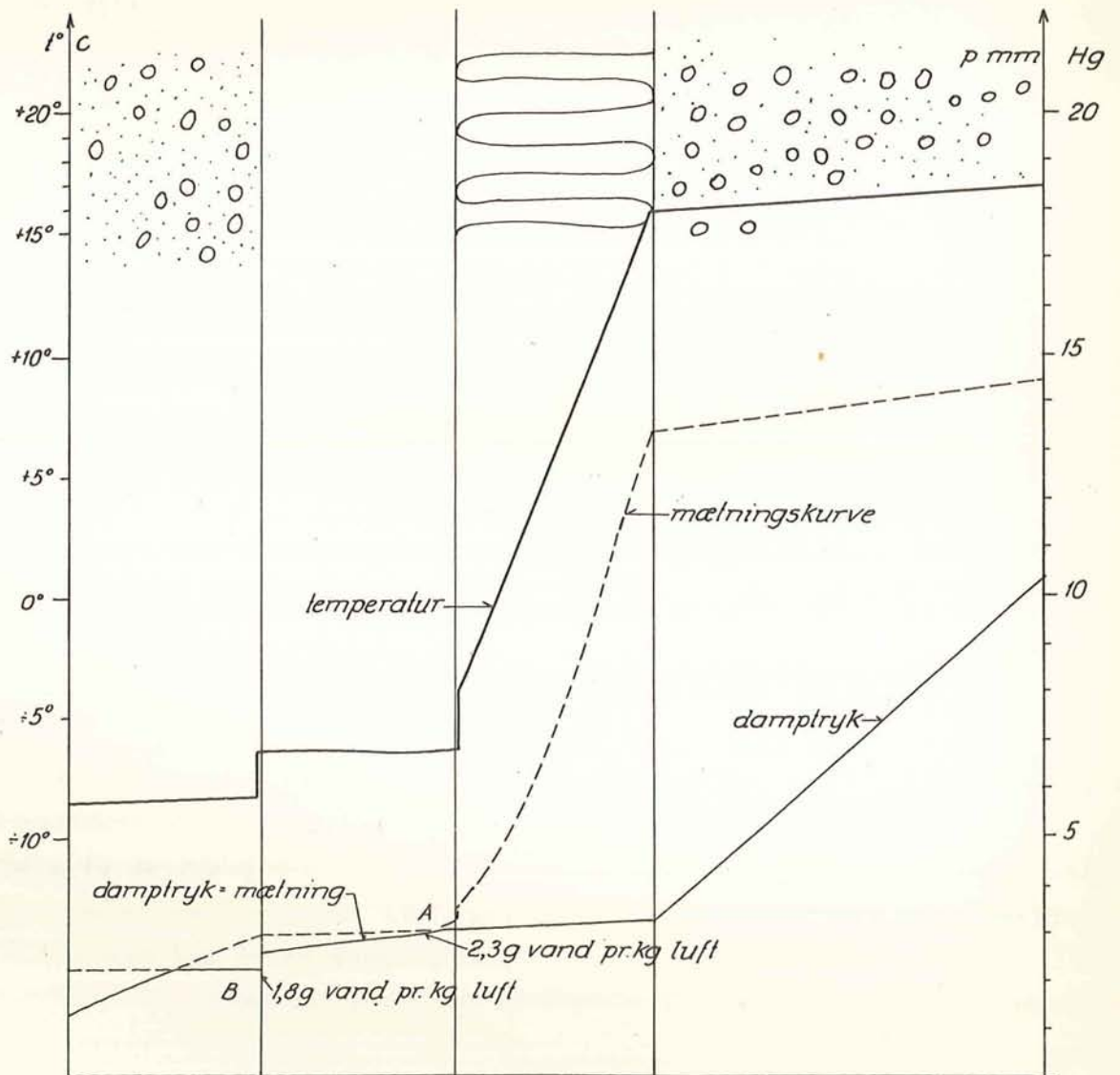


FIG. 9. DIAGRAM FOR EKS. 2.



på strækning A-B afgives: $100 \cdot \frac{2,3 - 1,8}{2,3} = 22\%$ af den gennemstrømmende damp, d.v.s. 22% af $0,1375 = 0,03 \text{ g/m}^2$ pr. lime

På figuren er vanddannelsen indenfor området A B beregnet til 0.097 g/m^2 pr. time, som iøvrigt i dette tilfælde hovedsagelig vil forekomme som is eller rim.

EKSEMPEL 2 (se fig. 8)

Temperatur:

$$M = \frac{1}{k} = 0,05 + \frac{0,04}{1,8} + 0,10 + 0,10 + \frac{0,04}{0,04} + \frac{0,08}{1,4} + 0,15 = 0,05 + 0,022$$

$$+ 0,10 + 0,10 + 1,0 + 0,057 + 0,15 = 1,479 = \frac{1}{0,675}$$

$$\Delta T = 30^{\circ} \text{ C}; \quad k \cdot \Delta T = 30 \cdot 0,675 = 20,25$$

$$t_1 = -10 + 20,25 \cdot 0,05 = -10 + 1,02 = -8,98 \text{ mm Hg}$$

$$t_2 = -8,98 + 20,25 \cdot 0,022 = -8,98 + 0,45 = -8,53 \text{ "}$$

$$t_2' = -8,53 + 20,25 \cdot 0,10 = -8,53 + 2,03 = -6,50 \text{ "}$$

$$t_3' = -6,50 + 20,25 \cdot 0,10 = -6,50 + 2,03 = -4,47 \text{ "}$$

$$t_4 = -4,47 + 20,25 \cdot 1,0 = -4,47 + 20,25 = +15,78 \text{ "}$$

$$t_5 = +15,78 + 20,25 \cdot 0,057 = 15,78 + 1,16 = 16,94 \text{ "}$$

$$t_i = 16,94 + 20,25 \cdot 0,15 = 16,94 + 3,04 \approx 20,0 \text{ "}$$

Tryk:

$$M_d = \frac{1}{k_d} = \frac{4}{0,3} + \frac{4}{10} + \frac{4}{7} + \frac{8}{0,15} = 13,33 + 0,4 + 0,57 + 53,4 = 67,7 = \frac{1}{0,015}$$

$$\Delta P = 9,3 \text{ mm Hg}; \quad k_d \cdot \Delta P = 9,3 \cdot 0,015 = 0,1375 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$$

$$p_1 = 1,1 \text{ mm Hg}$$

$$p_2 = 1,1 + 13,33 \cdot 0,1375 = 1,1 + 1,83 = 2,93 \text{ "}$$

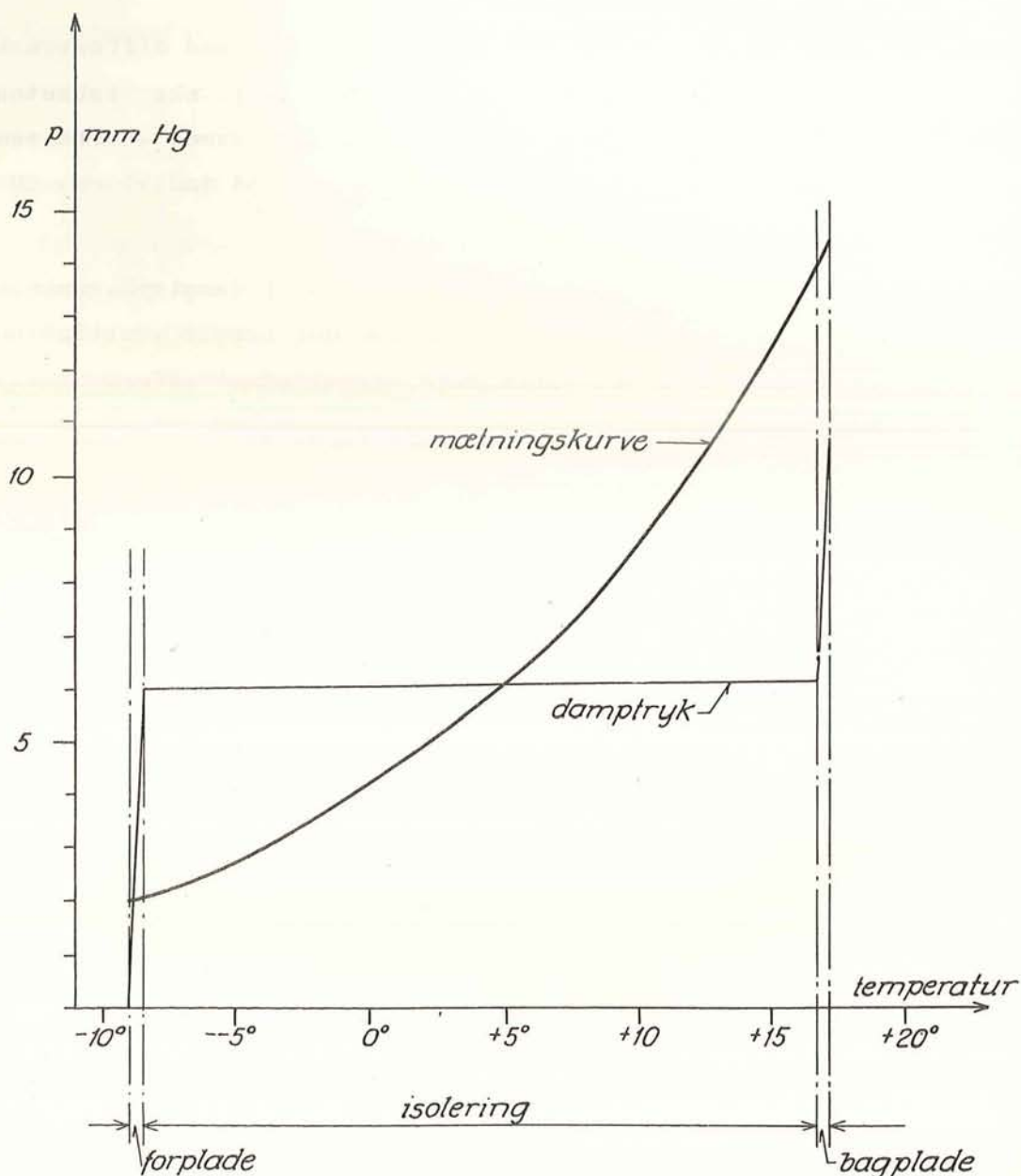
$$p_3 = 2,93 + 0,4 \cdot 0,1375 = 2,93 + 0,05 = 2,98 \text{ "}$$

$$p_4 = 2,98 + 0,57 \cdot 0,1375 = 2,98 + 0,08 = 3,06 \text{ "}$$

$$p_5 = 3,06 + 53,4 \cdot 0,1375 = 3,06 + 7,34 = 10,40 \text{ "}$$

På fig. 9 er på tilsvarende måde optegnet damp- og temperaturkurver. Det ses, at kondensering indtræffer i hulrummet samt på bagsiden af forpladen. Kondenseringen vil ske som is eller rim og i en mængde af ca. $0,03 \text{ g/m}^2$ pr. time.

Skal man foretage sammenligning mellem forskellige alternative løsninger eller undersøgelser for forskellige tilstande, er det praktisk at afbilde damptrykkurverne som vist for eksempel 1 på fig. 10.

FIG.10 TRANSFORMERET DIAGRAM FOR EKS.1.

På abscisseaksen er her angivet en temperaturskala, og de enkelte lag i konstruktionen bliver således repræsenteret ved temperaturfaldet igennem dem. Man undgår herved at skulle tegne en ny kurve for mætningstrykket for hver undersøgelse, og man kan tegne damptrykkurver for forskellige materialer og tilstande ind på samme diagram, blot ved at flytte skillelinierne mellem materialerne på temperaturskalaen.

VENTILERET HULRUM

Facadekonstruktioner udformes ofte med et ventileret hulrum på den kolde side af ventilationslaget f. eks. som i eksempel 2.

Sammenligner man luftens diffusionskonstant (8 á 10) med diffusionskonstanterne for de almindeligste bygningsmaterialer, ser man, at f. eks. letbetoner og måtteisoleringer angives konstanterne at være af næsten samme størrelsesorden; for både beton og murværk opgives konstanterne at være på indtil ca. 20 % af luftens diffusionskonstant.

Dette tyder på, at såfremt en mere end rent lokal damptrykssænkning af betydning ønskes opnået ved diffusion alene, kræves der hertil ventilationshuller af en størrelse og tæthed, som det ville være urimeligt at udføre.

Betydningen af hulrummet ligger i følgende forhold:

- 1) at det tillader dannelse af begrænsede mængder vand eller is uden at beskadige isoleringslaget, idet det tjener som dræn for kondens- eller smeltevand, der kan ledes ud gennem huller forneden.
- 2) I forbindelse med et tilstrækkeligt antal huller rigtig anbragt - at skaffe mulighed for gennemstrømning af hulrummet med kold, tør luft, der kan sænke damptrykket og optage kondensvandet.

I eksempel 2 dannedes der i begyndelsesstadiet 0,03 g frit vand pr. m² pr. time. Skal dette vand fjernes ved gennemstrømning af luft med temperaturen -9° C og relativ fugtighed 50 % har man:

tilstrømmende luft -9° C og 50 % indeholder ca. 0,9 g vand pr. kg,

udstrømmende luft -9° C og 100 % indeholder ca. 1,8 g vand pr. kg,

d.v.s 1 kg under gennemstrømningen kan optage 0,9 g vand. Pr. m² overflade i hulrummet, skal der altså pr. time passere $\frac{0,03}{0,9} = 0,033$ kg luft svarende til $\frac{0,033}{1,342} = 0,025$ m³.

Er der ventilationsåbninger svarende til 2 x 1 cm² pr. m² overflade, skal der være en konstant ind- og udstømningshastighed på $\frac{25000}{3600} = 7$ cm/sek. igennem disse åbninger.

TILSTAND EFTER BEGYNDELSESSTADIET

En undersøgelse, som ved de her beregnede eksempler, vil for mange konstruktioner give som resultat, at der i hvert fald ved ekstreme belastninger vil være mulighed for dannelse af frit vand.

Det vil sige, at undersøgelsen i virkeligheden kun tjener til at belyse begyndelsesstadiet. Den videre udvikling foregår på grund af dannelsen af frit vand under betingelser, der stadig ændrer sig, og en nøjagtig beregning er ikke mulig.

Man kan dog i nogen grad danne sig et skøn over, hvorledes tilstanden vil ændre sig, men det kan ikke overses, om der i et givet tilfælde vil kunne nås en stationær indre tilstand eller ej efter at kondenseringen er begyndt.

At der i praksis ikke viser sig så store skader, som en teoretisk undersøgelse kunne give anledning til at befrygte, må skyldes, at der almindeligvis opnås en indre ligevægtstilstand.

Ved hvilken fugtighedsgrad dette sker og hvilke varmetab, der herved bliver, er sikkert endnu ikke konstateret.

Til forståelse af, hvorledes en ligevægtstilstand kan opnås, er der på fig. 11, 12 og 13 skitseret udviklingen for nogle sandwichkonstruktioner, der alle består af et indre og et ydre tæt lag, hvorimellem en kraftig isolering og eventuelt et hulrum findes. Konstruktionerne tænkes således påvirket, at der dannes frit vand, og de betragtes i følgende 3 faser:

A. Begyndelsesstadiet.

Dette svarer til den tilstand, der findes ved beregning svarende til eksemplerne 1) og 2). Der er endnu ikke dannet så meget frit vand, at λ og k_d -værdierne er ændret.

B. Overgangsstadiet.

Det stigende indhold af frit vand forøger λ - og k_d -værdierne. Det frie vand kommer i bevægelse - afhængig af konstruktionen og materialet - på een eller flere af følgende måder:

- 1) såfremt kondenseringen sker i et hulrum løber vandet ned ad facadebeklædningens bagside til drænhuller - nogen større ændring i ligevægten vil ikke ske.

Som tidligere nævnt, kan damptrykket imod den varme side stige en smule på grund af kapillær tilbagesugning af det hygroskopiske vand; derved

nedsættes diffusionen fra indersiden tilsvarende. Forekommer der is, vil tilstanden ændres, idet en nedsættelse af diffusionstallet for beklædningen vil forøge damptryk og kondensationszone, og man kan komme over i en tilstand svarende til 2) og 3). På fig. 11 er afbildet en tilstand svarende til, at der forekommer kondensering også i isolationslaget.

- 2) Sker kondensationen i et materiale med store gennemgående åbninger og uden væsentlig kapillarsugningsevne (f. eks. glasuld, mineraluld, le-caklinker, fig. 12) vil vandet sive ned gennem materialet - der vil få et tiltagende vandindhold nedefter - indtil drænåbningerne skaffer vandet ud.

Ved nedsivningen vil vandet sprede sig, og en del vil også løbe mod den varme side, hvor det påny fordamper og diffunderer udefter, samtidig med at damptrykket ved den varme side må stige. Med det stigende damptryk nedsættes diffusionshastigheden fra facadens indvendige side.

Sker der isdannelse, rykker hele tilstanden nærmere den varme side. Det vil have betydning ved temperaturbestemmelsen at vide, om det sker i form af rim eller fast is.

- 3) Sker kondensationen i et materiale med udpræget kapillarsugningsevne og uden evne til gennemstrømning (f. eks. gasbeton, siporex o.l., fig. 13) vil det fri vand suges imod den aftagende fugtighed, d.v.s. dels ud mod den kolde side og dels imod den varme side.

Det vand, der suges mod den varme side, vil efterhånden påny fordampe og diffundere udefter.

Damptrykket vil på grund af den kapillære tilbagesugning stige og nedsætte diffusionen fra den indvendige side. En is- eller rimdannelse vil ligesom under 2) rykke tilstanden indefter.

C. Ligevægtstilstanden.

For så vidt som en sådan kan nås, må dette ske for tilfældene 1), 2) og 3) ved hjælp af alle eller nogle af følgende faktorer:

- 1) der tilføres vand ved diffusion fra indersiden,
der fjernes vand ved dræning af hulrummet,
 ved kapillarsugning gennem ydersiden,
 ved diffusion gennem ydersiden.

FIG. 11. DRÆNET HULRUM + SUGENDE ISOLERING.

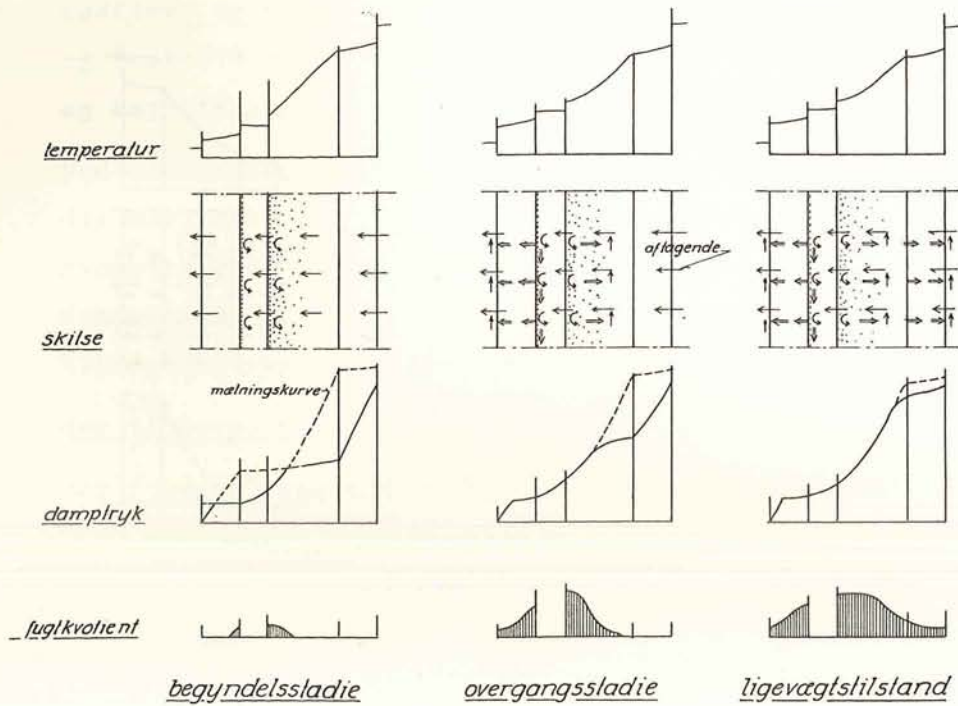
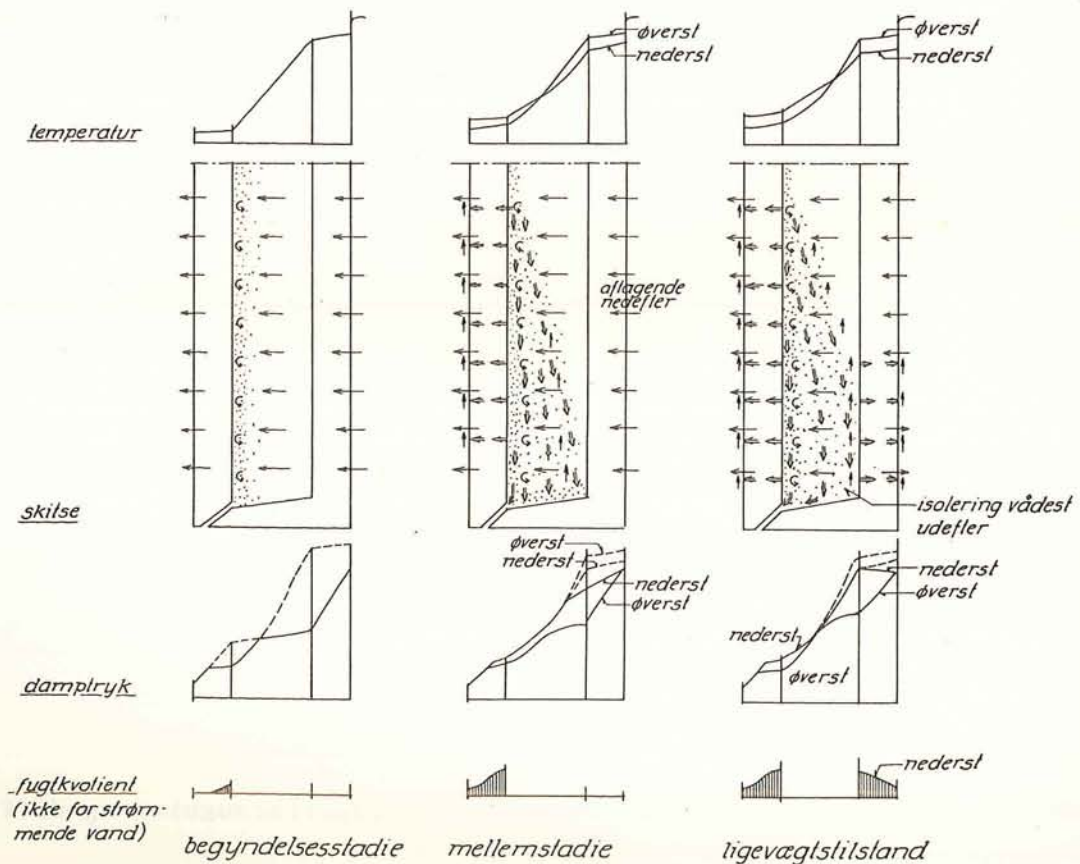
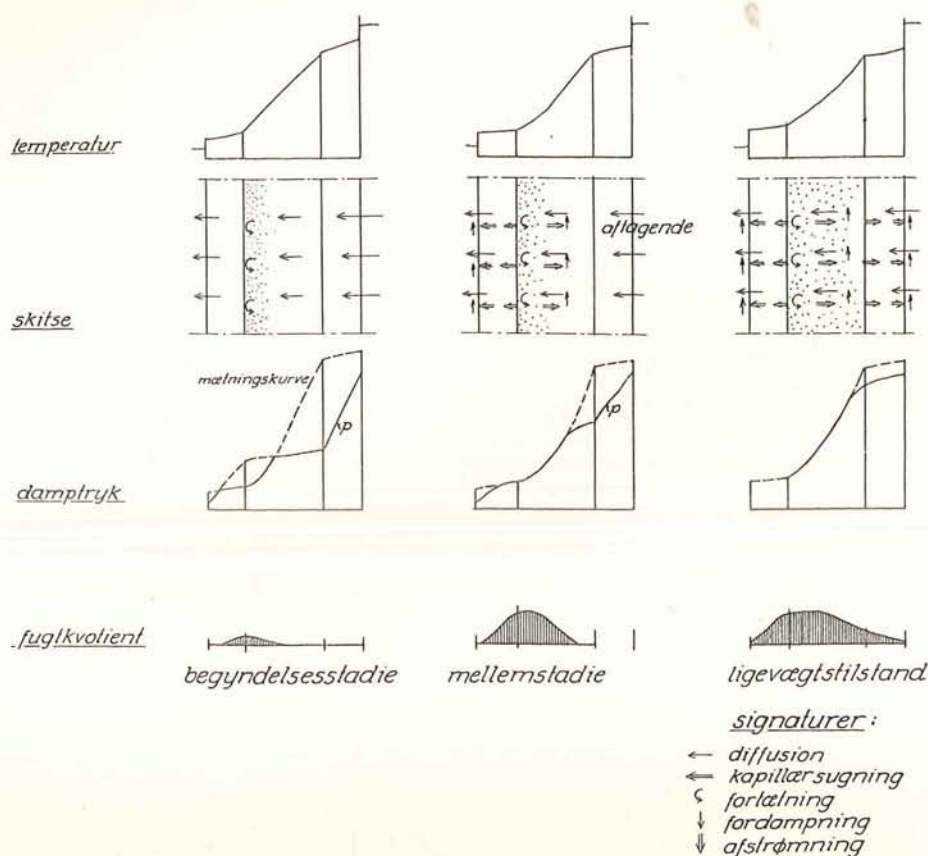


FIG. 12. ISOLERING MED ÅBNE PORER OG DRÆN.



- signalurer:
- ← diffusion
 - ↔ kapillær sugning
 - C fortætning
 - ↓ fordampning
 - ↓ afstrømning

FIG. 13. ISOLERING AF SUGENDE MATERIALE.



Hertil kommer, når kondenseringen sker i en sugende isolering som angivet på fig. 11, kapillær tilbagesugning gennem den indre plade.

- 2) Damptrykket i isoleringen stiger på grund af den nedsivende vand, indtil diffusionen indefra nedsættes så meget, at følgende ligevægt opnås: der tilføres vand ved diffusion fra indersiden. På grund af det stigende fugtighedsindhold nedefter i isoleringen, vil diffusionen være størst foroven i konstruktionen, der fjernes vand ved nedsivning til dræn, ved kapillærsugning gennem yderpladen, ved diffusion gennem ydersiden, samt rimeligvis også for den nedre del ved kapillærsugning og diffusion gennem indersiden.

- 3) Kapillarsugningen vil bevirke, at isoleringen bliver mere og mere våd udefter, og den derved nedsatte isoleringsevne betyder, at temperatur og (mættet) damptryk stiger ved ydersiden - herved fremmes diffusionen og kapillarsugning udefter.

Ved indersiden falder temperaturen og dermed mætningskurven, men samtidig bevirker den tiltagende fugtighed, at damptrykket nærmer sig mætningsstrykket - alt i alt vil diffusionen indefra blive mindre. Opnås dampmætning i hele isoleringen, kan der tillige blive tale om kapillær tilbagesugning gennem den indre skal. Ligevægten bliver således:

der tilføres vand ved diffusion fra indersiden,

der fjernes vand ved diffusion gennem yderpladen,

ved kapillarsugning gennem yderpladen,

ved kapillær tilbagesugning gennem den indre plade.

IKKE STATIONÆR TILSTAND

De foregående betragtninger behandler fugtvandringer under ydre ekstreme konstante betingelser, og det påpeges, hvilke faktorer der har betydning for - under disse forhold - også at nå frem til en indre stationær ligevægt.

En ændring af de ydre betingelser vil således naturligvis altid betyde en forbedring af betingelserne. F. eks. vil en periodevis nedsættelse af den indre temperatur og relative fugtighed give mulighed for, at konstruktionen kan reducere sit vandindhold ved øget kapillær tilbagesugning og ved diffusion imod den varme side - altsammen fænomener, som man med et nøjere materialekendskab kan finde talværdier for.

S A M M E N F A T N I N G

Målet må være at skaffe så pålidelige oplysninger som muligt om de konstanter, der er afgørende for fugtvandringer. De spredte oplysninger, der findes herom sammen med en fornemmelse af de forskellige egenskabers relative indflydelse, gør det i dag kun muligt at foretage rent skitse-mæssige vurderinger af facadekonstruktioner.

Ligesom leverandørerne af byggematerialer i dag opgives styrke, rumvægt og λ -værdier, burde de også kunne opgive:

- 1) afhængighed mellem hygroskopisk fugt og relativ luftfugtighed.
- 2) afhængighed mellem diffusionstal k_d og relativ luftfugtighed målt således, at hygroskopisk kapillarsugning udelukkes.
- 3) afhængighed mellem kapillarsugningstal k_u og relativt vandindhold.
- 4) afhængighed mellem λ og relativt vandindhold.
- 5) oplysninger om gennemsivningshastigheder ved forskellige relative vandindhold.

Endvidere er der et behov for en grundforskning til nærmere belysning af den hygroskopiske kapillarsugnings indflydelse. Man vil herved blive i stand til med større sikkerhed at finde frem til de materialer, der i hvert enkelt tilfælde er egnede, og man kan udforme sin konstruktion så den passer til materialerne, f.eks. med hensyn til hulrum, ventilation, afdræning eller anbringelse af tætte hinder. Af speciel interesse vil det være at få kendskab til, om anvendelse af luftindblandet beton giver særlig stor tæthed.

Ligeledes ville det være af værdi at foretage særlige undersøgelser til oplysning om den gennemsnitlige luftskiftehastighed i ventilerede hulrum - afhængig af ventilationsåbningernes størrelser og placeringer.

Problemerne i forbindelse med isdannelser må ligeledes belyses nærmere. F.eks. må man vide, under hvilke forhold fortætningen vil ske som is henholdsvis rim, og man må kende varmeledningstal, diffusions- og kapillarkonstanter for disse dannelser for at kunne afgøre, om en indre stationær ligevægt kan opnås.

Såfremt eventuelle drænhuller lukkes af isdannelser, skulle der være en teo-

retisk mulighed for, at isdannelserne standser med det stigende indre damptryk, men der vil kunne opstå en kritisk situation, når isen bag forpladen smelter inden drænhullerne er isfri. Drænhuller bør derfor anbringes således, at der er mulighed for, at de tør op først.

LITTERATURHENVISNINGER

- E. Suenson: Vanddamps diffusion i vægge og rørkapper.
Ingeniørvidenskabelige skrifter, København 1946.
Ingeniörhandboken, udgivet af C. A. Strömberg, Stockholm 1947.
- B. J. Rambøll: Varme- og lydisolering af betonhuse,
København 1949.
- Carl Munters: Fukt i kylrumsväggar.
Tidsskrift VVS, nr. 2 og 3, Stockholm 1950.
- H. Niemann, VDI Hannover: Die Entfeuchtung von Kälteisolierungen.
"Schiff und Hafen", Heft 8, August 1950.
- K. Egner: Feuchtigkeitsdurchgang und Wasserdampfkondensation in Bauten.
Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe C, Heft 1, 1950.
- The Refrigerating Data Book, udgivet af The American Society of Refrigeration
Engineers, (ASRE), 1951.
- Poul Becher og Vagn Korsgaard: Fugt og Isolering.
Udgivet af Statens Byggeforskningsinstitut.
Anvisning nr. 7, København 1951.
- Matts Bäckström: Kylteknikern, Stockhólm 1951.
- G. Hofbauer: Wärme und Feuchtschutz im Bauwesen.
Allgemeine Wärmtechnik 1954, Nr. 8.
- H. B. Jespersen: Rapport over forsøg vedrørende ligevægts- og diffusionsfugtindhold i vægmaterialer.
Teknologisk Institut 1954.

S U M M A R Y

Moisture may be transmitted through walls in the following ways:

A. In the form of water vapour.

- 1) As a result of differences in the partial pressure of the vapour (diffusion).
- 2) As a result of differences in the total air pressure and the consequent air currents.

B. In the form of free water.

- 3) As a result of capillary forces.
- 4) As a result of differences in the air pressure and the consequent air currents (driving rain).
- 5) As a result of gravity.

The article deals with the problems concerned with the interaction of the above-mentioned factors.

The quantity of vapour transmitted by diffusion can be written as:

$$V_d = -k_d \cdot \frac{dp}{dx} \text{ g/m}^2 \text{ h}$$

(p = partial vapour pressure in mm Hg and x in cm).

Similarly, the capillary suction can be written:

$$V_u = -k_u \cdot \frac{du}{dx} \text{ g/m}^2 \text{ h}$$

(u = relative moisture content of the material by weight % and x in cm).

The total transmission of moisture is then:

$$\dot{V} = V_d + V_u$$

The draw-back of this theory is that the factor k_d varies considerably with the relative humidity while k_u is normally not known.

Values of k_d for a number of different materials are given in table 2, but, in many cases, the relative air humidity at which the values were determined has not been measured.

By considering the pore structure of the materials, an attempt has been made to consider some of the factors which must be regarded as influential in the determination of k_d . These are as follows:

- 1) The moisture absorbed by the macroscopic pores of the materials at humidities below 100 % (the inter-dependence of pore radii and the percentage relative humidity are given in table 1) will be able to be transmitted by capillary suction.

In experimental work, there is usually the same temperature on both sides of the sample being tested and a vapour pressure distribution as shown on fig. 5 a, so that the moisture of the material decreases with the vapour pressure. It will therefore be possible that the value found for k_d will be considerably influenced by the capillary suction.

This effect can, however, be eliminated by keeping the same relative humidity on either side of the sample as in fig. 5 b. The capillary transmission will in practice usually be in the opposite direction to the diffusion.

- 2) Diffusion through a material can take place as a series of diffusions through airfilled and waterfilled pores. The quantity of water filled pores will, dependent on the pore structure, increase with the relative humidity, see fig. 3. Transmission through the water filled pores is governed by the flow resistance, and presumably takes place at a speed considerably above that of diffusion.

For a material of fine pore structure, k_d will therefore increase with the relative humidity.

There is a need for basic research on these problems. It is possible that many of the diffusion constants hitherto determined, give too pessimistic a basis for estimating the soundness of constructions.

Estimations, based on ideal theory, of some constructions are given in examples 1 and 2, and such estimations usually serve as guide to the correct structure of the construction.

If, as in the examples, condensate is formed, the examination is only valid in the initial stages, as the formation of free water immediately alters the conditions.

In figs 11, 12 and 13 it has been attempted to show graphically what may

happen further for 3 different types of construction:

The condensate will, dependent on the structure of the material be sucked back, or sink down through the material. Where the water collects, the vapour pressure will rise and hinder the outwards diffusion through the inner surface of the wall until a state of equilibrium is reached.

As the velocities of suction and percolation in relation to that of diffusion are not known, it is not possible to form an exact estimate of the actual transmission of moisture, or the distribution of moisture in the material, which will give equilibrium for given outer temperature and humidity influences.

e) Varmekapacitet

En traditionel teglstensydermur har en ret stor varmekapacitet, d.v.s den er ret træg at opvarme, men til gengæld holder den i længere tid på varmen, når der afbrydes for varmekilden. Dette er en fordel, når brugen forudsætter forholdsvis kontinuerlig opvarmning, men det er en ulempe, hvis driften er udpræget diskontinuert.

Moderne facadeelementer har mindre vægt og sædvanligvis mindre varmekapacitet. Man er dog i nogen grad i stand til at tilpasse facadeelementernes opbygning efter bygningens brug.

Ved diskontinuert drift eller ved stråleopvarmning må det således foretrækkes, at der er mindst muligt materiale indenfor isoleringslaget.

Iøvrigt savnes der systematiske undersøgelser til nærmere belysning af betydningen af fordelingen af varmekapaciteten i facadeelementer.

De indvendige vægge og møblerne udgør normalt den langt afgørende del af lejlighedens varmeaccumulatorer.

f) Fugtkapacitet

Betydningen af fugtkapaciteten i facadeelementets enkelte lag er udførligt behandlet i afsnittet fugttransport, pag. 5.09.

Her skal blot tilføjes, at med hensyn til den ydre overflade har en stor fugtkapacitet betydning på den måde, at muligheden for den pag. 5.07 omtalte vandfilm, der er så farlig for slagregnstætheden, vil have mindre mulighed for at dannes. Til gengæld indtræder en kapillarsugning, indefter i konstruktionen under selve regnpåvirkningen, udefter når regnen hører op.

KULDEBROER

Cold-conductors

M. Egeskjold

I n d h o l d

Kuldebroer udfør vægge og etageadskillelser.

Indledning	Side	5.53
Kuldebro med 2 zoner	-	5.57
- - 3 -	-	5.59
Korrektionsbestemmelse	-	5.63
Eksempler	-	5.64
Eksempel 1	-	5.65
- 2	-	5.68
- 3	-	5.68
- 4	-	5.73
Konklusion	-	5.76
English summary	-	5.78

Punktformige kuldebroer.

Indledning	-	5.83
Differentialligningen for punkt-symmetrisk varmestrømning	-	5.84
Eksempel 1	-	5.91
- 2	-	5.92
Konklusion	-	5.93
English summary	-	5.94

KULDEBROER UD FØR VÆGGE
OG ETAGEADSKILLELSER

Kuldebroer udfor vægge og etageadskillelser.

Ved enhver bygningsisolering vil der i praksis fremkomme lokaliteter, hvor varmetransmissionen er væsentlig afvigende fra gennemsnittet. Det kan f.eks. i murede konstruktioner være de små områder udfor fuger, ståltrådsbindere eller lignende. De praktiske følger af sådanne små inhomogeniteter er som regel ringe. Ved transmissionsberegningen kan der foretages en korrektion, og de tværgående varmestrømninger vil almindeligvis resultere i en udjævning af overfladernes temperaturer.

Når der er tale om stor varmetransmission på større områder, taler man om egentlige kuldebroer.

Kuldebroer gennem plane vægge er behandlet af dr. Poul Becher i "Varmetabet gennem plane tværdelte vægge" (statens byggeforskningsinstitut særtryk nr. 10, 1950). Der angives her to tilnærmelsesmetoder til bestemmelse af varmetransmissionen og endvidere en successiv beregningsmetode til bestemmelse af temperaturfordelingen.

Der er i det følgende behandlet den type af kuldebroer, der fremkommer, hvor indre dæk eller vægge bryder helt eller delvis igennem den ydre isolering.

Det er som regel konstruktive krav, der er skyld i disse kuldebroer - f.eks. krav om forsvarlig sammenhæng mellem jernbetondæk og facadedragere eller mellem betonvægge og facadesøjler.

Det er således et problem, der i særlig grad er dukket frem sammen med den senere tids byggeri med dæk og vægge af jernbeton, men problemet er også til stede i murede huse med jernbetondæk - f.eks. overalt hvor dækkene bryder ind i den isolerende bagmur, samt bag altanplader.

Ulemperne ved kuldebroerne er bekendte: - dels tappes der direkte en vis varmemængde ud af bygningen, og dels sænkes den indvendige overfladetemperatur så meget, at der kan opstå kondensdannelser med de deraf følgende dannelse af skjolder og vedligeholdelsesmæssige besværligheder.

Dugproblemet har en særlig betydning i det moderne elementbyggeri, hvor udeladelsen af den utvivlsomt fugtighedsakkumulerende puds kan tænkes at frembyde fare for, at der kan blive tale om direkte dråbedannelser - et fænomen som under ingen omstændigheder vil kunne tolereres.

Imødegåelsen af kuldebroerne ved opsætning af isolering på de mest udsatte steder er - på grund af de modstridende konstruktive krav - ofte både besværlig og bekostelig. Det vil derfor være af betydning, at man gør sig klart, i hvilket omfang man bør træffe modforanstaltninger, samt hvor stor effektivitet disse har.

I det følgende er der opstillet et teoretisk beregningsgrundlag til bestemmelse af:

- 1) Hvilke varmemængder der tappes ud gennem kuldebroerne.
- 2) Overfladetemperaturfordelingen i nærheden af kuldebroerne.
- 3) Betydningen af det almindelige middel imod kuldebroerne, d.v.s. "indpakning" af den indvendige konstruktion på en vis zone nærmest ved kuldebroen.

Ved undersøgelsen betragtes en uendelig lang plade, hvis frie kant bryder igennem et isolerende materiale, der danner skillelinie mellem et ydre koldt område og et indre varmt område.

Undersøgelsen er delt i følgende 2 tilfælde:

A) Plade med 2 zoner:

- 1) en inderzone med samme overgangstal overalt til det varme område,
- 2) en yderzone imod det kolde område.

B) Plade med 3 zoner:

- 1) en inderzone som ovenfor,
- 2) en mellemzone med kraftigere isolering til det varme område,
- 3) yderzonen mod det kolde område.

Differentialligningen for en 2-dimensional varmestrøm lader sig almindeligvis ikke løse exakt, hvorimod det er muligt - som angivet af dr. Poul Becher - at finde frem til en løsning ved successiv anvendelse af differensligninger, hvilket dog kræver nogen tid og tålmodighed. I "Journal of the institution of heating and ventilating engineers", oktober 1950, side 297, er af Neville S. Billington og dr. Poul Becher angivet resultaterne af sådanne beregninger for nogle murede ydervægge, der skærer indre, murede vægge.

Opgaven i det følgende er at finde frem til et håndterligt matematisk udtryk, der i hvert enkelt tilfælde hurtigt kan give et omtrentligt billede af, hvorledes varmestrøm og temperaturfordeling er ved den her omhandlede type af kuldebroer. For at få et grundlag

for en sådan løsning er det nødvendigt at gøre nogle idealiserende forudsætninger. Der er her gjort følgende forudsætninger:

- 1) konstant lufttemperatur overalt både ind- og udvendig og deraf følgende stationær varmestrøm og temperaturfordeling.
- 2) I et vilkårligt snit parallelt med pladeforkanten regnes med konstant temperatur, således at isotermerne er rette linier vinkelret på pladen.
- 3) På den strækning, hvor pladen bryder igennem isoleringen, tænkes skillefladen mellem denne og pladen fuldstændig varmetæt.

Den sidste forudsætning svarer til forudsætningen for den af dr. Becher angivne 1. tilnærmelsesmetode.

Varmestrømmen fra overfladen mod pladens indre del vil naturligvis betinge en vis temperaturdifferens, men da den resulterende varmestrøm foregår parallelt med overfladen, vil forudsætningen 2) være rigtigere jo bedre ledende materialet er.

Når der i det følgende tales om temperaturen forstås herved gennemsnittet af de virkelige temperaturer for et normalsnit. Dette vil almindeligvis betyde, at der i beregningerne vil indgå lidt større varmetransmission end der i virkeligheden vil blive, ligesom den virkelige overfladetemperatur på den varme side overvejende vil ligge lidt højere end den beregnede.

Der er senere gjort rede for, hvorledes man kan korrigere de fundne middeltemperaturer.

Der anvendes i beregningerne følgende bogstavbetegnelser:

- t angiver på et vilkårligt sted af pladen temperaturen regnet ud fra den udvendige lufttemperatur som nulpunkt.
- T angiver den konstante indvendige lufttemperatur - ligeledes i forhold til den udvendige lufttemperatur.
- λ angiver varmeledningstallet for pladen.
- α_i angiver middeltallet mellem de 2 modstående pladesiders overgangstal til luften i inderzonen.
- α_m angiver på samme måde middel-overgangstallet for mellemzonen.
- α_u angiver overgangstallet mod luften til den kolde side fra yderzonens overflader.

- m angiver mellemzonens længde
 f " yderzonens "
 h " pladetykkelsen
 b " tykkelsen af den isolerende væg.

For at anskueliggøre beregningsudtrykkene er der endvidere indført følgende konstantbetegnelser:

$$I = \sqrt{\frac{2\alpha_i}{h \cdot \lambda}}$$

$$M = \sqrt{\frac{2\alpha_m}{h \cdot \lambda}}$$

$$U = \sqrt{\frac{2\alpha_u}{h \cdot \lambda}}$$

$$K = \frac{h \cdot U + 2}{2 + hU + e^{-2fU}(2 - hU)}$$

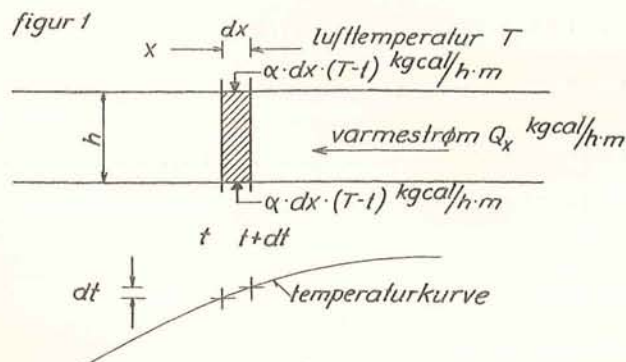
$$L = \frac{e^{-2fU}(2 - hU)}{2 + hU + e^{-2fU}(2 - hU)}$$

$$F = e^{-mM} \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} - 1 \right) - e^{mM} \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} + 1 \right)$$

$$G = e^{-mM} \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} - 1 \right) + e^{mM} \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} + 1 \right)$$

Når en undersøgelse skal foretages på grundlag af de i det følgende opstillede formler, skal man først beregne ovennævnte konstanter.

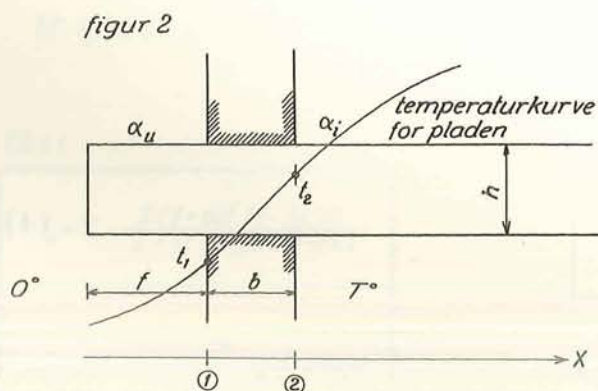
Undersøgelsen bygger på følgende 2 differentiaalligninger, der gælder for et vilkårligt udsnit dx af et 1 m bredt pladebælte, der gennemstrømmes af varmemængden Q_x og samtidig modtager (eller afgiver) en varmemængde α kgcal pr. time pr. grad pr. m^2 af overfladen (se fig. 1).



$$Q_x = h \cdot \lambda \cdot \frac{dt}{dx}$$

$$dQ_x = 2\alpha (T-t) dx$$

A. PLADE MED 2 ZONER (se fig. 2)



gennemstrømmende varmemængde i inderzone

$$Q_x = \frac{dt}{dx} \cdot h \cdot \lambda$$

modtaget varmemængde i inderzone

$$Q_x = 2\alpha_i \int_x^{\infty} (T-t_i) dx$$

d.v.s. indv. temperaturkurvæ t_i bestemmes ved

$$2\alpha_i \int_x^{\infty} (T-t_i) dx = h \cdot \lambda \cdot \frac{dt_i}{dx} \quad (1)$$

gennemstrømmende varmemængde for tværsnit i yderzonen

$$Q_x = \frac{dt}{dx} \cdot h \cdot \lambda$$

tilsv. afgivet varme

$$Q_x = h \cdot t_u(f) \cdot \alpha_u + 2\alpha_u \int_{-f}^x t_u dx$$

d.v.s. temperaturkurven i yderzonen t_u bestemmes ved

$$h t_u(f) \alpha_u + 2\alpha_u \int_{-f}^x t_u dx = h \cdot \lambda \cdot \frac{dt_u}{dx} \quad (2)$$

ligning (1) har løsningen

$$t_i = T - (T - t_2) e^{-x \sqrt{\frac{2\alpha_i}{h \cdot \lambda}}} \quad (3)$$

hvor x regnes ud fra (2)

ligning (2) har en løsning af formen

$$t_u = A \cdot e^{x \sqrt{\frac{2\alpha_u}{h \cdot \lambda}}} + B \cdot e^{-x \sqrt{\frac{2\alpha_u}{h \cdot \lambda}}} \quad (4)$$

hvor x regnes ud fra (1)

A og B bestemmes ved indsættelse i (2) idet $U \cdot \sqrt{\frac{2\alpha_u}{h \cdot \lambda}}$:

$$h \cdot \alpha_u (A \cdot e^{+fU} + B e^{-fU}) + 2\alpha_u \frac{1}{U} (A e^{xU} - B e^{-xU} - A e^{-fU} + B e^{fU}) \\ - h \cdot \lambda \cdot U (A e^{xU} - B \cdot e^{-xU})$$

idet $h \cdot \lambda \cdot U^2 = 2\alpha_u$ fås:

$$hU(A \cdot e^{-fU} + B e^{fU}) = 2(A e^{-fU} - B e^{fU}) = 0$$

$$A e^{-fU}(hU - 2) + B \cdot e^{fU}(hU + 2) = 0$$

endvidere haves at $t_u = t_1$ for $x = 0$ d.v.s.

$$A + B = t_1$$

heraf fås:

$$A = t_1 \frac{hU + 2}{2 + hU + e^{-2fU}(2 - h \cdot U)} = t_1 K \quad (5)$$

$$B = t_1 \frac{e^{-2fU}(2 - h \cdot U)}{2 + hU + e^{-2fU}(2 - h \cdot U)} = t_1 L \quad (6)$$

t_1 og t_2 bestemmes af betingelserne:

$$\frac{dt_i}{dx} = \frac{dt_u}{dx} \quad \text{for } x=0$$

d.v.s.

$$(T-t_2) \cdot I = t_1 KU - t_1 LU = t_1 \cdot U(1-2L)$$

og

$$\frac{dt_1}{dx} = \frac{t_2 - t_1}{b} \text{ for } x=0 \text{ d.v.s.}$$

$$(T-t_2) I b = t_2 - t_1$$

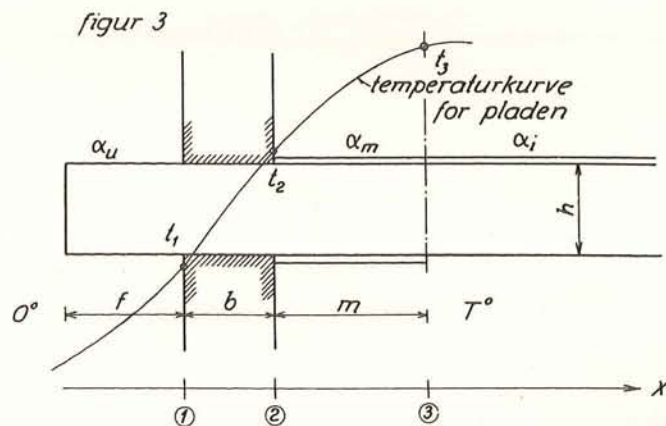
heraf fås:

$$t_2 = T \cdot \frac{I(1+bU(1-2L))}{I+U(1+Ib)(1-2L)} \quad (7)$$

$$t_1 = T \cdot \frac{I}{I+U(1+Ib)(1-2L)} \quad (8)$$

Varmetransmissionen bliver:

$$Q = h \cdot \lambda \cdot \frac{t_2 - t_1}{b} = T \cdot h \cdot \lambda \cdot \frac{IU(1-2L)}{I+U(1+Ib)(1-2L)} \quad (9)$$

B. PLADE MED 3 ZONER (se fig. 3)Inderzonen

th. for (3) fås - analogt med udtrykket (3) -
(x regnes pos. th. udfra (3)):

$$t_i \cdot T - (T - t_3) e^{-x \sqrt{\frac{2\alpha_i}{h \cdot \lambda}}} = T - (T - t_3) e^{-xI} \quad (10)$$

Mellemzonen

mellem (2) og (3) gælder (x regnes pos. th. udfra (2)):

$$h \cdot \lambda \cdot \frac{dt_m}{dx} = h \cdot \lambda \left(\frac{dt_i}{dx} \right)^{x=0} + 2\alpha_m \int_x^m (T - t_m) dx$$

$$\left(\frac{dt_i}{dx} \right)^{x=0} = I(T - t_3)$$

d.v.s.

$$2\alpha_m \int_x^m (T - t_m) dx = h \cdot \lambda \left(\frac{dt_m}{dx} - I(T - t_3) \right) \quad (11)$$

tilfredsstilles af et udtryk af formen

$$t_m = T + D e^{x \sqrt{\frac{2\alpha_m}{h \cdot \lambda}}} + E e^{-x \sqrt{\frac{2\alpha_m}{h \cdot \lambda}}} \quad \sqrt{\frac{2\alpha_m}{h \cdot \lambda}} = M$$

d.v.s.

$$t_m = T + D e^{xM} + E e^{-xM} \quad (12)$$

$$\frac{dt_m}{dx} = D \cdot M \cdot e^{xM} - E \cdot M \cdot e^{-xM}$$

$$\int (T - t_m) dx = -\frac{D}{M} e^{xM} + \frac{E}{M} e^{-xM} + \text{konstant}$$

(12) skal tilfredsstille (11), d.v.s.

$$2\alpha_m \left(\frac{E}{M} e^{-mM} - \frac{D}{M} e^{mM} - \frac{E}{M} e^{-xM} + \frac{D}{M} e^{xM} \right) = h \lambda (DM e^{xM} - EM e^{-xM} - I(T - t_3))$$

da $\frac{2\alpha_m}{h \lambda} = M^2$ fås ved division med $h \lambda$

$$D e^{mM} - E e^{-mM} = \frac{I}{M} (T - t_3) = \sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} (T - t_3)$$

endvidere skal man have $t_m \div t_3$ for $x = m$:

$$t_3 = T + D e^{mM} + E e^{-mM}$$

D og E bestemmes af ovenstående 2 ligninger, der skrives

$$\begin{aligned} D e^{mM} - E e^{-mM} &= \sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} (T-t_3) \\ D e^{mM} + E e^{-mM} &= - (T-t_3) \end{aligned}$$

$$2D \cdot e^{mM} = (T-t_3) \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} - 1 \right)$$

$$D = (T-t_3) \frac{\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} - 1}{2e^{-mM}}$$

(13)

$$-2E \cdot e^{-mM} = (T-t_2) \left(\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} + 1 \right)$$

$$E = -(T-t_2) \frac{\sqrt{\frac{\alpha_i}{\alpha_m}} + 1}{2e^{-mM}}$$

(14)

Yderzonen

$$t_u = A \cdot e^{xU} + B e^{-xU}$$

(15), hvor $U = \sqrt{\frac{2\alpha_u}{h\lambda}}$

x regnes pos. th. ud fra (1)

som skal tilfredsstille

$$h t_u (-f) \cdot \alpha_u + 2\alpha_u \int_{-f}^x t_u dx = h \cdot \lambda \cdot \frac{dt_u}{dx}$$

og endvidere har man $t_u = t_1$ for $x = 0$

hvilket iflg. tidligere udregning giver

$$A = t_1 \frac{hU + 2}{2 + h \cdot U + e^{-2fU} (2 - hU)} = t_1 K$$

$$B = t_1 \frac{e^{-2fU} (2 - hU)}{2 + h \cdot U + e^{-2fU} (2 - hU)} = t_1 L$$

t_1, t_2 og t_3 bestemmes af

$$t_m = t_2 \text{ for } x=0 \quad (16)$$

$$\frac{dt_m}{dx} = \frac{dt_u}{dx} \text{ for } x=0 \quad (17)$$

$$\frac{dt_m}{dx} = \frac{t_2 - t_1}{b} \text{ for } x=0 \quad (18)$$

d.v.s.

$$t_2 = T + D + E \quad (16)$$

$$M(D - E) = U(A - B) \quad (17)$$

$$M(D - E) \cdot b = t_2 - t_1 \quad (18)$$

Ved indsættelse af udtrykkene for A B D og E fås:

$$t_2 \cdot T + \frac{1}{2}(T - t_3)F \quad (16)$$

$$\frac{1}{2}M(T - t_3)G = t_1 U(1 - 2L) \quad (17)$$

$$\frac{1}{2}M(T - t_3)Gb = t_2 - t_1 \quad (18)$$

heraf fås:

$$t_1 = T \frac{MG}{MG - UF(1 - 2L)} \quad (19)$$

$$t_2 = T \left(1 + \frac{UF(1 - 2L)}{MG - UF(1 - 2L) + MG U b(1 - 2L)} \right) \quad (20)$$

$$t_3 = T \left(1 - \frac{2U(1 - 2L)}{MG - UF(1 - 2L) + MG U b(1 - 2L)} \right) \quad (21)$$

varmetransmissionen bliver

$$Q = h \cdot \lambda \cdot \frac{t_2 - t_1}{b} = T \cdot h \cdot \lambda \cdot \frac{MG U (1 - 2L)}{MG - UF(1 - 2L) + MG U b(1 - 2L)} \quad (22)$$

KORREKTION AF BEREGNINGEN.

Den nøjagtige differentialligning for en todimensional varme-
strøm er

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$$

Forudsættes det nu, at temperaturforløbet for enhver værdi
af x er således, at

$$\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \quad (70) \quad \text{for den fundne middelkurve}$$

kan man bestemme temperaturfordelingen i et vilkårligt normalsnit.

For en valgt værdi af x har man

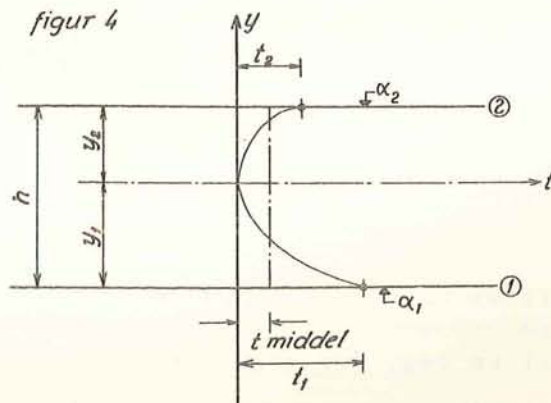
$$\frac{d^2 t}{dy^2} = -\frac{d^2 t}{dx^2} = -\rho \quad (23)$$

regnes t udfra minimumstemperaturen i snittet fås:

$$t = -\frac{1}{2} \rho y^2 \quad (24)$$

hvor y regnes udfra det punkt, hvor der ikke forekommer varmestrøm-
ninger vinkelret på pladen.

Er α_1 og α_2 overgangstallene for de to overflader og mid-
delovergangstallet $\alpha = 1/2 (\alpha_1 + \alpha_2)$ vil det tilnærmelsesvis sige,
at nulpunktet deler højden h i stykkerne



$$y_1 = \frac{1}{2} h \frac{\alpha_1}{\alpha} \text{ og } y_2 = \frac{1}{2} h \frac{\alpha_2}{\alpha} \quad (\text{se fig. 4})$$

Middeltemperaturen er

$$t_m = -\frac{1}{h} \int_{-y_1}^{y_2} \frac{1}{2} p y^2 dy = -\frac{p}{6h} (y_1^3 + y_2^3) = -\frac{1}{48} p h \frac{\alpha_1^3 + \alpha_2^3}{\alpha^3}$$

Overfladetemperaturen bliver

$$t_1 = -\frac{1}{8} p h^2 \cdot \frac{\alpha_1^2}{\alpha^2}$$

$$t_2 = -\frac{1}{8} p h^2 \cdot \frac{\alpha_2^2}{\alpha^2}$$

i forhold til middeltemperaturen bliver herefter tillægget

for overflade 1:

$$\Delta t_1 = t_1 - t_{\text{middel}} = \frac{1}{48} p h^2 \frac{\alpha_2^3 - 2\alpha_1^3 - 3\alpha_1^2 \alpha_2}{\alpha^3} \quad (25)$$

for overflade 2:

$$\Delta t_2 = t_2 - t_{\text{middel}} = \frac{1}{48} p h^2 \frac{\alpha_1^3 - 2\alpha_2^3 - 3\alpha_2^2 \alpha_1}{\alpha^3} \quad (26)$$

for laveste temperatur

$$\Delta t_{\text{min}} = -t_m = \frac{1}{48} p h^2 \frac{\alpha_1^3 + \alpha_2^3}{\alpha^3} \quad (27)$$

I det følgende er der gennemregnet 4 eksempler svarende til en bygning med støbte pudsfri vægge og dæk samt højisolerede snedkerfacader.

eksempel 1 svarer til en væg, der afsluttes i en facadelicene

eksempel 2 svarer til en væg, der gennembryder facaden men uden fremspring.

eksempel 3 svarer til et dæk, der afsluttes i en altan eller et facadebånd, og hvor de yderste 20 cm af dækundersiden er beskyttet af en isolering.

eksempel 4 som eksempel 3, men den isolerende bræmme er udeladt.

Der regnes overalt med en ydre temperatur på -15°C og en indre temperatur på $+20^{\circ}\text{C}$.

Eksempel 1 (se fig. 5)

$$T = 35^{\circ}; \quad f = 0,4 \text{ m}; \quad b = 0,15 \text{ m}; \quad h = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda = 1,4; \quad \alpha_i = 7; \quad \alpha_u = 20$$

$$I = \sqrt{\frac{14}{0,2 \cdot 1,4}} = 7 \quad U = \sqrt{\frac{40}{0,2 \cdot 1,4}} = 12$$

$$h \cdot U = 2,4$$

$$K \sim 1,0 \quad L \sim 0$$

$$t_2 = T \cdot \frac{7(1 + 0,15 \cdot 12)}{7 + 12(1 + 7 \cdot 0,15)} = 0,623 T = \underline{21,08}$$

$$t_1 = T \cdot \frac{7}{7 + 12(1 + 7 \cdot 0,15)} = 0,222 T = \underline{7,78}$$

Varmetransmissionen bliver

$$Q = 35 \cdot 0,2 \cdot 1,4 \cdot \frac{7 \cdot 12}{7 + 12(1 + 7 \cdot 0,15)} = 26,0 \text{ kgcal/h} \cdot \text{m}$$

Temperaturkurven i yderzonen

$$t_u = 7,8 \cdot e^{12x}$$

Temperaturkurve i inderzonen

$$t_i = 35 - 13,2 \cdot e^{-7x}$$

Korrektionerne bliver

$$\text{for inderzonen } p = \frac{d^2 t}{dx^2} = -646 e^{-7x}$$

$$\frac{1}{48} p h^2 = -\frac{646 \cdot 0,2^2}{48} \cdot e^{-7x} = -0,542 \cdot e^{-7x}$$

for overfladen tillægges idet $\alpha = \alpha_1 = \alpha_2$ og

$$\frac{\alpha_1^3 \div 2\alpha_2^3 \div \alpha_2^2 \alpha_1}{\alpha^3} = \div 4 :$$

$$\Delta t_o = \Delta t_1 = \Delta t_2 = \div 0,542 \cdot (\div 4) x^{\div 7x} = 2,17 \cdot e^{\div 7x}$$

for midten tillægges tilsvarende:

$$\Delta t_m = \Delta t_{\min} = \div 2 \cdot 0,542 \cdot e^{\div 7x} = \div 1,08 \cdot e^{\div 7x}$$

for yderzonen $p = \frac{d^2 t}{dx^2} = 1025 \cdot e^{12x}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = \frac{1025 \cdot 0,2^2}{48} \cdot e^{12x} = 0,852 \cdot e^{12x}$$

for overfladen tillægges

$$\Delta t_o = \Delta t_1 = \Delta t_2 = \div 4 \cdot 0,852 e^{12x} = \div 3,42 \cdot e^{12x}$$

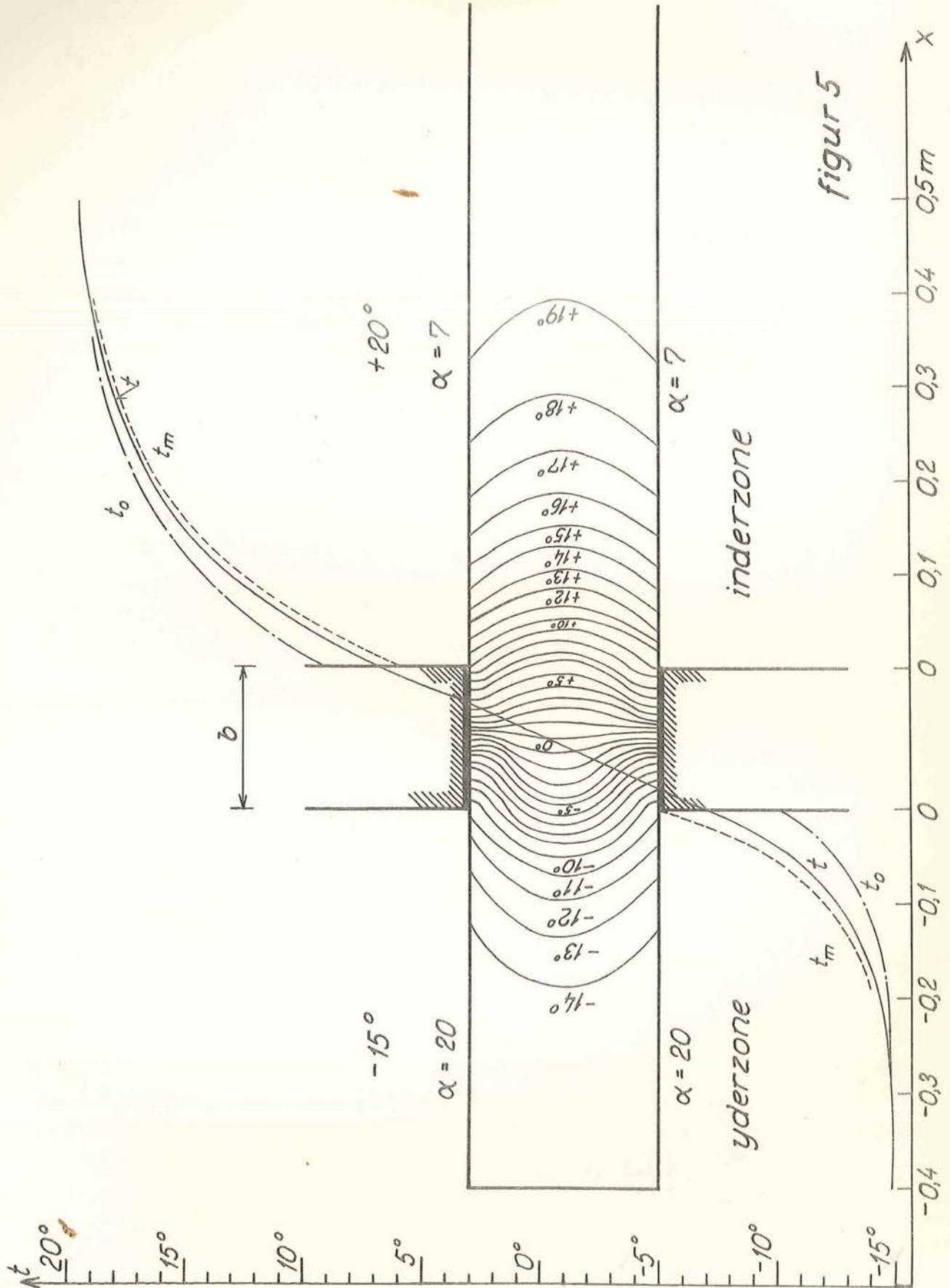
for midten tillægges

$$\Delta t_{\min} = 2 \cdot 0,852 \cdot e^{12x} = 1,71 e^{12x}$$

herefter kan middeltemperaturer samt temperaturer i overflade og midte udregnes:

	x	middel		korrektion		korrigeret overflade midte	
		t	t $\div 15^{\circ}$	Δt_o	Δt_m	t _o	t _m
yderzone	$\div 0,4$	0,065	$\div 14^{\circ}935$	$\div 0,028$	+ 0,014	$\div 14,963$	$\div 14,921$
	+ 0,2	0,71	$\div 14^{\circ}29$	$\div 0,31$	0,155	$\div 14,60$	$\div 14,14$
	$\div 0,15$	1,29	+ $13^{\circ}71$	$\div 0,56$	0,280	$\div 14,27$	$\div 13,43$
	$\div 0,10$	2,36	$\div 12^{\circ}64$	$\div 1,03$	0,56	$\div 13,67$	$\div 12,08$
	$\div 0,05$	4,30	$\div 10,70$	$\div 1,88$	0,94	$\div 12,58$	$\div 9,76$
	0	$7^{\circ}8$	$\div 7^{\circ}20$	$\div 3,42$	1,71	$\div 10,62$	$\div 5,49$
inderzone	0	$21^{\circ}8$	+ $6^{\circ}8$	2,17	$\div 1,08$	$8^{\circ}97$	$5^{\circ}72$
	0,05	$25^{\circ}70$	$10^{\circ}70$	1,53	$\div 0,76$	$12^{\circ}23$	9,94
	0,10	$28^{\circ}45$	$13^{\circ}45$	1,08	$\div 0,54$	$14^{\circ}53$	$12^{\circ}91$
	0,15	30,37	$15^{\circ}37$	0,76	$\div 0,38$	16,13	$14^{\circ}99$
	0,20	31,74	$16^{\circ}74$	0,54	$\div 0,27$	$17^{\circ}28$	$16^{\circ}47$
	0,50	34,60	$19^{\circ}60$	0,06	$\div 0,03$	$19^{\circ}66$	$19^{\circ}57$

På fig. 5 er kurverne optegnet og de tilsvarende isotermer er angivet, idet disses forløb på strækningen b findes ved interpolation, og idet formen skønnes.



figur 5

Eksempel 2 som eksempel 1, men uden fremspringende "næse", d.v.s.

$$K = \frac{4,4}{4} = 1,1$$

$$L = \div 0,1$$

$$t_2 = T \cdot \frac{7 (1 + 0,15 \cdot 12 \cdot 1,2)}{7 + 12 \cdot 2,05 \cdot 1,2} = 0,58 T = 20,3$$

$$t_1 = T \cdot \frac{7}{7 + 12 \cdot 2,05 \cdot 1,2} = 0,192 T = 6,75$$

varmetransmissionen bliver

$$Q = 35 \cdot 0,2 \cdot 1,4 \cdot \frac{7 \cdot 12 \cdot 1,2}{36,5} = 27,2 \text{ kg cal/ h} \cdot \text{m}$$

Heraf ses, at hverken varmetransmissionen eller temperaturforløbet adskiller sig væsentligt fra eks.1, d.v.s. der er ikke tale om, at den fremspringende "næse" virker som "køleribbe". Det bemærkes, at korrektionen for isotermernes krumning kun ændrer ubetydeligt på varmeafgangen fra inderzonen. Derimod betyder korrektionen af yderzonens isotermer, at der med de viste kurver kun kan afgives ca.2/3 af den beregnede varmemængde. Disse isotermer skal derfor sandsynligvis trækkes lidt udefter svarende omtrent til temperaturdifferensen Δt_0 . Da temperaturfordelingen her imidlertid er ganske uden praktisk interesse, er denne yderligere korrektion ikke foretaget i eksemplerne.

Eksempel 3. (se fig. 6)

$$T = 35^{\circ}; \quad f = 0,4 \text{ m}; \quad b = 0,15 \text{ m}; \quad h = 0,2 \text{ m}$$

$$m = 0,2 \text{ m}; \quad \lambda = 1,4; \quad \alpha_i = \frac{1}{2} (7 + 2) = 4,5$$

idet overgangstallet fra oversiden på grund af gulvbelægning sættes til 2.

$$\alpha_m = \frac{1}{2} (2 + 1) = 1,5; \quad \alpha_u = 20$$

$$I = \sqrt{\frac{9}{0,2 \cdot 1,4}} = 5,68; \quad M = \sqrt{\frac{3}{0,2 \cdot 1,4}} = 3,26; \quad U = \sqrt{\frac{40}{0,2 \cdot 1,4}} = 12$$

$$\sqrt{\frac{a_i}{a_m}} = \sqrt{\frac{4,5}{1,5}} = 1,73; \quad h \cdot U = 0,2 \cdot 12 = 2,4$$

$$F = e^{-0,65} \cdot 0,73 + e^{0,65} \cdot 2,73 = + 4,85$$

$$G = e^{-0,65} \cdot 0,73 + e^{0,65} \cdot 2,73 = + 5,61$$

$$K \sim 1; \quad L \sim 0$$

$$t_1 = T \cdot \frac{3,26 \cdot 5,61}{18,32 + 58,2 + 33,0} = 0,167 T = 5,85$$

$$t_2 = T \cdot \left(1 + \frac{58,1}{109,52} \right) = 0,47 T = 16,45$$

$$t_3 = T \cdot \left(1 + \frac{24}{109,52} \right) = 0,781 T = 27,2$$

Varmetransmissionen bliver

$$Q = \frac{0,2 \cdot 1,4}{0,15} \cdot (16,45 + 5,85) = 19,8 \text{ kg cal/ h}\cdot\text{m}$$

$$A = 5,85; \quad B \sim 0$$

$$D = 7,8 \cdot \frac{0,7}{2 \cdot e^{0,65}} = 1,48$$

$$E = - 7,8 \cdot \frac{2,73}{2 \cdot e^{-0,65}} = + 20,4$$

Temperaturkurverne bliver herefter

$$t_i = 35 + 7,80 \cdot e^{-5,68x}$$

$$t_m = 35 + 1,48 e^{3,26x} + 20,4 \cdot e^{-3,26x}$$

$$t_u = 5,85 \cdot e^{12x}$$

Korrektionerne bliver

for inderzonen $p = +252 \cdot e^{-5,68x}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = \frac{+252 \cdot 0,2^2}{48} \cdot e^{-5,68x} = + 0,21 \cdot e^{-5,68x}$$

for underste flade tillægges

$$\Delta t_u = + 0,21 \cdot \frac{8 + 686 + 294}{91,25} \cdot e^{-5,68x} = 2,14 \cdot e^{-5,68x}$$

for øverste flade tillægges

$$\Delta t_o = + 0,21 \cdot \frac{343 + 16 + 84}{91,25} \cdot e^{-5,68x} = + 0,56 \cdot e^{-5,68x}$$

i afstanden $\frac{1}{2} \cdot 0,2 \cdot \frac{2}{4,5} = 0,045$ fra oversiden tillægges

$$\Delta t_m = - 0,21 \frac{351}{91,25} \cdot e^{-5,68x} = \div 0,805 \cdot e^{-5,68x}$$

for mellemzonen $p = 15,75 \cdot e^{3,26x} \div 217 \cdot e^{-3,262}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = 0,013 \cdot e^{3,26x} \div 0,181 e^{-3,26}$$

for underste flade

$$\Delta t_u = 0$$

for øverste flade

$$\Delta t_o = \div 0,104 e^{3,26x} + 1,45 \cdot e^{\div 3,26x}$$

i afstand $\frac{1}{2} \cdot 0,1 \cdot \frac{2}{1,5} = 0,133$ m fra overside

$$\Delta t_m = 0,035 \cdot e^{3,26x} \div 0,483 e^{\div 3,26x}$$

for yderzonen $p = 840 \cdot e^{12x}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = 0,7 \cdot e^{12x}$$

for underste flade og øverste flade

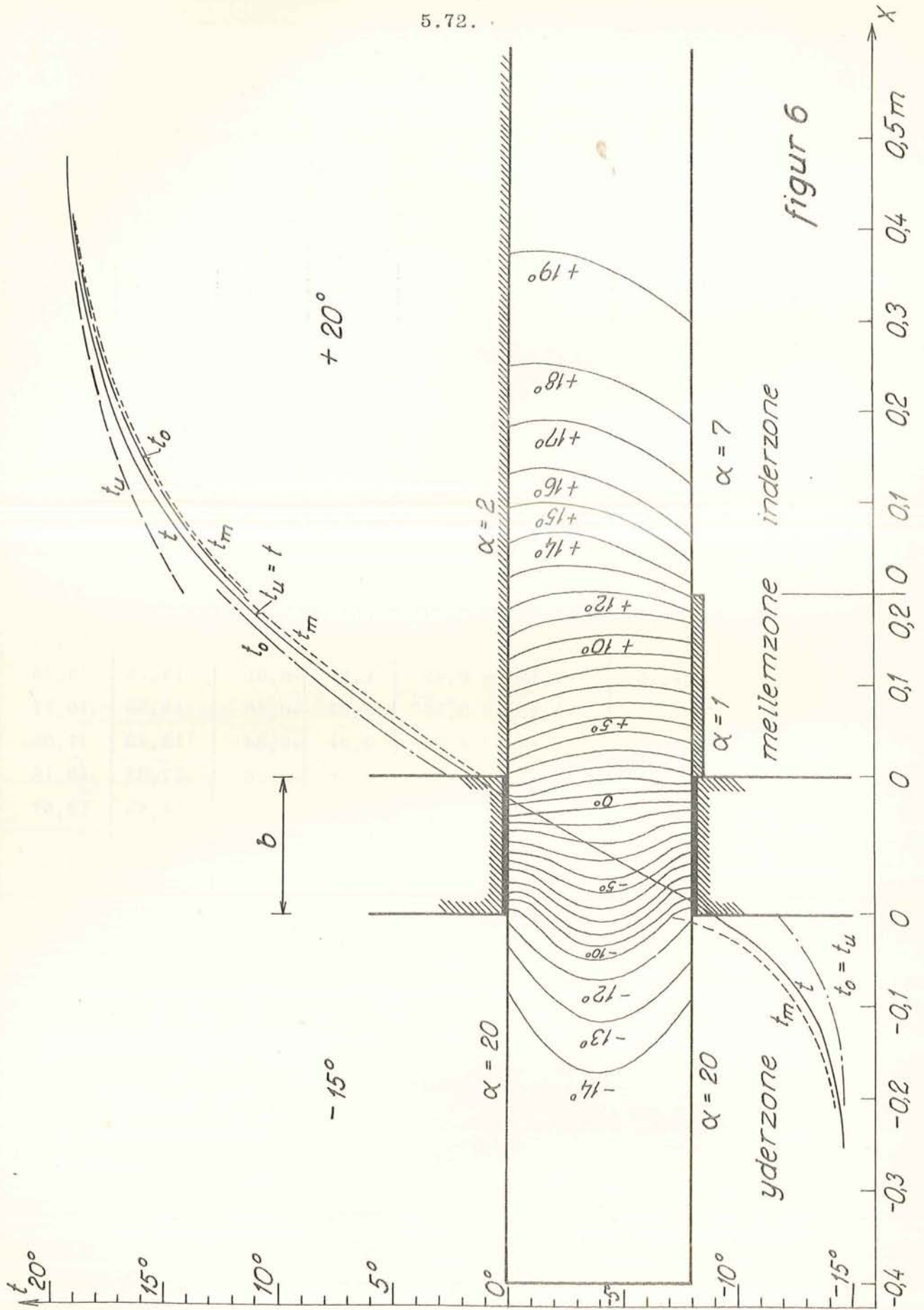
$$\Delta t_o = \Delta t_u = \div 2,8 e^{12x}$$

for midten

$$\Delta t_m = + 1,4 e^{12x}$$

	m i d d e l						k o r r i g e r e t		
	x	t	t + 15	Δt_o	Δt_u	Δt_m	t_o	t_u	t_m
y y ₂ = 0,10	÷ 0,4	0,05	+14,95	÷ 0,023	÷0,023	0,012	÷14,97		÷14,94
	+ 0,2	0,53	÷14,47	÷ 0,25	÷0,25	0,12	+14,72		+14,35
	+ 0,15	0,97	+14,03	÷ 0,47	÷0,47	0,23	+14,50		÷13,80
	+ 0,10	1,77	÷13,25	÷ 0,85	÷0,85	0,42	÷14,08		÷12,81
	+ 0,05	3,22	+11,78	÷ 1,54	÷1,54	0,77	÷13,32		÷11,01
	0	5,85	÷ 9,15	÷ 2,80	÷2,80	1,40	÷11,95		÷ 7,75
m y ₂ = 0,133	0	16,45	+ 1,45	+ 1,35	0	÷0,45	+ 2,80	+1,45	+ 1,00
	0,05	19,43	4,43	+ 1,11	0	÷0,37	+ 5,54	4,43	4,06
	0,10	22,40	7,40	+ 0,90	0	÷0,30	+ 8,30	7,40	7,10
	0,15	24,92	9,92	+ 0,72	0	÷0,24	+10,64	9,92	9,68
	0,20	27,20	12,20	+ 0,55	0	÷0,18	+12,75	12,20	12,02
i y ₂ = 0,045	0	27,20	12,20	+ 0,56	+2,14	÷0,81	+11,64	14,34	11,39
	0,05	29,15	14,15	÷ 0,42	1,61	÷0,61	13,73	15,76	13,54
	0,10	30,55	15,55	÷ 0,32	1,22	÷0,46	15,23	16,77	15,09
	0,15	31,67	16,67	÷ 0,24	0,91	÷0,34	16,43	17,58	16,33
	0,20	32,49	17,49	÷ 0,18	0,69	÷0,26	17,31	18,18	17,23
	0,30	33,58	18,58	÷ 0,10	0,39	÷0,15	18,48	18,97	18,43
	0,5	34,54	19,54	÷ 0,03	0,13	÷0,05	19,51	19,67	19,49

På fig. 6 er kurver og isotermer optegnet, idet isotermerne findes ved interpolation på strækning b.



figur 6

Beregningsmåden for korrektionerne giver naturligvis en vis diskontinuitet ved overgangen fra inderzone til mellezone.

Denne er ved optegningen udjævnet.

Eksempel 4 som eksempel 3, men uden mellemzone (se fig. 7)

$$T = 35^{\circ}; \quad f = 0,4 \text{ m}; \quad b = 0,15 \text{ m}; \quad h = 0,2 \text{ m}$$

$$\lambda = 1,4; \quad \alpha_i = \frac{1}{2} (7 + 2) = 4,5; \quad \alpha_u = 20$$

$$I = 5,68; \quad U = 12; \quad h \cdot U = 2,4$$

$$K \sim 1; \quad L \sim 0$$

$$t_2 = T \cdot \frac{5,68 \cdot (1+0,15 \cdot 12)}{5,68 + 12 (1+0,15 \cdot 5,68)} = 0,567 \cdot T = 19,9$$

$$t_1 = T \cdot \frac{5,68}{5,68 + 12 (1+0,15 \cdot 5,68)} = 0,204 \cdot T = 7,15$$

Varmetransmissionen bliver:

$$Q = \frac{0,2 \cdot 1,4}{0,15} (19,9 + 7,15) = 23,8$$

Temperaturkurven i yderzonen

$$t_u = 7,15 \cdot e^{12x}$$

Temperaturkurven i inderzonen

$$t_i = 35 + 15,1 \cdot e^{-5,68x}$$

Korrektionerne bliver

for inderzonen $p = +486 \cdot e^{-5,68x}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = +0,405 e^{-5,68x}$$

for underste flade tillægges

$$\Delta t_u = 4,12 e^{-5,68x}$$

for øverste flade tillægges

$$\Delta t_o = +1,08 \cdot e^{-5,68x}$$

i afstand 0,045 m fra oversiden tillægges

$$\Delta t_m = +1,55 e^{-5,68x}$$

for yderzonen $p = 1030 e^{12x}$

$$\frac{1}{48} p h^2 = 0,86 \cdot e^{12x}$$

for underste og øverste flade tillægges

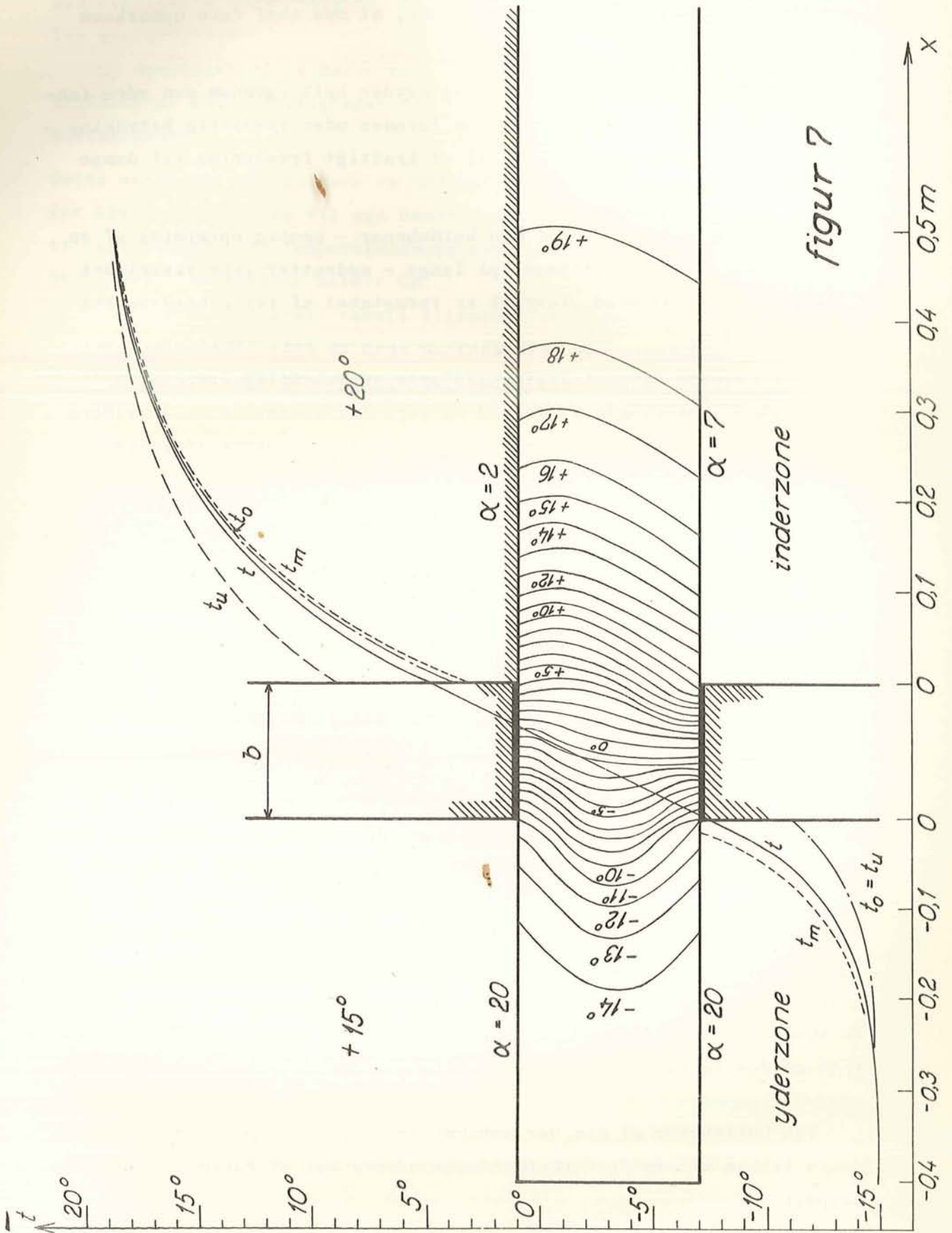
$$\Delta t_o = \Delta t_u = \div 3,45 e^{12x}$$

for midten tillægges

$$\Delta t_m = + 1,72 e^{12x}$$

	x	m i d d e l		k o r r e k t i o n			k o r r i g e r e t		
		t	t + 15	Δt_o	Δt_u	Δt_m	t_o	t_u	t_m
y zoner $y_2 = 0,10$	+ 0,4	0,06	+14,94	+0,027	+0,027	+0,013	+14,97	+14,97	+14,93
	+ 0,2	0,65	+14,35	+0,31	+0,31	+0,15	+14,66	+14,66	+14,20
	+ 0,15	1,19	+13,81	+0,58	+0,58	0,29	+14,39	+14,39	+13,52
	+ 0,10	2,17	+12,83	+1,05	+1,05	0,52	+13,88	+13,88	+12,31
	0,05	3,94	+11,06	+1,90	+1,90	0,95	+12,96	+12,96	+10,11
	0	7,15	+ 7,85	+3,45	+3,45	1,72	+11,30	+11,30	+ 6,13
i nderzone $y_2 = 0,045$	0	19 ⁰ ,90	+ 4 ⁰ ,90	+1,08	+4,12	+1,55	+ 3,82	+ 9,02	+ 3,35
	0,05	23,64	8,64	+0,81	+3,11	+1,18	7,83	11,75	7,46
	0,10	26,42	11,42	+0,62	+2,36	+0,89	10 ⁰ ,80	13,78	10 ⁰ ,53
	0,15	28,63	13,63	+0,46	+1,76	+0,66	13,17	15,39	12,97
	0,20	30,15	15,15	+0,35	+1,33	+0,50	14,80	16,48	14,65
	0,30	32,26	17,26	+0,19	+0,75	+0,29	17,07	18,01	16,97
	0,40	33,42	18,42	+0,11	+0,43	+0,16	18,31	18,35	18,26
	0,50	34,11	19,11	+0,06	+0,25	+0,10	19,05	19,36	19,01

Kurverne er på fig. 7 optegnet på samme måde som i de foregående eksempler.



figur 7

Konklusion

De udledte formler og eksemplerne viser, at man skal være opmærksom på følgende forhold:

- 1) Når et jernbetondæk eller -væg bryder helt igennem den ydre isolering, er fremspringet foran facaden uden væsentlig betydning - det er endog sandsynligt, at et kraftigt fremspring vil dæmpe kuldebroen lidt.
- 2) Det almindelige middel mod kuldebroer - nemlig opsætning af en isolering eller et panel på langs - nedsætter ikke varmetabet i særlig høj grad. Iøvrigt er varmetabet af ret ringe størrelsesorden.
- 3) Ovennævnte foranstaltning medfører en væsentlig lavere temperatur under isoleringen og dermed en fare for kondensdannelse i denne.
Overfladetemperaturen, hvor isoleringsbræmmen afsluttes, bliver ligeledes en del lavere (i eksemplerne ca. 3,5)

Har man 20° C og 60 % relativ fugtighed er dugpunktstemperaturen ca. 12° C. Heraf ses:

for eksempel 1, hvor væggen er ubeskyttet på begge sider, er temperaturen under 12° C på en bredde af kun 4 cm

for eksempel 4, hvor den ene side har en let isolering, vokser denne bredde til ca. 6 cm

for eksempel 3, hvor der tillige på den anden side er en bræmme af kraftig isolering, udvides det kritiske område til ca. 18 cm.

Det vil sige, at en såkaldt "dugisolering", der er ret bekostelig i opsætning, har til følge, at de lave temperaturer trækkes længere ind i bygningen og dermed i ganske betydelig grad udvider det område, hvori kondensering kan forekomme.

En kraftig isolation er der i hvert fald ingen mening i at anvende, da tillige den varmemæssige gevinst er betydningsløs i forhold til omkostningen.

Ved kuldebroer af den her omhandlede type bør man sikkert koncentrere sig om at træffe forholdsregler ud fra eet af følgende to principper:

1) Fremskaffelse af en overflade, der tåler de lave temperaturer med eventuelle deraf følgende fugtdannelser, uden at der sker skade eller misfarvninger.

2) Opsætning af et materiale, der besidder evnen til i ekstreme tilfælde at suge fugtigheden fra overfladen, som derved skånes for misfarvninger.

Dette materiale må kun have en moderat isolerende virkning, idet en for kraftig isolering vil øge kondensdannelsen inde i materialet og tillige bevirke, at temperaturovergangen på overfladen vil blive for brat, hvor isoleringen holder op.

Der må i hvert enkelt tilfælde foretages undersøgelse af temperaturforløbet samt en nøje undersøgelse af de ved brugen forekommende relative fugtighedsprocenter, inden man træffer valget mellem de 2 metoder.

En ofte anvendt foranstaltning er opsætning af en bræmme af 1/2" blød fiberplade med net og puds. Denne fremgangsmåde svarer nogenlunde til 2), og den har også i praksis vist sig at være tilfredsstillende. Et uorganisk materiale ville dog være mere tiltalende.

Ved pudsfri betonflader kan denne metode ikke anvendes. Opsætning af panel eller lignende må man sikkert advare imod.

I "Arbejderbo"s bebyggelse "Strandhaven", der er et pudsfrit elementbyggeri, er der kraftige kuldebroer i dækkene udfor altangangene. Overfladerne er her behandlet med oliemaling, og det oplyses, at der hidtil ikke har været mærkbare ulemper.

English summary

Cold-conductors in walls and floors.

In modern buildings constructed of reinforced concrete, special problems arise where walls and floors project wholly or partly through the insulation of the outer walls. This occurs, for instance, in the case of balconies. Such projecting structural members are called "cold-conductors", and their detrimental effect, besides causing a certain heat loss from the building, is that the temperature of the inner surface of the wall may be lowered so much that condensation can take place, and, in buildings where the walls are not covered with a layer of plaster, which to a certain extent will absorb damp, moisture may actually be formed.

This paper evolves a theoretical basis for calculations of the following: -

1. The amount of heat lost through such cold-conductors.
2. The temperature distribution in the neighbourhood of cold-conductors, and
3. The effectiveness of the usual preventive measures, that is, insulating the structural parts in the vicinity of the cold-conductor.

The differential equation for two-dimensional heat flow is

$$\frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} = 0$$

and in order to solve this, the following assumptions are made: -

1. That the temperatures inside and outside the wall are constant, which means that heat flow and temperature distribution are constant.
2. That the temperature in an arbitrary section of the projecting

wall or floor parallel to the face of the building is constant and equal to a mean temperature so that the isotherms are straight lines perpendicular to the projecting member. A correction is introduced later to compensate for the error so introduced.

3. That there is no heat exchange where the wall or floor projects through the insulation.

Two general cases are examined, and in the equations evolved, the following symbols have been used.

t The temperature at any arbitrary point of the projecting member in $^{\circ}\text{C}$ above the outside temperature.

T The inside temperature, also measured in $^{\circ}\text{C}$ above the outside temperature.

λ The thermal conductivity of the member.

$\alpha_i, \alpha_m, \alpha_u$. The average of the surface heat transfer coefficients of the two faces of the member in the inner, middle and outer zones respectively.

m, f The lengths of the middle and outer zones.

h, b The thicknesses of the member and the insulated outer wall.

Case A. A projecting member with two zones, (see fig.2) an inner zone with a constant surface heat transfer coefficient to the warm region, and an outer zone to the cold region.

The temperatures in the inner and outer zones, t_i and t_u are given by equations 3 and 4 respectively, and the constants A, B, t_1 and t_2 are given by equations 5, 6, 7 and 8 while the heat-flow Q is given by equation 9.

Case B. A projecting member with three zones, (see fig. 3) an inner and outer zone as before, and an intermediate zone with heavy insulation in the warm region.

The temperatures of the three zones t_i, t_m and t_u are given by equations 10, 12 and 15, and the constants in these equations, A, B, D, E, t_1, t_2 and t_3 by equations 5, 6, 13, 14, 19, 20 and 21 while the heat flow Q is given by equation 22.

The mean temperatures so found are used to determine the variation of temperature parallel to the face of the wall by means of the complete

differential equation as in fig. 4, after which the deviation of the mean from the surface and internal temperatures is found from equations 25, 26 and 27.

Calculations are made for four examples. Metric units are used, and the dimensions of the thermal conductivity λ and the surface heat transfer factor α are in

$$\frac{\text{Kg cal} \cdot \text{m thickness}}{\text{m}^2 \text{ area} \cdot \text{hours} \cdot \text{°C temperature difference}}$$

and

$$\frac{\text{Kg cal}}{\text{m}^2 \text{ area} \cdot \text{hours} \cdot \text{°C temperature difference}}$$

Example 1. See fig. 5. This corresponds to a wall passing right through an outer insulated wall.

Example 2. As in example 1, except that the wall does not project from the outer surface. The temperature curves are not drawn, but it is shown that this design transmits a little less heat than in example 1.

Example 3. See fig. 6. This corresponds to a floor passing right through an outer wall to form a balcony, protected by insulation for 20 cm immediately inside the outer wall.

Example 4. See fig. 7. As in example 3, but without the protective insulation.

These examples show the following.

1. When the insulating layer of a wall is pierced, the length of the projecting part out from the face of the wall is not of great importance. It is even possible that a greater amount of projection will slightly diminish the effect of the cold-conductor.
2. That the usual practice of insulating the cold-conductor along the inner face of the outer wall does not reduce the heat loss in any great degree. The heat loss is, in any case, of a relatively small order.
3. That the usual practice as stated above leads to a perceptibly lower

temperature under the insulation, and the consequent danger of moisture forming there. The surface temperature will also be appreciably lower at the point where the insulation ends.

Conclusion.

The conclusion reached in this paper is not that nothing should be done to prevent the ill effects of cold conductors, but that it is important to understand which changes in the temperature conditions that protective measures of the kind discussed here will cause.

If, for each individual case, the expected moisture and temperature conditions can be determined, there appears to be two approaches to this problem: -

1. to use or develop a surface material capable of withstanding low temperatures without sustaining damage or discoloration, or
2. to cover the cold regions with a material which combines the lowest possible insulative value with the ability, under extreme conditions of absorbing moisture from the surface, thus preventing discoloration there.

In Danish domestic building constructions, good results have been obtained, for example, by applying oil paint directly to the raw concrete, which corresponds to method 1 as stated above, or as an example of method 2, the use of 1/2" fibre board with netting and plaster. In both these cases, the buildings were heated by conventional radiators.

PUNKTFORMIGE KULDEBROER

Punktformige kuldebroer.

De senere års udvikling på facadekonstruktionernes område går i retning af rationelt fremstillede facadeelementer, hvor man med det mindst mulige materialeforbrug søger at opnå en ydervæg, der er tilstrækkelig god med hensyn til varmetransmission, styrke samt tæthed overfor vind og fugtighedsvandringer.

Bestræbelserne har i princippet ført henimod den tredelte sandwichkonstruktion med et højisolerende materiale beliggende mellem et ydre og et indre betonstøbt lag.

Denne konstruktion varieres på utallige måder afhængig af facadens funktion, den enkelte konstruktørs synspunkter og samvittighed og bygherrens økonomiske muligheder. Der tænkes her på valg af bærende lag - udvendigt eller indvendigt - eventuelt indskudte ventilerede eller afdrænede hulrum eller indskudte damptætte lag o.lign.

Fælles for de fleste er, at den samlede tykkelse pines stadig længere ned, hvorved afstanden mellem et tyndt udpræget koldt og et tynt udpræget varmt lag bliver ret ringe.

For at bevare sammenhæng og stabilitet i sådanne konstruktioner, er det nødvendigt at forbinde de to støbte lag i højere grad. Dette kan ved de lidt kraftigere konstruktioner ske ved udførelse af kantribber, mens det ved anvendelse af tyndere betonlag er nødvendigt at etablere mere tætsiddende forbindelser mellem de to flader ved et system af ståltrådsbindere gennem isoleringslaget.

Varmetabsmæssigt er disse stritter vel af ringere betydning end f.eks. kantribber ville være det. Ståltrådsbinderne er jo velkendte fra almindelige hulmurkonstruktioner, hvor deres anvendelse ikke har frembudt væsentlige ulemper, hvilket vel skyldes den jævne fordeling af varmeledningsmodstand samtidig med, at der alt i alt er mere materiale og dermed større varmekapacitet til stede.

Ved mange af de moderne konstruktioner har tilstedeværelsen af disse stritter derimod givet anledning til ulemper i form af aftegninger på ydervæggens indvendige eller udvendige sider som følge af de bratte overfladetemperaturvariationer og de deraf følgende ændringer i materialefugtighed.

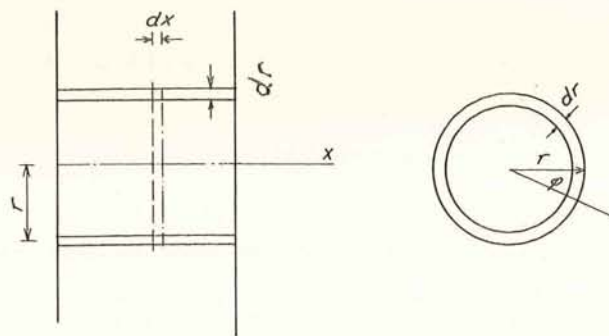
Der er derfor god grund til at beskæftige sig lidt nærmere med dette problem.

I det følgende er der gjort en del teoretiske betragtninger med følgende formål:

- 1) at opnå en bedre forståelse af temperaturforhold og varmestrømningsmæssige forhold omkring en sådan stritte,
- 2) at efterspore forholdsregler til formindskelse eller undgåelse af de uheldige virkninger
- 3) at nå frem til et grundlag, på hvilket eventuelle praktiske forsøg til yderligere belysning af disse problemer kan tilrettelægges.

Differentialligningen for punktsymmetrisk varmestrømning.

Varmestrømmen omkring en stritte, der går igennem et materiale parallelt med varmestrømningens hovedretning kan betragtes som en tredimensional varmestrømning, der er symmetrisk omkring strittens længdeakse.

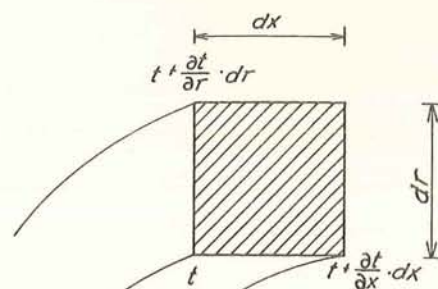


figur 1

Differentialligningen for strømningen bliver derfor todimensional, og den kan udledes på følgende måde (se fig.1):

I det på fig.1 skitserede koordinatssystem varierer temperaturen med x og med r , men - på grund af symmetrien - ikke med φ

Udskæres en cirkelring med radius r - bredden dr - tykkelse dx , kan man opskrive betingelsen for, at der i denne ikke ophobes eller produceres varme (se fig.2):



figur 2

$$2 \pi \lambda (r+dr) dx \left(\frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} dr \right) \div 2 \pi \lambda r dx \frac{\partial t}{\partial r} \\ + \lambda \cdot \pi (dr^2 + 2rdr) \left(\frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} dx \right) \div \lambda \cdot \pi (dr^2 + 2rdr) \frac{\partial t}{\partial x} = 0$$

som sammentrækkes til:

$$\boxed{r \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} \right) = - \frac{\partial t}{\partial r}} \quad (1)$$

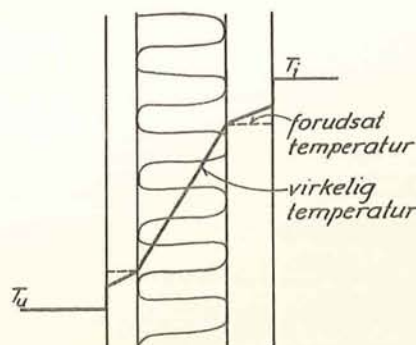
I det følgende vil vi beskæftige os med en sandwichkonstruktion bestående af en ydre og en indre betonskal, hvorimellem isoleringslaget og eventuelt et luftmelletrum findes.

En bestemmelse af temperaturforløbet gennem de 3 materialer - stål, beton og isoleringslag - ved hjælp af (1) er ikke mulig. Da imidlertid de 3 indgående materialer har varmeledningstal af 3 forskellige størrelsesordener - nemlig henholdsvis ca. 56, ca. 1,3 å 1,8 og 0,03 å 0,1 - kan der gøres en række forenkende forudsætninger, der ikke vil forvrænge resultatet væsentligt.

Der er her gjort følgende forudsætninger:

- 1) Da temperaturfaldet gennem betonskallerne er ganske ringe, regnes der med, at temperaturen i et vilkårligt punkt er den samme på den udvendige og den indvendige side af hver af de to betonskaller. Sættes denne temperatur lig den temperatur, der beregnes for den mod isoleringslaget vendende side, vil dette sige, at man beregningsmæssigt betragter skallerne som modstandsløse overfor varmegennemgang vinkelret på væggen, idet der samtidig gøres et fradrag på overgangstallene til overfladen.

Dette er demonstreret på fig.3 for en væg uden stritte.



figur 3

- 2) For en uendelig stor væg uden kuldebroer kan man beregne forløbet af temperaturkurven under forudsætning 1) og vi giver denne temperaturkurve betegnelsen t - og temperaturen for henholdsvis ydre og indre skal betegnelserne t_u og t_i .

Tænker man sig nu, at der i konstruktionen anbringes en stritte, vil der ske følgende:

I den ydre, kolde skal vil temperaturen hæves til $t_u + \tau_u$. Et vilkårligt arealelement dF af ydersiden, der tidligere afgav varmemængden $\alpha_u (t_u - T_u) dF$, afgiver nu varmemængden $\alpha_u (t_u + \tau_u - T_u) dF$ altså et tillæg på

$$\Delta Q_u = \alpha_u \cdot \tau_u dF \quad (2)$$

i afgivet varme.

I den indre, varme skal vil temperaturen falde til $t_i - \tau_i$. Et vilkårligt arealelement dF af indersiden, der tidligere modtog varmemængden $\alpha_i (T_i - t_i) dF$ modtager nu varmemængden $\alpha_i (T_i - t_i + \tau_i) dF$ - altså et tillæg på

$$\Delta Q_i = \alpha_i \tau_i dF \quad (3)$$

i modtaget varme.

Igennem isoleringslaget ændres temperaturfaldet fra $t_i - t_u$ til $t_i - \tau_i - (t_u + \tau_u) = (t_i - t_u) - (\tau_i + \tau_u)$. Den varmemængde, der går gennem isoleringslaget, reduceres altså med

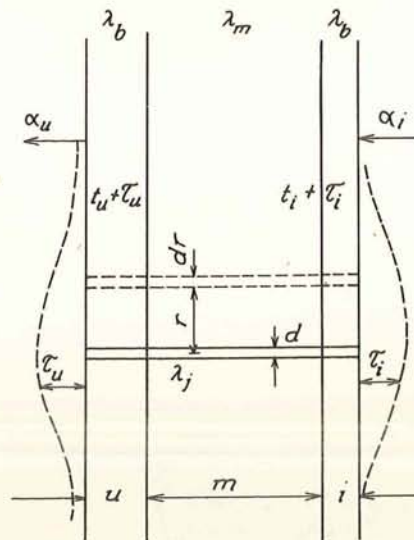
$$\Delta Q_m = \frac{\lambda_m}{m} (\tau_i + \tau_u) dF \quad (4)$$

Det vil sige, at varmestrømningerne i de to betonlag er bestemt ved forløbet af τ_i og τ_u .

- 3) Da stålets varmeledningstal er meget stort i forhold til isoleringslagets, kan det med god tilnærmelse forudsættes at stritten er varmetæt adskilt fra isoleringen. Herved bliver varmestrømmen gennem stritten

$$Q_j = \frac{\lambda_j}{m} \cdot f \left((t_i - t_u) - (\tau_i - \tau_u) \right) \quad (5)$$

Under disse forudsætninger kan man udlede differentialligningerne for temperaturændringerne τ_u og τ_i henholdsvis den ydre og den indre skal (se fig.4).



figur 4

For den ydre skal gælder:

En cylinderring med radius r og tykkelse dr afgiver ekstra parallelt med frembringerretningen:

$$dQ = 2\pi r dr \left(\alpha_u \tau_u + \frac{\lambda_m}{m} (\tau_i + \tau_u) \right) \quad (6)$$

radiært modtages ekstra varmemængden

$$dQ = 2\pi r u \lambda_b \cdot \frac{d^2 \tau_u}{dr^2} \cdot dr \quad (7)$$

og (6) og (7) fås:

$$\frac{d^2 \tau_u}{dr^2} = \frac{1}{u \lambda_b} \left(\alpha_u \tau_u + \frac{\lambda_m}{m} (\tau_i + \tau_u) \right) \quad (8)$$

For den indre skal gælder tilsvarende:

Der modtages ekstra parallelt med frembringerretningen

$$dQ = 2\pi r dr \left(\alpha_i \tau_i + \frac{\lambda_m}{m} (\tau_i + \tau_u) \right) \quad (9)$$

og der afgives ekstra radiært:

$$dQ = 2\pi r i \lambda_b \frac{d^2 \tau_i}{dr^2} \cdot dr \quad (10)$$

af (9) og (10) fås

$$\frac{d^2 \tau_i}{dr^2} = \frac{1}{i \lambda_b} \left(\alpha_i \tau_i + \frac{\lambda_m}{m} (\tau_i + \tau_u) \right) \quad (11)$$

Det bemærkes, at τ_i er en temperatursankning mens τ_u er en temperaturforøgelse.

(8) og (11) skrives:

$$\frac{d^2 \tau_u}{dr^2} = \tau_i \frac{\lambda_m}{m u \lambda_b} + \tau_u \left(\frac{\alpha_u}{u \lambda_b} + \frac{\lambda_m}{m u \lambda_b} \right) \quad (8a)$$

$$\frac{d^2 \tau_i}{dr^2} = \tau_i \left(\frac{\alpha_i}{i \lambda_b} + \frac{\lambda_m}{m i \lambda_b} \right) + \tau_u \cdot \frac{\lambda_m}{m i \lambda_b} \quad (11a)$$

Anvendes en god isolering ($\lambda < \text{ca. } 0,1$) er leddene

$$\frac{\lambda_m}{m u \lambda_b} \text{ og } \frac{\lambda_m}{m i \lambda_b} \text{ kun nogle få procent af leddene } \frac{\alpha_u}{u \lambda_b} \text{ og } \frac{\alpha_i}{i \lambda_b}$$

og der begås ikke nogen større unøjagtighed ved at se helt bort fra disse led. Det vil varmestrømningsmæssigt sige, at man regner med at skillefladerne mellem isolering og beton er varmetætte overfor de af kuldebroen forårsagede temperaturændringer.

Ved således at "lukke af" for den ene af overfladerne vil man beregningsmæssigt komme til, at kuldebroens virkning breder sig over en smule større område end i virkeligheden. Forudsætningen er således lidt "på den sikre side". Differentialligninger forenkles herafter til:

$$\frac{d^2 \tau_u}{dr^2} = \frac{\alpha_u}{u \lambda_b} \cdot \tau_u = U \cdot \tau_u \quad (8b)$$

$$\frac{d^2 \tau_i}{dr^2} = \frac{\alpha_i}{i \lambda_b} \cdot \tau_i = I \cdot \tau_i \quad (11b)$$

Løsningerne bliver af formen:

$$\tau_u = A \cdot e^{-r\sqrt{U}} \quad (12)$$

$$\tau_i = B \cdot e^{-r\sqrt{I}} \quad (13)$$

A og B bestemmes ved at sammenligne følgende varmemængder:

1) tillægsvarmemængde gennem inderflade:

$$\Delta Q_1 = 2\pi\alpha_i \int_0^\infty r \tau_i dr = 2\pi\alpha_i \frac{B}{I} = Q_s$$

2) tillægsvarmemængde gennem yderfladen:

$$\Delta Q_2 = 2\pi\alpha_u \cdot A \int_0^\infty r \tau_u dr = 2\pi\alpha_u \cdot \frac{A}{U} = Q_s$$

3) den gennem stritten transporterede varmemængde: Q_s

heraf fås
$$A = \frac{Q_s}{2u \cdot \lambda_b \cdot \pi} \quad (14)$$

$$B = \frac{Q_s}{2i \lambda_b \cdot \pi} \quad (15)$$

For den gennem stritten transporterede varmemængde har man:
temperaturforskul mellem enderne:

$$\Delta T = t_i - t_u - (A+B) = \Delta t - \frac{Q_s}{2\lambda_b \pi} \cdot \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{u}\right)$$

$$\text{hvoraf } Q_s = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\lambda_j}{m} \left(\Delta t - \frac{Q_s}{2\lambda_b \pi} \cdot \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{u}\right) \right)$$

$$\text{og } Q_s = \Delta t \frac{1}{\frac{4m}{\pi d^2 \lambda_j} + \frac{1}{2\lambda_b \pi} \left(\frac{1}{i} + \frac{1}{u}\right)} \quad (16)$$

d.v.s.

$$A = \Delta t \frac{1}{\frac{8um}{d^2} \frac{\lambda_b}{\lambda_j} + \frac{u+1}{i}} \quad (17)$$

$$B = \Delta t \frac{1}{\frac{8im}{d^2} \frac{\lambda_b}{\lambda_j} + \frac{i+1}{u}} \quad (18)$$

I ovenstående udtryk er der regnet med, at stritten er indstøbt i hele betonlagets tykkelse for såvel indre som ydre lag.

Såfremt indstøbningslængden er mindre end lagtykkelsen kan man blot tænke sig, at varmemodstanden for den udenfor strittens endepunkt liggende beton medregnes i overflademodstanden. Men dette har ingen betydning ved udledningen af ovenstående udtryk, hvor modstanden for hele betonlagets tykkelse er medregnet i overflademodstanden. Man kan altså uden videre i disse formler sætte:

i = indstøbningslængden i den indre plade = S_i

u = indstøbningslængden i den ydre plade = S_u

når blot man tager hensyn til at varmeledningstallet overfor strømning i pladernes plan ændres tilsvarende, således at man for den indre plade

$$\text{erstatter } \lambda_b \text{ med } \lambda_b \cdot \frac{i}{S_i}$$

og for den ydre plade

$$\text{erstatter } \lambda_b \text{ med } \lambda_{bu} = \lambda_b \cdot \frac{u}{S_u}$$

De fuldstændige udtryk for temperaturfordelingen omkring en stritte bliver herefter:

$$\tau_u = \Delta t \frac{1}{\frac{\delta m u}{d^2} \frac{1}{\lambda_j + \frac{S_u}{S_i} + 1}} \cdot e^{-r \frac{1}{u} \sqrt{\frac{\alpha_u \cdot S_u}{\lambda_b}}} \quad (19)$$

$$\tau_i = \Delta t \frac{1}{\frac{\delta m i}{d^2} \frac{1}{\lambda_j + \frac{S_i}{S_u} + 1}} \cdot e^{-r \frac{1}{i} \sqrt{\frac{\alpha_i \cdot S_i}{\lambda_b}}} \quad (20)$$

- 1) Hvis $S_u \gg S_i$ bliver temperaturændringen stor i den indvendige plade, lille i den udvendige plade. Det omvendte er tilfældet, hvis $S_i \gg S_u$.

Sagt med jævne ord vil dette sige, at strittens temperatur vil nærme sig temperaturen for den plade, hvori den har størst indstøbningslængde.

- 2) Max. temperatursænkningen aftager med voksende betontykkelse.
- 3) Temperaturændringens udbredelsesområde i betonen vil for hver enkelt plade vokse med betontykkelsen og aftage med indstøbningslængden.

Forudsætningen for (19) og (20) er at stritten er retlinet og $S_u > u$ og $S_i > i$.

Større indstøbningslængder end tykkelser må forudsætte f.eks. en spiraludformning af stritten, hvorved de matematiske forudsætninger bliver for komplicerede.

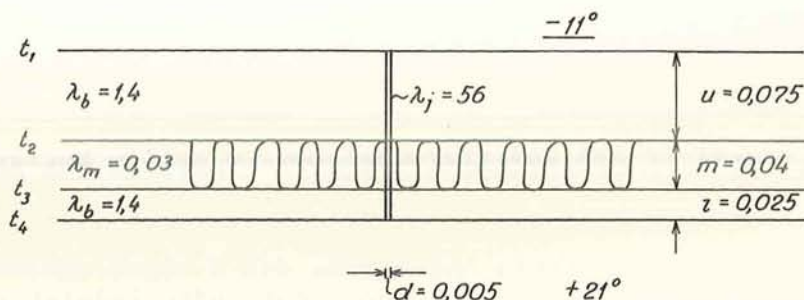
Det er dog sandsynligt, at udtrykkene i så tilfælde har den

samme form, hvilket eventuelt må kunne eftervises ved forsøg.

I de følgende eksempler regnes der med, at indstøbningslængderne kan varieres frit.

Til påvisning af indstøbningslængdernes betydning er der i det følgende gennemregnet 2 eksempler med en konstruktion, der svarer til den, hvormed der i øjeblikket foretages forsøg på Danmarks Tekniske Højskole:

Eksempel 1 se fig.5.



figur 5

først bestemmes den normale temperaturkurve:

	Δt	t	
$M = 0,143$	$2^{\circ},7$	$\div 8^{\circ},3$	$= t_1$
$+ \frac{0,075}{1,4} = 0,054$	$1^{\circ},0$	$\div 7^{\circ},3$	$= t_2$
$+ \frac{0,04}{0,03} = 1,333$	$25^{\circ},2$	$+ 17^{\circ},9$	$= t_3$
$+ \frac{0,025}{1,4} = 0,018$	$0^{\circ},4$	$+ 18^{\circ},3$	$= t_4$
$+ \underline{0,143}$	$2^{\circ},7$		
$\underline{M = 1,691}$			

$$k = 0,592$$

i formlerne regnes herefter med:

$$t_u = t_2 = \div 7^{\circ},3 \quad \alpha_u = 0,592 \frac{32}{3,7} = 5,12$$

$$t_i = t_3 = + 17^{\circ},9 \quad \alpha_i = 0,592 \frac{32}{3,1} = 6,10$$

$$\Delta t = 25^{\circ},2$$

idet $S_u = u$ og $S_i = i$ fås ved indsættelse i (19) og (20):

$$\tau_u = 0,90 \cdot e^{\div 6,95 r}$$

$$\tau_i = 2,70 \cdot e^{\div 13,2 r}$$

Målinger på forsøgsopstillingen gav følgende resultater (tilsvarende beregnede værdier er gentaget i parentes):

$$t_1 = \div 7,8 (\div 8,3); \quad t_2 = \div 7,2 (\div 7,3); \quad t_3 = + 18,1 (+ 17,9);$$

$$t_4 = + 18,6 (+ 18,3)$$

samt følgende temperaturændring på overfladen udfor stritten

$$\max \tau_u = 0,7 (0,90)$$

$$\max \tau_i = 2,8 (2,70)$$

Det ses, at der er ret god overensstemmelse mellem beregning og forsøg.

Eksempel 2 svarer til eksempel 1, blot forøges den indre indstøbningslængde til $S_i = 0,22$ m f.eks. udformes stritten som en spiral med ca. 5 cm diameter. Den udvendige indstøbningslængde ændres til $S_u = 0,03$ m. Tilsvarende forsøg er endnu ikke udført.

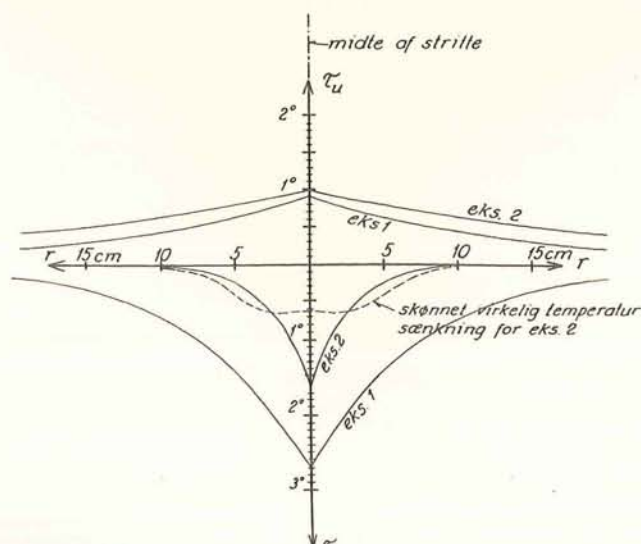
Ved indsættelse i (19) og (20) fås

$$\tau_u = 1,0 \cdot e^{\div 4,4 r}$$

$$\tau_i = 1,64 \cdot e^{\div 39,1 r}$$

d.v.s. den maximale temperatursænkning i inderfladen er gjort en del mindre ved ændringen af indstøbningslængderne.

På fig.6 er indtegnet temperaturkurverne for de 2 eksempler, hvorved også ses, at temperatursænkningen svinder væsentlig hurtigere bort på den indvendige flade i eks. 2.



figur 6

En spiraludformning giver sig imidlertid ikke udtryk i formlerne. I virkeligheden skal størstedelen af den varmemængde, stritten transporterer, afgives gennem arealet udfor spiralen, på hvilket der må være nogenlunde konstant temperatur. Under forudsætning af, at denne varmemængde bliver som beregnet, er på figuren med punkteret linie antydnet den virkelige temperaturkurve, ifølge hvilken den maximale temperatursenkning bliver væsentlig mindre end ovenover beregnet.

Konklusion.

Konklusionen af foranstående teoretiske betragtninger samt eksemplerne synes at være følgende ganske enkle regel:

Såfremt det er nødvendigt, at forbinde en varm og en kold plade med stritter, og man vil formindske risikoen for "temperaturpletter" i den ene af pladerne, skal man sørge for at strittens indstøbningslængde i den pågældende plade gøres stor, mens den i den anden plade gøres så lille, som det udfra konstruktive krav er muligt.

I praksis har man hidtil haft følgende 2 tilfælde af ulemper:

- 1) Indvendige fugtpletter ved stritter i konstruktioner med en indvendig tynd skal.

Dette skulle kunne bekæmpes ved at gøre indstøbningslængden i den indvendige flade stor f.eks. ved en spiraludformning af stritten - samtidig må indstøbningslængden i den udvendige skal gøres kort f.eks. med en kort hage om en tværpind af et mindre ledende materiale.

- 2) Udvendige udtøringspletter ved stritter eller bæreankre i konstruktioner med udvendig tynd skal.

Dette skulle kunne bekæmpes ved en tilsvarende foranstaltning, d.v.s. stor indstøbningslængde i ydre skal og kort kraftig indstøbning i indre skal.

English summaryCold spots on outside walls.

In modern building constructions, where the outer walls consist of two layers of concrete and an intermediate section of a soft highly insulating material, it is usually necessary to connect the two concrete layers by steel tie-bars, and the high conductivity of these ties causes local temperature variations on the surface of the wall. Such temperature variations are accompanied by corresponding variations in the moisture content of the concrete, and this appears in the form of discoloured spots.

Some purely theoretical considerations of this problem are made in this paper with a view to the following: -

1. to reach a better understanding of the conditions governing the temperature distribution and heat transmission at such cold spots.
2. to discover preventive methods for minimising or avoiding the undesirable effects, and
3. to obtain facts on which practical research for the further examination of this problem may be based.

The complete equation for two-dimensional point-symmetrical heat flow is given by equation (1).

See also fig. 1.

In order to solve this equation, the following assumptions have been made.

1. The temperature gradient through the concrete layers is taken to be zero, and the errors so introduced are compensated for by corresponding corrections to the surface heat factors.
2. It is shown that in the derivation of the equations it is sufficient to consider the temperature variations in relation to an imaginary construction without steel ties.
3. There is no heat exchange between the ties and the insulation material.

Expressions for the rise in temperature on the outer face, \bar{t}_u , and the fall in temperature of the inner face, \bar{t}_i , are then found, respectively equations 19 and 20.

The symbols used in these expressions are explained in fig. 4 where

λ = thermal conductivity

α = surface heat transfer coefficient

Q = heat quantity

and the suffixes i, u, and b, j, m refer to inner, outer, and concrete, steel, insulation material.

From these equations we can now see: -

1. The temperature variation in one of the layers becomes greater when the embedded part of the tie in the other layer is made longer, that is to say that the temperature of the tie approaches the temperature of the layer in which it is embedded deepest.
2. The temperature variation decreases as the thickness of the concrete layer increases, and
3. The area over which there is a variation in temperature increases with the thickness of the concrete layer, and decreases as the embedded depth of the tie is increased.

The equations are applied to two examples, corresponding to constructions being examined at the present moment at Danmarks tekniske Højskole in Copenhagen (The technical University of Denmark).

Example 1, see fig. 5.

Example 2, as in example 1, the embedded depths being altered to 15 cm in the inner layer and 3 cm in the outer layer.

The dimensions on the figure are in metres, the thermal conductivity

λ is in $\frac{\text{Kg calorie} \cdot \text{m thickness}}{\text{m}^2 \text{ area} \cdot \text{hours} \cdot \text{°C temperature difference}}$

and the surface heat transfer coefficient

α is in $\frac{\text{Kg calorie}}{\text{m}^2 \text{ area} \cdot \text{hours} \cdot \text{°C temperature difference}}$

The corresponding temperature curves have been calculated, and are shown in fig. 6, and these results are in good agreement with those of the practical examination mentioned above.

In example 2, the embedded length of the tie in the inner layer is greater than the thickness of the layer itself, and this makes it necessary to twist the embedded part into some sort of a spiral. This is not taken into account in the equations, and means that the heat is transmitted from a larger area than was assumed, and therefore presumably, the maximum temperature variation will be less than that calculated.

The conclusion that these theoretical considerations would appear to lead to can be expressed in the following simple rule:

If it is necessary to connect two wall layers of different temperatures by steel ties passing through an insulating layer, and it is desired to avoid moisture spots in one of the layers, the embedded length of tie in that layer must be as great as possible while that in the other layer is made as short as possible consistent with the structural requirements.

h) Vejrligets indflydelse

INDLEDNING

Et facadeelement af beton, der indgår i et bygværk, vil i tidens løb undergå større eller mindre forandringer i sit udseende, som følge af vejrligets indflydelse på elementet. Det kan være forandringer, som kun er af ren midlertidig art, som f. eks. fugtpletter forårsaget af at materialerne på forskellige steder suger vandet forskelligt; men det kan også være forandringer af mere stadig karakter. Det gælder således de varige misfarvninger af betonelementer, der dels kan skyldes, at en eller flere af vejrfaktorerne i forening har transporteret snavs hen på bygværket, dels at de har påvirket de i elementet indgående bestanddele på en sådan måde, at disse har forandret udseende. De varige forandringer af elementet kan dog også være af en sådan art, at der ligefrem er tale om en nedbrydning af bestanddelene, således at elementets holdbarhed formindskes.

De vejrfaktorer, der er tale om, er: Vind, sol, frost og regn, og de af luft og regn tilførte stoffer, der kan virke misfarvende eller nedbrydende. Deres virkninger er i nogen grad forskellige, og i virkeligheden fremkommer påvirkningerne på betonen vel oftest ved et sammenspil mellem dem. Den faktor, man her i landet sporer mest, er sikkert regnvandet, der må bære hovedskylden for de fleste misfarvninger af facadeelementer. Først når regnvandet træder i forbindelse med frosten, får man en mere dybgående ødelæggelse, der i høj grad kan være bestemmende for elementets levetid.

MISFARVNINGER.

Ved misfarvninger forstås de ændringer, fremkaldt ved lysets og vejrligets påvirkning, der efter bygværkets fuldførelse med tiden viser sig i elementets farvetoning. Påvirkningerne består i, at en forholdsvis ren og pæn overflade enten skæmmes af pletter og striber eller afbleges, eventuelt begge dele. Der ses altså bort fra uregelmæssigheder i udseendet hidrørende fra mindre pletter og striber, som skyldes fabrikation og montage (f.eks. pletter fra formolie o.l.). Det skal straks slås fast, at med denne definition på misfarvninger vil vejrfaktorerne ofte have en gavnlig virkning på formoliepletter og -striber, idet regn og navnlig sne og slud med tiden fjerner dem.

De forhold, der har betydning for misfarvningernes art og udbredelse, er mangeartede og kan skyldes såvel selve elementet som rent ydre forhold.

Her skal betragtes følgende:

1. Overfladens glathed.
2. Overfladens udformning.
3. Elementets nærmeste omgivelser.
4. Vindretningen.
5. Bygværkets placering.
6. Solen.
7. Cementsorterne (farvede cementer).

Overfladens glathed.

Det er vigtigt for at få så små misfarvninger som muligt, at have en tæt og jævn overflade, fri for huller og revner, store såvel som små. Karakteren af et betonelements overflade er i høj grad afhængig af elementets fabrikationsmåde. Støbes dette med facaden ned mod formen, hvad der er det almindeligste, bliver overfladen i reglen tæt og glat, medens det i tilfælde, hvor det er nødvendigt at støbe elementet lodret, næsten er umuligt helt at undgå små huller og blærer. Dette giver sig tydeligt udslag i elementernes modtagelighed for snavs. Det glatte element er betydeligt renere end det "hullede". Som eksempel kan anføres mange altanbrystningspartier med påstøbte blomsterkasser, hvor blomsterkasseelementet er støbt lodret og ses at være betydeligt mere snavset end de tilstødende partier, der er støbt med facaden ned mod formen. - Det glattest mulige element får man, når man efter støbningen sliber og spartler elementet, og det viser sig også, at under iøvrigt lige forhold holder et sådant element sig længere rent.

Svumning af overfladen skulle gøre denne mere tæt og dermed mindre modtagelig for snavs, hvad der vel også må siges at være tilfældet. Dog kan der være grund til at gøre opmærksom på, at det naturligvis er en betingelse, at svumningen udføres på en sådan måde, at det ikke er den, der senere hen misfarves, f.eks. ved at den krakelerer, eller ved at den udføres med en beton af væsentlig anden sammensætning end grundbetonen, således at de to betoner fremtræder med forskellige farvenuance. Det kan således anføres, at en for fed svummemørtel med hvid cement har tendens til at blive ret mørk med tiden.

Det er ikke nogen betingelse, at overfladen fremtræder "spejlblank" for at undgå misfarvninger. Det vigtigste er, at den er fri for huller og revner. En afvasket eller afsyret, eventuelt sandblæst overflade, der ikke har tendens til krakelering, viser sig at kunne holde mindst lige så godt som en glat. Årsagen formodes at være en mindre kapillær sugning i overfladen, som følge af at hinden

af cementslam er fjernet. Kommer der af ydre årsager revner i denne overflade, samler snavset sig også her, og der fremkommer sorte striber.

Overfladens udformning.

Det er ikke alene som ovenfor beskrevet de fine revner og huller i betonen, der har betydning for dennes misfarvning; men det viser sig også, at større "uregelmæssigheder" i overfladen er af betydning. Ved større "uregelmæssigheder" menes her de forskellige mønstrede udformninger af overfladen, der efterhånden er blevet almindelige. På disse overflader viser regnens afvaskende og snavstransporterende egenskaber sig ofte med al tydelighed. Således ser man mange steder på det almindelige, bølgede profil, at bunden af bølgerne er helt sort, som en udtørret grøft, mens de fremstående partier er helt renvaskede. Tilsvarende forhold gør sig gældende, hvor der f. eks. langs elementets kant findes tilbageliggende bånd, eller på andre steder, hvor mønstret afgøres af forsænkede partier. De steder, hvor slagregnen rigtig falder ind, vaskes rene, medens de i ly værende dele virker som samlesteder for snavset.

Snavsansamlinger behøver dog ikke alene skyldes regnvandet, men vinden kan også megel vel være af betydning. På disse forsænkede steder og navnlig i hjørner og kroge vil der ofte være læ, hvor de i luften værende urenheder (støv og sod) kan lægge sig, hvorefter de i forbindelse med fugtighed kan sætte sig fast på overfladen. De fremstående partier vil derimod have tendens til at blæse rene. Snavsaflejringen gør sig i udstrakt grad gældende, hvor der i mønstrets udformning dannes vandrette hylder.

Elementets nærmeste omgivelser.

På de førømtalte blomsterkasseelementer vil man i reglen se en tydelig forskel i misfarvningen af selve blomsterkassen og den underliggende elementdel. Da hele elementet forudsættes støbt af een gang, kan denne forskel ikke skyldes betonen, men den må søges i det forhold, at selve blomsterkassen virker som en paraply for elementet nedenunder, således at dette praktisk talt aldrig bliver udsat for regnvandets vaskende virkning. Desuden vil der ofte være læ under blomsterkassen, således at støv har lettere ved at sætte sig her. Forholdet fremtræder klart under de fleste udvendige blomsterkasser, hvadenten disse er påstøbt elementet eller blot sat løst op bagefter. Det ses også, at misfarvningen i reglen aftager nedefter, efterhånden som der er større chance for, at regnen når ind på elementet.

En lignende indvirkning på misfarvningen af facadeelementerne har sålbænke og andre fremspringende genstande. Jo større fremspring des længere ned på elementet spores virkningerne. Ved sålbænke gør det specielle forhold sig meget ofte gældende, at en del af det vand, der samler sig på sålbænken, løber ud over enden på denne og ned ad facaden. Man kan da få to helt modsatte misfarvningsforhold frem. Hvis det er en sålbænk af beton, skifer, klinker e.l., vil man i reglen på facadeelementet få en ren stribe ved enderne af sålbænken, som følge af den rigelige vandmængde og den deraf følgende bedre afvaskning, der kommer her. Hvis det derimod drejer sig om en metalsålbænk, vil det vand, der løber ned ad facaden ved enderne, meget ofte indeholde opløste metalsalte, der vil have tendens til at afsættes på betonen, hvorved der dannes mørke skæmmende striber.

Tilsvarende forhold gør sig gældende ved f. eks. skiltebogstaver, der er gjort fast til facadeelementerne. Opløser regnvandet ikke noget af bogstaverne eller medtager det ikke på andre måder snavs fra disse, vil der ved de laveste punkter være lyse renvaskede striber på facaden. Medtager regnvandet derimod snavs, vil dette igen afsættes på betonen, og de fleste skjolder kommer under bogstavernes laveste punkter.

Der kan måske her være grund til at gøre opmærksom på, at mange af de ting, der forårsager misfarvninger af et facadeelement, meget ofte er selve bygværket uvedkommende og først er kommet til efter at huset var færdigt. Der tænkes her især på forskellige former for jernstativer, hvad enten disse bruges til at fastholde store neonskilte eller til at bære en lille blomsterkasse. Der vil næsten i alle tilfælde opstå skæmmende rustpletter på betonen på de steder, hvor disse jerngenstande kommer i forbindelse med betonen. Lignende forhold gør sig gældende med messing og kobber, hvor der kommer pletter af ir. Naturligvis kan disse misfarvninger give betonen en vis patina, som ikke behøver at virke skæmmende, bare man tager hensyn til deres fremkomst fra starten.

Vindretningen.

Da det som foran omtalt har afgørende betydning, hvordan regn og vind påvirker facaden, må man naturligvis vente sig de kraftigste virkninger af disse faktorer på sydvestvendte facader. Iøvrigt kan man fastslå, at de i læ værende dele af et facadeelement altid bliver mest snavsede, dels på grund af at støv aflejres her, og dels på grund af, at den afvaskende slagregn ikke når ind på elementdelen. Her kan henvises til "Shellhuset", hvor man i gavlen mod Kampmannsgade tydelig ser, hvorledes den misfarvede del af facaden bliver bredere nedefter i hjørnet, efterhånden som det overliggende bygværk virker som læskærm. Et andet

læfænomen kan man træffe, hvor man i en gade har en facade med fremspringende lodrette bånd. Her vil den del af båndet, der er parallel med facaden, være snavset, medens de dele, der er vinkelret på facaden, samt selve facaden i umiddelbar nærhed af båndet, vil være forholdsvis rene. Årsagen må være luftstrømningsforhold.

Bygværkets placering.

Større betydning end, hvor i bygværket det enkelte element er placeret, har det, hvor selve bygværket er placeret. Man kan således iagttage en væsentligt større misfarvning af de betonelementer, der indgår i bygningerne omkring bane-gårdsgraven ved Københavns Hovedbanegård, end på lignende elementer i bygninger andre steder i byen. Her er det røgen fra lokomotiverne, der gør sig gældende. Tilsvarende forhold kan undertiden iagttages i nærheden af varmecentralerne ved store boligkomplekser, hvor røgen fra skorstenen sværter de nærliggende facade-elementer.

Solen.

Når talen er om de farvede, men ikke hvide betoner, bliver sollyset en vejr-faktor, man også må regne med. Selv om man selvfølgelig må sørge for at bruge lysægte farvetilsætninger i sine cementsorter, hvad enten iblandingen sker på cementfabrikken, eller man selv sætter farvestoffet til ved betonens blanding, så kan man ikke i tidens løb undgå at farven afbleges noget, et forhold man bør være opmærksom på, når der indgår flere farver i den færdige facade.

Foruden ved sit lys har solen ved sin udtørrende virkning betydning for facadeelementernes misfarvning. Denne udtørrende virkning, den såkaldte krakelering, kan vise sig på alle betoner uanset farven, og den fremkommer navnlig på den friske beton. De små fine revner, der her dannes i betonoverfladen, bliver meget let sæde for snavs og støv. Krakelering kan også fremkaldes af vindens udtørring.

Cementsorterne (farvede cementer)

De misfarvningsforhold, der hidtil har været omtalt vil, når bortses fra sollysets afblegning, navnlig være fremtrædende på hvide facadeelementer.

Tilsmudsnings- og afvaskningsforholdene gør sig naturligvis også gældende ved den grå og de andre farvede cementer, og virkningerne bliver mere synlige, jo lysere facaden er. Ved disse elementer viser der sig imidlertid et andet

misfarvningsforhold, som ikke ses på de hvide facader, nemlig de såkaldte salpeterudslag. Herved forstås de hvide udblomstringer, hidrørende fra visse i cementen værende kalksalte, der kan fremkomme på betonoverfladen, når denne skiftevis er våd og tør. De er naturligvis i høj grad skæmmende på den farvede og da navnlig på den sorte beton. De vil imidlertid i reglen forsvinde efter nogen tids forløb, idet saltene efterhånden vaskes ud. Der kan her være grund til at advare mod at bedømme farven på en farvet beton i våd tilstand, da den egentlige farve altid vil blive lysere og virke noget afbleget, når betonen bliver tør.

VEJRLIGETS INDFLYDELSE PÅ BETONENS HOLDBARHED.

Medens det kun er vejrfaktorerne regn, sol og vind, der har indflydelse på betonens misfarvning, så bliver, når talen er om holdbarhed, frosten en meget vigtig faktor, ja, det er vel her i landet frosten i forbindelse med fugtigheden, der må bære hovedskylden for betonfacadernes nedbrydning.

Fugtigheden.

Før at undgå at betonelementer ødelægges, er det ligesom for at undgå misfarvninger af stor betydning, at man har en tæt og jævn overflade. I så fald vil der nærmest kun blive tale om den rent mekaniske nedbrydning fra det vand, der løber nedad facaden. Først når fugtigheden kan trænge ind i revner og huller, kan der blive tale om en dyberegående virkning, der består i at vandet virker opløsende på de i betonen indgående materialer. Denne nedbrydning kan yderligere forstærkes; hvis vandet indeholder opløste syrer, f. eks. hidrørende fra meget røgholdig luft.

Værre bliver det imidlertid, hvis fugtigheden kan trænge så langt ind, at den kommer i berøring med en eventuel armering, der i så fald rustet, hvorved der sker en meget hurtig og stærk ødelæggelse af betonen.

Frosten.

Når der tales om frostens ødelæggelse af beton, må det straks slås fast, at det ikke er frosten alene, der virker nedbrydende, men frost i forbindelse med fugtighed, og i særdeleshed når vejrliget veksler mellem frost og tø. Det er endvidere en betingelse, at fugtigheden kan trænge ind i betonen. Det er ikke alle hullheder, der er farlige, men hullernes størrelse og fordeling er som bekendt afgørende (jvf. luftindblanding for at gøre beton frostsikker).

Der kan være grund til at gøre opmærksom på, at selv ret store hulrum med adgang til det fri, f. eks. huller til fastgørelse af altangelændere, kan være endog meget farlige, og der eksempler på, at bare nogle få dages nattefrost i november, har sprængt store partier af elementer, selv om der har været lagt ringarmering omkring hullet.

En betingelse for, at betonen kan være frostbestandig, er naturligvis, at de materialer, der er benyttet, i sig selv er frostbestandige.

Sammenfatning.

Af det foran anførte om vejrligets indflydelse på facadeelementer af beton, vil det fremgå, at et meget væsentligt krav for at imødegå facaders ødelæggelse, hvadenten det drejer sig om misfarvninger, eller om nedbrydning af betonen, er, at man hindrer fugtighed i at trænge ind. Det er med andre ord i det store og hele et spørgsmål om kvaliteten af den beton, man anvender. Blanding, udstøbning og lagring skal være rigtig og omhyggelig (smlgn. pag. 4.03 ff) for dels at sikre, at den udstøbte beton er tilstrækkelig tæt, og for dels at hindre, at den senere krakelerer.

Man kan også tænke sig at gøre den færdige facade så selvrejsende som muligt ved at påføre den en vandafvisende hinde, f. eks. Silicon, forudsat at sådanne hinder tillader dampgennemgang indefra. Brugen af den slags hinder er imidlertid af så ny dato her i landet, at man på nuværende tidspunkt må forholde sig afventende med hensyn til bedømmelsen af resultaterne.

j) Brandsikkerhed

Problemer er hovedsagelig knyttet til letvægtsfacader. Norske forsøg (Norsk Bygg-forskningsinstituts rapport nr. 17) viser, at gennembrændingstiden for en let ydervæg i højere grad er afhængig af isolationsmaterialet end af yder- og inderbeklædning. Der synes at være et stort forsøgsbehov med hensyn til opklaring af flammespredningsproblemerne, specielt da myndighedernes krav er i modstrid med erfaringer og krav i vore nabolande.

For betonfacadeelementerne er spørgsmålet som regel uden betydning - blot skal der gøres opmærksom på, at visse typer skumplastics ødelægges ved en ret ringe temperaturstigning.

Af væsentlig betydning er det, at konstruktionen ikke medfører, at der dannes hulrum, der kan medvirke til at sprede brændbare gasarter fra etage til etage eller fra lejlighed til lejlighed.

k) Dekorative virkemåder

De dekorative muligheder er så mangfoldige, at det ville føre for vidt at omtale disse nærmere her. De to væsentligste variationsmuligheder er elementets placering i forhold væg- (søjle-) og dækforkanter, hvorved der eventuelt kan opnås vandrette eller lodrette bånd i relief, og overfladematerialets art. For f. eks. beton kan specielt følgende virkemåde nævnes.

- 1) Profilering eller mønster. Her gives også mange muligheder og ved en blot nogenlunde stor leverance er omkostningen pr. m² tilmed umærkelig.
- 2) Farver. Man bør ved valget være opmærksom på vejrligets indflydelse på disse. En holdbar farve opnås sikrest ved farvede tilslagsmaterialer og kan være ret kostbare. Hvide farver har været mest anvendte, da de kan udføres forholdsvis bestandige for en ikke alt for uoverkommelig pris.
- 3) Overfladekarakter. Ved anvendelse af forskellige formmaterialer og især forskellige formsmøremidler kan overfladekarakteren varieres fra den blærede, naturstensagtige til den marmorglatte. En særlig robust og naturstenslignende overflade kan opnås ved sandblæsning.

Temperaturbevægelser

Ved elementernes udformning må man tage hensyn til, at temperaturens variationer med årstid, klokkeslet o.s.v. kan være årsag til ikke uvæsentlige temperaturforskelle mellem facadens ydre og indre lag.

I nogle tilfælde vil dette resultere i relative bevægelser mellem facadens lag, og man må da sikre sig, at forbindelserne kan optage disse bevægelser. I andre tilfælde er forbindelsen mellem lagene så stiv, at bevægelser ikke kan finde sted. I dette tilfælde udsættes lagene og forbindelsen for spændinger. For letbetonelementer med udvendig beton kan disse temperaturspændinger adderes til differenssvindspændingerne.

Temperaturvariationerne vil endvidere lade elementet som helhed ændre størrelse. Det vil da ikke være muligt at etablere en fast forbindelse mellem alle facadeelementer i bygningen, men man må optage disse bevægelser i et passende antal fuger, i reglen i alle fuger; se bl. a. arbejdsudvalg 4's publikation nr. 4, "Fuger", Teknisk Forlag.

Afsnit B
KONKLUSIONER OG FORSØG

Resume af nuværende praksis

Selv om udvalget som nævnt i indledningen har ment at måtte afstå fra at fremkomme med egentlige retningslinier for den rationelle opbygning af facadeelementer grundet på det foreliggende materiales utilstrækkelighed, især hvad angår forhold, der berøres af deelementernes tekniske egenskaber og hele elementets alder, skal det i det følgende forsøges resumeret, hvad der synes at være de tilstræbte egenskaber i de konstruktioner, som udføres i dag.

Facadeelementernes funktioner kan opdeles i tre funktionsgrupper, knyttet til 3 lag: det yderste lag, mellemlaget og inderlaget. I nogle tilfælde er elementet lagdelt, således at der til hver funktionsgruppe svarer et eller flere bestemte materiallag. I andre tilfælde svarer et materiallag til flere funktionsgrupper, således at "lagdelingen" er udtryk for, at materiallagets funktioner gradvis ændres indefter. Ved valg af materiale og konstruktion må der da tilstræbes den bedst mulige korrelation mellem funktioner og materialegenskaber.

De i afsnit A omtalte egenskaber kan da resumeres således:

a) "Yderste lag".

Denne del af facadeelementet giver bygningen dens ydre æstetiske effekt og fungerer som den egentlige klimaskærm. Det må herunder tilstræbes at opnå:

Æstetisk tilfredsstillende ydre.

Minimal vedligeholdelse.

Ringe fugtabsorption.

Ringe brændbarhed.

Fuld frostsikkerhed.

Optimal vindtæthed og diffusionsevne under hensyn til elementet som helhed.

Dræning af isolationslaget, samt eventuel ventilation.

Størst mulig lysbestandighed.

Fornøden modstandsevne eller bevægelighed overfor temperaturvariationer.

Mindst mulig vægt under hensyn til kravet om fornøden sikkerhed for lodrette og vandrette kræfters optagelse og næstfølgende lags effektive beskyttelse.

Sikker befæstelse og økonomisk montage.

Økonomisk, teknisk forsvarlig og æstetisk tilfredsstillende fugning.

Fortsat arbejde må som nedenfor omtalt tage sigte på at give nøjere grænser for disse egenskabers variation.

b) "Mellemlaget".

Denne del har først og fremmest den funktion at være varmeisolerende. Herudover kan "laget eventuelt bidrage til elementets konstruktive virkning og sikre den samlede konstruktions vindtæthed og dræning for fugtighed, eventuelt kan der tankes at skulle etableres et ventileret hulrum mellem yderste lag og mellemlaget. Det må derfor tilstræbes at opnå:

En efter opgavens krav afstemt varmegennemgangsmodstand.

Hurtigst mulig dræning af eventuelt kondensvand.

Ringe fugttransportevne.

Optimal vindtæthed og diffusionsevne under hensyn til elementet som helhed.

Stor volumenbestandighed.

En efter elementets øvrige komponenter og konstruktioner afpasset elasticitetskoefficient og forskydningsstyrke.

Eventuelt fornøden sømfasthed.

Eventuelt fornøden adhæsionsevne til nabolagene.

Høj temperaturbestandighed.

Høj modstandsdygtighed overfor råd, svamp og kemiske angreb.

En til et eventuelt krav om mekanisk styrke afpasset vægt, der ifølge hovedfunktionen af "laget" må være så lille som muligt.

c) "Inderlaget".

Denne del af facadeelementet tager først og fremmest sigte på at fungere som en mekanisk tilstrækkeligt stærk, æstetisk og brugsmæssigt passende afslutning på elementet. Herudover kan laget som de øvrige bidrage til eller ganske frembringe hele facadeelementets konstruktive virkning. Det må derfor tilstræbes at opnå:

Passende mekanisk styrke.

Ringe brændbarhed.

God sømfasthed.

Ringe diffusionsevne og stor vindtæthed under hensyn til elementet som helhed.

Rimelig fugtkapacitet.

Passende akustiske egenskaber.

Æstetisk tilfredsstillende overflade.

Sikre befæstigelsesmuligheder for installationsdele o.l.

Det vil ses af ovenstående sammendrag af de for de enkelte lag ønskelige egenskaber, at en enkelt egenskab ved det samlede facadeelement kan opnås i fle-

re af de omtalte lag, men det må til gengæld kraftigt understreges, at visse egenskaber skal variere på bestemt måde igennem elementet. Således skal diffusionsevnen helst stige indefra og udefter, hvorimod vandabsorptionsevnen gerne skal variere modsat. Endvidere skal kraftoverføring, dræningsmuligheder og vind-tætning løses for elementet som helhed.

Forsøgsarbejdets organisation og planlægning

Ved en gennemgang af ovennævnte krav til facaceelementernes enkelte komponenter har udvalget især hæftet sig ved elementernes varmeisolerende evne og disses afhængighed af de enkelte elementdeles øvrige egenskaber, herunder specielt fugttransportevnen.

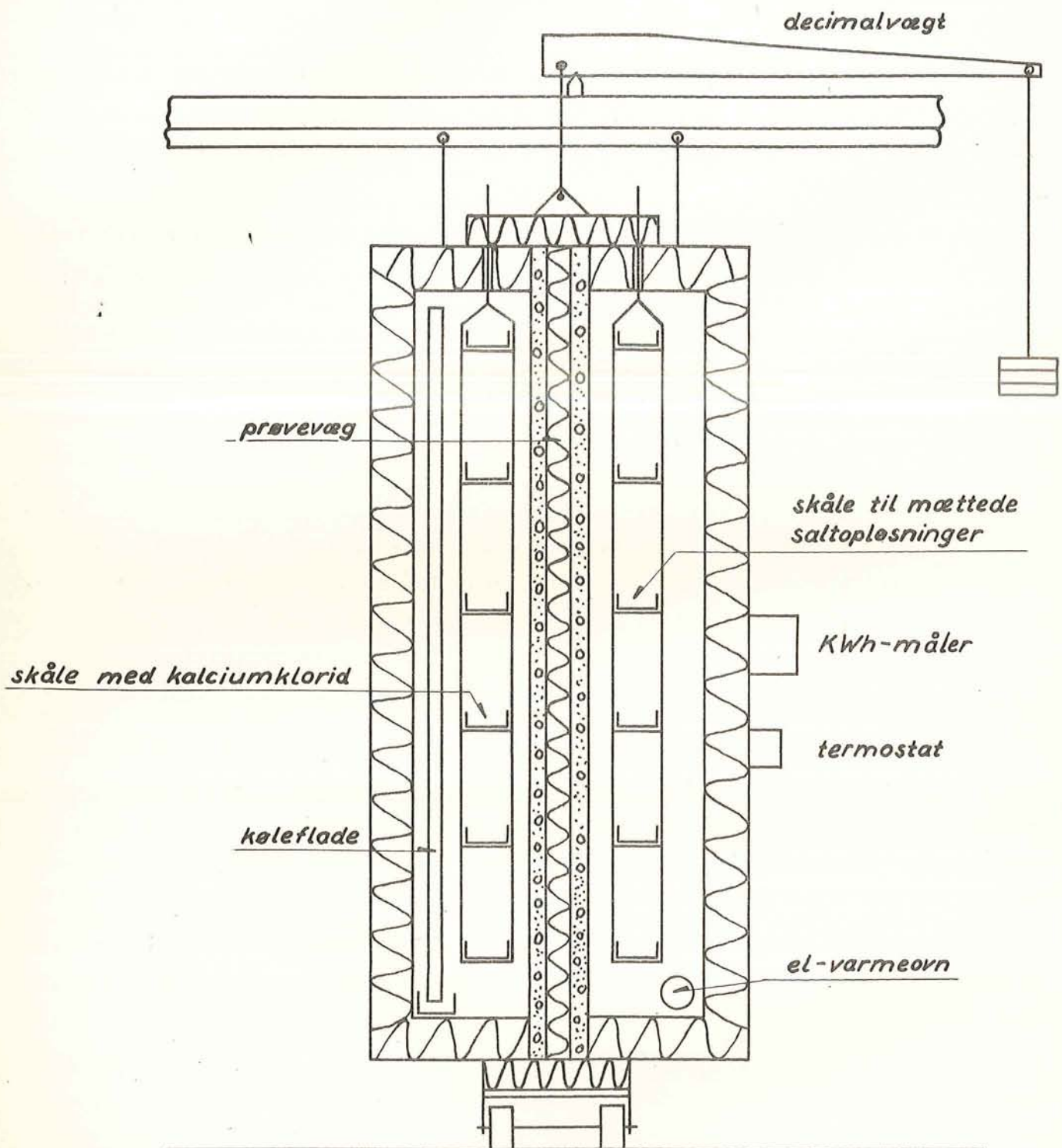
Som det fremgår af afsnittet om fugttransport pag. 5.09, specielt pag. 5.25, er de for fugttransportens afvikling nødvendige fysiske konstanter og forhold ikke kendt i fornødent omfang. Det har imidlertid ligget uden for udvalgets muligheder at søge disse mangler afhjulpet, da et sådant arbejde vil være meget omfattende og såvel økonomisk som tidsmæssigt overstige det mulige.

Da en meget stor gruppe af konstruktioner i dag udgøres af "sandwich-elementer", hvoraf mange udføres i beton, har udvalget bestemt sig til at igangsætte en undersøgelsesrække med sådanne beton sandwich-elementer med det første formål at konstatere, hvilke farer for varmemodstandsevnen og elementets øvrige funktioner konstant ugunstige forhold (f. eks. 70° relativ fugtighed og + 20° C indvendigt og - 10° C udvendigt) kan medføre. Det blev herunder anset for særlig interessant, at eksempler fra praksis på virkeligt mislykkede konstruktioner her i landet synes sjældne og fortrinsvis knyttet til bygninger med luftbefugtningsanlæg.

Udvalget konstaterede det ønskelige i at have nærmere kendskab til den virkelige variation i den relative fugtighed i vore boliger.

Det var endvidere udvalgets opfattelse, at der kun kunne frembringes uheldige tilstande i en facade, når kombinationen af temperaturer og relative fugtighedsgrader var ekstrem efter danske forhold. Det er derfor også naturligt, at de i denne rapport omtalte spørgsmål hidtil kun har været diskuteret og behandlet indgående i svenske og norske bygningskredse.

Udvalget optog civilingeniør V. Korsgaard og overdrog Laboratoriet for Opvarmning og Ventilation at udføre forsøg efter nærmere godkendt program under civilingeniør Korsgaards ledelse.



FORSØGSOPSTILLING

Fig. 1.

Apparatur og metoder

Det har været udvalgets opfattelse, at forsøg til belysning af et facadeelements varmemodstandsevne og dennes afhængighed af den konstruktive opbygning og de elementernes øvrige tekniske egenskaber bedst kunne belyses ved forsøg med etagehøje elementer.

På Danmarks tekniske Højskoles Laboratorium for Opvarmning og Ventilation forefandt imidlertid et noget mindre apparat, som i sin tid blev bygget til måling af k -værdier for 2×2 m store vægelementer, og da laboratoriet var villigt til at stille dette apparat til rådighed for de påtænkte forsøg, blev det vedtaget at modtage dette tilbud og gennemføre et par forsøg på grundlag af hvilke, det så skulle afgøres, om det ville være formålstjenligt at bygge et nyt og større apparat som oprindeligt påtænkt. De hidtil gennemførte forsøg viser imidlertid, at der ikke er grund til at forvente væsentligt andre resultater ved at gøre prøveapparatet større.

Prøveapparatet er i princippet opbygget som vist på figuren.

Forsøgselementets dele er nærmere beskrevet i bilag III.

a. Måling af fugttransport.

Den varme kasse er foret med zinkplader med tinloddede samlinger, og den kan betragtes som damptæt. Vægttabet fra skålene med mættede saltopløsninger må derfor skyldes, at vanddamp er diffunderet ind i prøvevæggen, hvor den dels accummuleres i form af vand, rim eller is, dels diffunderer videre ind i den kolde kasse.

Den i prøvevæggens enkelte dele accumulerede vandmængde måles ved vejning af væggens enkelte dele. For at undgå rimdannelse på køleelementet er der i den kolde kasse ophængt skåle med klorkalcium. Klorkalciumskålenes vægtforøgelse kan ikke tages som mål for den vanddampmængde, der er diffunderet igennem vægelementet, idet den kolde kasse ikke er helt damptæt.

b. Måling af varmeisoleringssevne.

Væggens varmeledningsmodstand bestemmes ved at måle temperaturforskellen mellem væggens to overflader og den varmemængde, som strømmer igennem vægelementet. Denne varmemængde bestemmes ved at måle den til de elektriske varmele-

gemes tilførte energimængde korrigeret for den varmemængde, der strømmer ud gennem den kraftigt isolerede kasse til det omgivende rum. Temperaturen i kassen holdes konstant ved hjælp af en termostat, der er indstillet på det omgivende rums temperatur.

Foruden overfladetemperaturerne måles også temperaturen i skillefladerne mellem isoleringslaget og betonpladerne.

De vigtigste temperaturer registreres i måleperioden kontinuert på en Honeywell Brown elektronisk skriver.

c. Måling af diffusionsmodstand.

For at få et indtryk af betonpladernes diffusionsmodstand blev der samtidig med støbningen af vægelementerne udstøbt 0,5 x 0,5 m store prøver i tilsvarende tykkelser som vægelementerne.

Disse prøver anbringes som låg over galvaniserede jernkasser med mattede kogsaltopløsninger og henstilles i et rum med lav relativ fugtighed, således at vanddamp vil diffundere fra kassen igennem pladen og ud i rummet. Kasserne vejes med regelmæssige mellemrum, og vægttabet i forbindelse med damptrykforskellen er et mål for pladernes diffusionsmodstand.

Foreløbige resultater

Hidtil er gennemført målinger på fem forskellige sammenbygninger af sandwichvægelementer. De to første forsøg blev udført med vægelementet opbygget af en 2,5 cm tyk armeret betonplade mod den varme kasse, et isolationslag af 5 cm glasuldmåtter i crepepapir og en 7,5 cm tyk armeret betonplade mod den kolde kasse. Glasuldmåtterne blev i forsøgsmaskiner presset sammen til 4 cm's tykkelse. Den 7,5 cm tykke betonplade mod den kolde kasse var forsynet med 2 stk. 20 ø ventilationshuller foroven og forneden. I det første forsøg var hullerne lukkede, i det andet åbne.

Ved begge forsøg aflejredes et ca. 1 mm tykt fast rimlag nærmest som et islag mellem betonpladen og glasuldmåttens crepepapir, der var delvis fastfrosset. Islaget tiltog jævnt i tykkelse opefter. Den aflejrede ismængde udregnet i g/døgn mm Hg m² er i de to forsøg praktisk taget den samme (ca. 1,3), således at det ikke har bevirket nogen forskel, at ventilationshullerne er blevet åbnet, hvilket er naturligt nok, da crepepapiret lukker for luftcirkulationen.

I betragtning af, at de temperaturforskelle og damptrykforskelle (indvendigt 20° og 70 % fugtighed, udvendigt ca. -7° og $\phi = 100\%$), vægelementet har været udsat for i den ret lange forsøgsperiode (ca. 3 uger), må betragtes som usædvanlig strenge, sammenlignet med, hvad ydervægge normalt udsættes for her i landet, er de aflejrede ismængder ikke foruroligende.

De målte $\frac{1}{M}$ -værdier har vist sig at være ca. 15 % større end beregnet.

I forsøg 3 er den inderste, 2,5 cm tykke, armerede betonplade erstattet med en 5 cm tyk, upudset klinkerbetonplade. Klinkerbetonpladen blev valgt for at få så "utæt" en indvendig beklædning som tænkelig i praksis, for derved at se, hvor meget is der i ekstreme tilfælde vil accumuleres i en væg.

Forsøget viser da også, at isdannelsen bliver ca. fire gange så stor eller godt 5 g/døgn mm Hg m².

I forsøg 4 benyttedes også klinkerbetonpladen, men for at forøge ventilationen til den kolde kasse holdtes der en 1 cm bred luftspalte mellem betonpladen og glasuldmåtten. Forsøget viste imidlertid, at isaflejringen blev betydeligt større i stedet for mindre, idet såvel hele den øverste halvdel af luftspalten som de øverste ventilationshuller fyldtes med løs rim. Forklaringen herpå er antagelig, at der opstår konvektionsstrømninger fra den øverste del af den var-

me kasse, igennem den porøse klinkerbetonplade og glasuldmåtten til luftspalten, hvor luften så afkøles og synker ned samtidig med, at den udskiller vanddampene i form af rim, der efterhånden lukker luftspalten. Den afkølede luft strømmer forneden tilbage gennem glasuldmåtten og klinkerbetonpladen ind i den varme kasse. Denne teori stemmer overens med, at de målte $\frac{1}{M}$ -værdier aftager i forsøgsperioden, efterhånden som konvektionsstrømmen bliver mindre, fordi luftspalten lukkes med rim.

For at få dette nærmere bekræftet blev det bestemt at udføre et forsøg, hvor klinkerbetonpladens varme side blev forsynet med et lag diffusionsutæt papir (maskinpapir, der er væsentligt mere tæt mod luftgennemstrømning). Såfremt den ovenfor givne forklaring er rigtig, måtte det forventes, dels at rimmængden blev væsentligt mindre, dels at den konstaterede formindskelse af $\frac{1}{M}$ under forsøget udeblev. Begge dele skete.

Måling af de mindre betonpladers diffusionsmodstande har endnu ikke givet resultater, idet fugtigheden i rummet, hvor de er opstillede i sommerhalvåret, er omtrentlige så høj, ca. 60-70 %, som i pladejernskasserne med den mættede kogesaltopløsning (70 %).

Påtænkte forsøg

Forsøgsarbejdet vil blive fortsat så langt, som udvalget anser det for nyttigt at gå, og så langt, som udvalgets budget tillader.

Da de udførte forsøg såvel som de nærmest følgende forsøg udpæget har karakter af sonderinger, der tilsigter at finde forhold, som på godt eller ondt influerer på elementets varmemodstandsevne, vil udvalget ikke før disse forsøgs afslutning kunne udarbejde en endelig plan for hele forsøgsrækken.

Det er hensigten i de nærmest følgende forsøg at søge eksistensen af den ovennævnte varmekonvektionsstrøm fra den varme side af elementet nærmere belyst ved at placere papirlag (diffusionsutæt) i de forskellige skilleflader mellem elementdelene for derved at konstatere konvektionsstrømmenes udstrækning og virkning. Endvidere vil man undersøge strømningsmodstanden i crepe- og maskinpapir.

Det må antages, at udvalget vil søge effekten af ventilation til den kolde side nærmere belyst. Denne synes jo efter de første forsøg at være uden betydning, hvorimod en dræning af isolationslaget udad må anses for påkrævet, da der under alle forhold dannes is på indersiden af væggen yderste lag. Det vil måske også være muligt senere at undersøge dræningshullernes konstruktion og størrelse.

Endelig må det forudses, at udvalget vil ændre materialsammensætningen i elementet, f. eks. ved undersøgelse af lette konstruktioner, idet man dog væsentligt holder sig til materialer, der allerede nu er i udstrakt anvendelse.

En forsøgsopstilling kræver ca. 3-4 uger til gennemførelse, og det vil heraf ses, at en hurtig oversigt over forsøgsresultatet ikke må forventes. Dersom udvalget finder det formålstjenligt, skulle der indenfor budgettet kunne udføres ca. 40 forsøg ialt. Hertil må skønnes at ville medgå 3 år. En afkorting af tiden synes kun mulig ved opbygning af yderligere prøveudrustning, men dette har udvalget ikke anset for rimeligt med det fastlagte budget. Skulle der senere fremkomme økonomiske muligheder for fortsættelse af arbejdet, som udvalget har påbegyndt, må en sådan forøgelse af forsøgstemporet overvejes.

Det er muligt, at de nærmest følgende forsøg vil vise, at en ombygning af apparaturet, så fugttransporten ved balanceligninger kan kontrolleres helt, er nødvendig. I så fald må også den kolde kasse fores med zink.

Fremtidigt arbejdes mål og muligheder

Udvalget er af den opfattelse, at en eventuel videreførelse af det arbejde, som her er påbegyndt, må tage sigte på, ud fra forbedrede oplysninger om materialernes tekniske egenskaber, at udarbejde nøjere retningslinier for konstruktion af facadeelementer eventuelt i form af en kort vejledning indeholdende visse grænser for de tekniske egenskabers variation. Hertil udarbejdes eventuelt en bredere lærebog, der måske også må medtage problemerne ved fuger imellem elementerne og ved konstruktion af vinduer og døre, såvidt disse forhold influerer på facadens samlede virkemåde.

Medens forsøgene i dette udvalgs arbejde har været af orienterende art, skulle det ved eventuelt fortsat arbejde være muligt at lægge et fast forsøgsprogram, som tilsigter at dokumentere vejledningens rigtighed og eventuelt danne en del af grundlaget for en forbedring af Dansk Ingeniørforenings "Regler for beregning af varmetab fra bygninger", således at en række andre faktorer af betydning for facadeelementets varmetekniske virkemåde medtages i fornødent omfang ved beregning af transmissionstab.

Udviklingen i byggeriet går uden tvivl mod kraftigt isolerede facadekonstruktioner og måske også mod stigende anvendelse af luftopvarmning. Særlig i de tilfælde, hvor mekanisk ventilation og luftbefugtningsanlæg knyttes til anlæggene, vil denne udvikling medføre, at varme-, kondens- og fugeproblemernes løsning bliver af voksende betydning for ydervæggens funktion. Det må overvejes, om ikke også konstruktionen af tag og gulv bør medtages i den eventuelle fortsættelse af arbejdet, da disse dele af klimaskærmen på mange punkter rummer de samme problemer som selve bygningsfacaden.

BILAG

Bilag I

FORSLAG TIL ARBEJDSGRUNDLAG FOR UDVALG 2

Facadeelementers rationelle virkemåde og opbygning.

1. Udvalgets sammensætning.

Udvalget tænkes sammensat som følger:

Civilingeniør Povl R. Andersen,
 Civilingeniør C. C. Kirchheiner,
 Arkitekt Sverre Eske Kristensen, M.A.A.,
 Civilingeniør A. K. Krog,
 Civilingeniør Vagn Ussing (formand) +)

2. Direktiv for udvalgets arbejde.

A. Det er udvalgets opgave, ud fra den eksisterende viden i dag, indenfor det traditionelle byggeri og den i underudvalg I indsamlede viden om facadeelementer i utraditionelt byggeri, at give en beskrivelse af facadeelementers (bygningssfacadens) nuværende virkemåde.

Beskrivelsen af elementernes virkemåde må indeholde:

- a. En redegørelse for eksisterende materialer, som er blevet anvendt eller nu anvendes til facadekonstruktioner, det være sig som beskyttende, bærende eller isolerende komponent. Det må specielt i denne del af beskrivelsen fremgå, hvilke sammenstøbninger eller andre sammenhæftninger mellem de nævnte materialer man i dag anser for praktisk mulige.
- b. En redegørelse for de forskellige fremstillingsmetoder med særlig vægt på disses influens på elementets udformning eller virkemåde.

+) Senere indtrådte civilingeniør, dr. phil. P. W. Marke og civilingeniør Vagn Korsgaard i forbindelse med fugttransport- og varmemproblemerne. Udvalgets sekretær er civilingeniør Johs. F. Munch-Petersen. Problemer vedrørende fugttransport, kuldebroer og lignende forhold ved virkemåden er behandlet af civilingeniør M. Egeskjold, og forholdene vedrørende betons anvendelse, vejrligets indflydelse og forbindelsesmidlerne af civilingeniør Jørn Lund.

c. En beskrivelse af selve virkemåden, hvorunder især må søges fremdraget, hvorledes vandtæthed, vindtæthed, varmemodstand og dampgennemgang opnås. Det må endvidere under dette punkt ganske specielt klarlægges, hvorledes vinduesdetailler tidligere har været og nu bliver klaret. Til det under A nævnte arbejde tænkes anvendt i lønnet medhjælp kr. 10.000,00.

B. Det er dernæst udvalgets opgave ud fra ovennævnte beskrivelse af elementernes virkemåde at udlede retningslinier for udformning af facadeelementer, idet disse retningslinier opdeles i to grupper:

- I. Bærende facader.
- II. Ikke bærende facader.

Dersom det ved udarbejdelsen af disse retningslinier synes overkommeligt at samle kræfterne om et lille antal konstruktive typer, bør udvalget, inden disse typer endelig udformes, opstille et forsøgsprogram med disse typer indenfor et budget på kr. 40.000,00, der eksempelvis kan anvendes som følger:

3 forme incl. undersøgelser	kr.	8.000,00
9 prøvestøbninger	"	5.000,00
9 vinduer med glas	"	2.000,00
Montage og demontage	"	3.000,00
Forsøgsopstilling med henblik på måling af vandtæthed, kondensforhold og varmemodstand m.m.	"	16.000,00
Bearbejdning, resultater og ledsagende materialforsøg	"	<u>6.000,00</u>
Ialt:	kr.	<u>40.000,00</u>

C. Til afslutning er det udvalgets opgave at samle materialet og til forretningsudvalget at stille forslag om former for publikation samt efter nærmere anvisning at gennemføre denne.

Budget hertil og reserve kr. 15.000,00.

Bilag II

AMERIKANSKE LETVÆGTSFACADER

(Sammendrag af beskrivelser givet i ENGINEERING NEWS RECORD i løbet af 1954 samt i no. februar 17. 1955).

Forudsætninger.

De økonomiske fordele, der kan opnås med de tynde, lette facader, som skal beskrives nedenfor, er ikke vanskelige at få øje på: Når vægtykkelsen formindskes, vokser samtidig det effektive areal inden for givne ydre mål; når vægten af facaderne går ned, opnås besparelser ved udformningen af de bærende konstruktioner og fundamenter. I nogle tilfælde koster de lette facader i sig selv mindre end konventionelle, og i alle tilfælde vil vedligeholdelsesudgiften være mindre. Endelig kan de lette facader monteres overordentlig hurtigt.

Skulle facaderne i visse tilfælde koste mere pr. arealenhed end tidligere facader, vil der alligevel være forudsætninger til stede for besparelse på det samlede bygværk.

Hidtil har alle eksempler på bygninger, hvor letvægtsfacader er blevet anvendt, været skyskrabere. Dette skyldes vel, dels at der ved disse er gode muligheder for et stort antal ens elementer, dels den ovenfor omtalte forøgelse af det effektive etageareal. Denne forøgelse må her være særlig betydningsfuld i betragtning af den dyre grund, som en skyskraber må formodes at være opført på.

Anvendelsen af letvægtsfacader har taget et pludseligt opsving de sidste år. Dette må ses både i forbindelse med en omlejring af prisniveauet til fordel for præfabrikerede sandwich-plader, og i forbindelse med de erfaringer og forbedringer, som i de seneste år er opnået på det teknologiske område.

Det vil jo nemlig til syvende og sidst være disse elementers gode egenskaber, som vil betinge deres fortsatte anvendelse og udvikling. Kravene stilles til udseendet, til holdbarhed og styrke, til isoleringsevne, brandsikkerhed og til evnen til at holde regnvandet ude.

Endelig vil myndighedernes formulering af kravet til brandsikkerhed have afgørende betydning for udviklingen. Dette afgørende punkt illustreres af de paradoksale bestemmelser mange steder i staterne.

Man tillader, at en facade praktisk talt helt og holdent er af glas. Men hvis der til facaden benyttes et andet materiale end glas, kræver man en mindste tykkelse på 8 in.

For nogle af de i eksemplerne beskrevne konstruktioner vil man derfor finde, at der, efter at letvægtselementet var bragt på plads, måtte anbringes en bagklædning af 4-in betonblokke for at tilfredsstille myndighedernes krav. Særlig grelt træder dette paradoks frem ved (3), hvor man i facader med vinduer havde opnået tilladelse til at udelade bagklædningen helt, mens man i facader uden vinduer var nødt til at have den med.

Ved (4) har man draget konsekvensen heraf og søgt myndighedernes tilladelse i to etaper: Først fik man lov til at lade facaderne være af glas overalt. Dernæst måtte myndighederne gå med til, at man visse steder erstattede glasset med letvægts sandwich-plader, der foruden andre gode egenskaber også havde større brandsikkerhed end glasset.

Udvikling før 1954.

I 1951 og 1952 byggedes i Pittsburg de første metalbeklædte bygninger. Facaderne var rustfrit stål med 8-in bagklædning af murværk. 1952: Gateway Centre med facader bestående af elementer med rustfri stål-forside og en 4-in tyk bagstøbning af letbeton. 1952: Alcoa Building med elementer opbygget af en aluminiumsplade, et luftrum og en 4-in tyk isolerende letbeton. Den letteste af disse var sidstnævnte, som vejer ca. 40 psf.

Oversigt over byggeri i 1954.

Udviklingen her bærer præg af at gå fra store elementer til elementer, der er så små, at de kan bæres af en enkelt mand. Dette til trods for den store montagehastighed, som er blevet opnået med de større elementer.

Det bærende skelet er enten af stål, af stål omstøbt med beton eller af jernbeton. Det gøres helt færdigt, før montagen af facaderne begynder.

Opdelingen af facaderne i elementer.

Ved alle hidtil udførte bygninger er opdelingen i hovedsagen foretaget efter et af følgende tre principper:

Ifølge det ene omfatter et element både paneler og vinduesrammer i eet. Det boltes fast til lodrette stolper (3) eller til den bærende hovedkonstruktion ved

hjælp af vinkeljern (1). Elementet er forsynet med flanger, der griber ind i naboelementernes eller stolpernes

I det andet tilfælde (2) fæstnes lodrette skinner af aluminium ved hjælp af knudeplader udvendigt på bygningens stålskelet. Skinnerne anbringes i een etages højde ad gangen, hvorefter paneler og vinduesrammen fra oven skydes ned i riller i skinnerne.

Endelig går den tredje metode (4), (5) ud på først at fæstne aluminiumsrammer til den bærende konstruktion. Rammerne er etagehøje, og i dem indsættes glas og paneler på nøjagtig samme vis.

I alle tre tilfælde benyttes desuden letvægts elementer til at dække selve de bærende konstruktioner med, hvor disse er fremme i facaderne. Dog skal det bemærkes, at hvor de bærende konstruktioner f. eks. består af et med beton omstøbt stålskelet, er det naturligvis aldrig nødvendigt, at de dækkede letvægts elementer forsynes med en bagklædning, idet betonen giver rigelig brandsikkerhed. Disse elementer fastgøres ikke direkte til de bærende konstruktioner, men til de allerede monterede elementer, d.v.s. til henholdsvis panel-vindues element, til de lodrette stolper eller til aluminiumsrammerne.

Enkeltheder vedrørende elementerne.

I et senere afsnit er givet eksempler på opbygningen af elementerne ved forskellige bygninger. Men først skal der her gives en generel oversigt over principper.

Et fælles træk for letvægts-elementernes opbygning er sandwichprincippet: Yderst en metalbeklædning, derefter kommer inakustisk materiale, isolation, indre beklædning og eventuelt bagklædning.

Metalbeklædningen er tynde plader af enten aluminium, rustfrit stål eller emaillet stål. Der er overordentlig mange muligheder for at variere de arkitektoniske virkemidler. Panelerne kan f. eks. være matterede, medens vinduesrammerne er polerede. Der kan være presset relief i pladerne, og endelig kan ved de emaillede plader både farve, glans og mønster varieres. Som regel ønsker man, at metallet ikke virker dominerende, at det har samme karakter som det flade glas. Dog har man i et af tilfældene ved hjælp af lyse og mørke bånd direkte fremhævet lodrette og vandrette linier med forskellig funktionel betydning.

X-ning eller dannelsen af buler i de tynde metalbeklædninger, hvilket ville være kedeligt for udseenden, forhindrer man enten ved at udpresse mønster, ved

at lime metallet til en bagved liggende asbestcement plade, eller ved at give metalpladen en svagt krummet overflade med stivere på bagsiden. I det sidste tilfælde har man da samtidig opnået, at temperaturforandringeres virkning er begrænset til ubetydelig ændring i metalpladens krumning.

(Udover disse metalplader med krum overflade er problemet dilatation kun nævnt i (2) i forbindelse med de lodrette aluminiumsskiner, som går igennem i facaderne i hele husets højde. Ved hver etage er der her sørget for bevægelige samlinger).

Inakustik. Bag metalpladerne følger i flere tilfælde et lydabsorberende lag, der kan være et 1/8-in tykt uorganisk materiale eller et lag asfalt.

Isolation. Foruden luftlag benyttes letbeton eller et lag glasfiber på ca. 1-in tykkelse. Transmissions-koefficienterne ligger på ca. 0,20, amerikansk mål, hvilket i danske enheder svarer til ca. 1,0.

Damptæthed de forskellige lag imellem bliver tilvejebragt med aluminiumsblik.

Brandsikkerhed. Dette spørgsmål er omtalt andetsteds: Det skal her blot nævnes, at hvor bagklædning kræves, er denne 4-in. tyk og består af murværk eller cindersbeton blokke. Selv uden bagklædning er letvægts-facadernes brandsikkerhed betydelig større end for trådglas.

I vinduer er overalt anvendt specielt varmeabsorberende trådglas. Vinduerne, som kan lukkes op, kan alle vaskes indefra. De faste vinduer vaskes fra stillads.

Fastgørelse af elementer.

Der anvendes alle vegne tørre forbindelser. Panel-vindues elementer boltes ved hjælp af vinkeljern til etagerne, de lodrette skinner og stolper i facaderne fæstnes ved knudeplader og aluminiumsrammerne med bolte til de bærende konstruktioner, hvad enten disse er af stål eller jernbeton.

Mellem facadeskinneerne sidder panel- og vindueselementerne fast i riller, og i aluminiumsrammerne er panelelementerne fastgjort på nøjagtig samme måde som glasset.

Tætning af fuger. Fuger mellem elementer er udformet således, at flanger fra hvert element griber ind i hinanden, hvormed yderligere tætning er overflødig. I vandrette fuger findes dugriller, hvortil kondensvand føres. Herfra afledes det til bygningens yderside. Mellem aluminiumsrammer og bærende betonkonstruktioner forsegles fugen med plastisk materiale.

Panelelementerne, som indsættes i aluminiumsrammernes, får kanterne tættet med tape. Der er dog huller heri til ventilering af isolationslaget, idet man ellers måtte frygte et kraftigt indre overtryk ved stærk solbestråling. Endelig kan vinduerne langs omkredsen være forsynet med lister af rustfrit stål for her yderligere at forebygge indtrængen af vand, og for at tætte mod træk.

Pudsning af letvægtsfacader finder kun sted ved letvægtsfacader med bagklædning, forlangt af brandmyndighederne, og det er endda ikke altid, at de pudses.

Eksempler.

(1) 22 etagers bygning i New York City (ENR July 1. 1954).

De præfabrikerede facadeelementer af aluminium er 1/8-in. tykke; højden af hvert element svarer til 2 etager (23 ft), bredden er 4 1/2 ft. Vægt pr. element ca. 200 lb, incl. 2 stk. 6 fod høje vinduer.

Efter at aluminiumselementerne er sat på plads, forsynes de med en bagklædning bestående af 4-in. blokke af cinder-beton, og med et 3/4-in. isolationslag. Bagklædninger er nødvendig af hensyn til de lokale brandmyndigheder.

Antal elementer: ca. 700 .

Pris for færdig facade: ca. \$ 6,50 per sq. ft.

Iøvrigt bemærkes, at samtlige 700 elementer blev monteret i løbet af 10 timer.

(2) 26 etagers bygning i New York City (ENR June 17. 1954).

Facaderne består udefra og indefter af det 1/8-in. tykke aluminiumselement, et 1/8-in. tykt lag af lydæmpende materiale, et 4-in tykt luftlag og en 4-in. tyk bagklædning af betonblokke.

Elementerne omfatter lodrette aluminiumsskinner, som anbringes uden på skellet af bygningen, samt vinduesrammer og paneler. Afstanden mellem de lodrette skinner er 4 ft. 6 in.

Prisen opgives til ca. \$ 4,00 per sq. ft. for færdig facade, hvori pris på glas dog ikke er medregnet.

(3) 36 etagers bygning i Texas for The Republic National Bank (ENR July 15. 1954)

Der er to slags elementer: Elementer til facader med vinduer består yderst af 1/8-in. tyk aluminiumsplade, derefter et isolationslag af glasuld og endelig

endnu en tynd aluminiumsplade. Her er således ingen bagklædning. Elementernes tykkelse er ialt $1\frac{1}{2}$ -in. og vægten er 4,5 psf. Størrelse pr. element $4\frac{1}{2}$ x 12 ft.

Elementer til facader uden vinduer: $1/8$ -in. tykt aluminiumselement, dernæst et luftlag, et lag 4-in. tykke blokke af letbeton, som igen er pudset. Denne del af facaden vejer ca. 40 psf.

Begge elementtyper boltes til lodrette stolper i facaden.

(4) Startier hotel på 16 etager, Hartford. (ENR June 10. 1954).

Det bærende skelet er her af jernbeton. I dette monteredes først aluminiumsrammer. Deres størrelse svarede til henholdsvis etagehøjde og søjleafstand i betonskelettet.

I disse rammer indsattes præfabrikerede panelelementer på samme måde som glas. De har en samlet tykkelse på $1\frac{1}{4}$ -in. og vægten er $4\frac{1}{2}$ psf. Også disse elementer er opbygget som sandwichplader, bestående af en isolerende kerne af glasuld, afgrænset af damptæt aluminiumsblik, som er klistret på de to angrænsende materialer. Den indvendige afgrænsning er en flad asbest-cement plade, $1/8$ -in. tyk. Den ydre er en plade bestående af et $1/8$ -in. tykt asbest-cementlag og en 20-ga tyk stålplade beklædt med porcelæns-emaile.

Elementstørrelsen varierer; den største er $2\frac{1}{2}$ x 7 ft. Der blev benyttet ialt 1640 elementer med et samlet areal på 18000 sq. ft. Pris \$ 5,00 per sq. ft. \$¹ for færdig facade.

(5) 23 etagers bygning i The Mile High Center, Denver. (ENR June 24. 1954).

Ved denne bygning er facaden bestemt af, at man lod luft-konditioneringsrør føre op udvendig på bygningen. Disse rør dækkedes af hvide bånd, medens det af beton omstøbte stålskelet dækkedes af mørke bånd. Mellem båndene var trådglassvinduer.

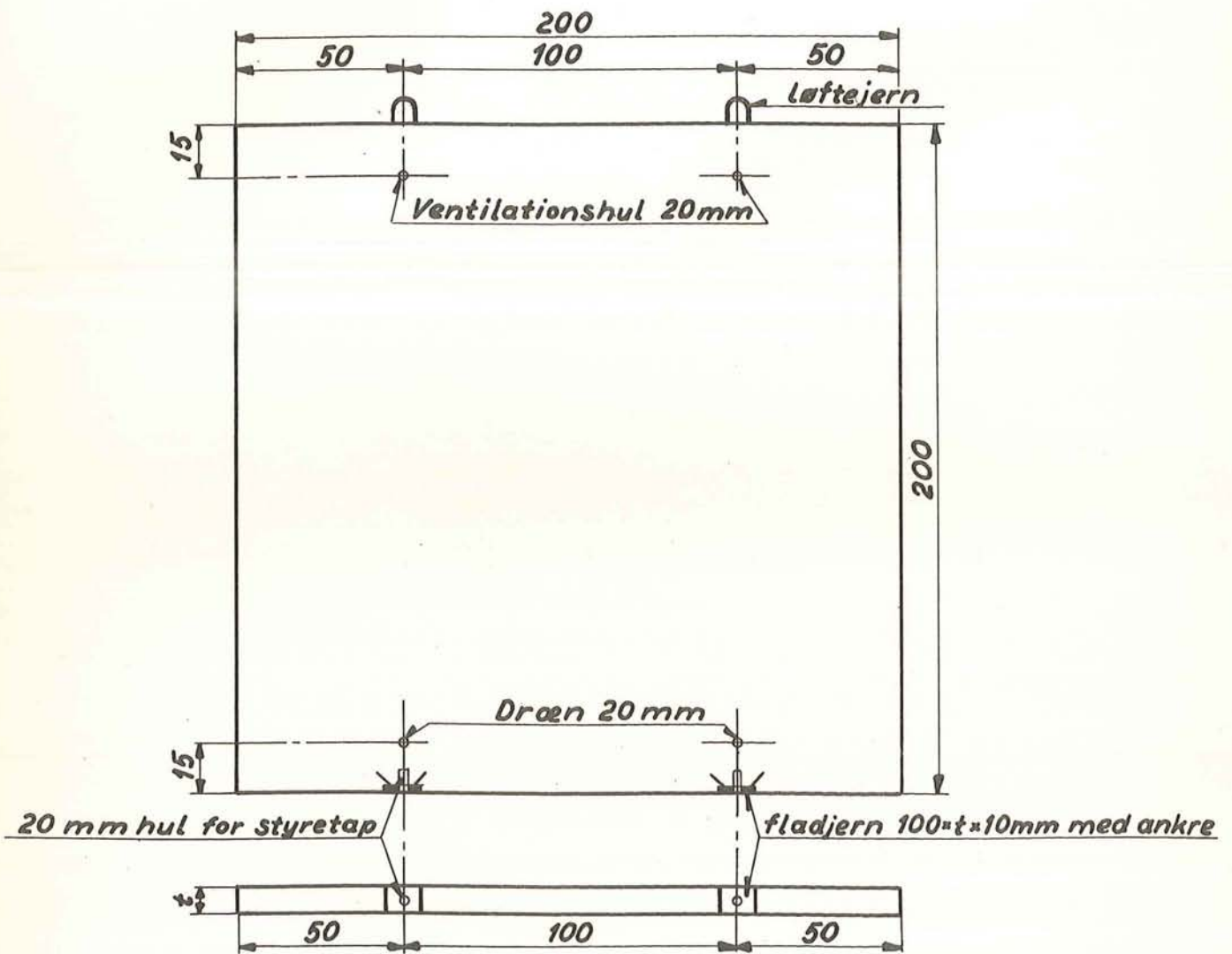
Til det bærende skelet boltedes først aluminiumsrammer, som så igen bærer bånd og vinduer. De mørke bånd har først en isolationsplade bestående af 1-in. glasuld med $1/8$ -in. asbest-cement på begge sider. Denne plade er anbragt med luftmelletrum til begge sider. Yderst er en $1/4$ -in. tyk aluminiumsplade med en mørk galvaniseret overflade.

Dernæst monteredes udfyldningspanelerne og de hvide bånd i aluminiumsrammen. De består af et $7/8$ -in. tykt isolationslag af glasuld beklædt på indersiden

med 1/8-in. tyk plade af asbest-cement. På ydersiden er beklædningen opdelt i tre lag, en 20 ga. stålplade, et 1/8-in. asbest-cementlag og yderst en 18 ga. stålplade med porcelænsemalleret overflade.

Til sidst anbragtes glasset i vinduerne.

Fig. 1



Pladetykkelse t : 7,5 og 2,5 cm

Betonplade til facadeelement
Mål 1:20 Alle mål er cm 15-1-56

Bilag III

RAPPORT OVER PRODUKTION OG PRØVNING AF FORSØGSELEMENTER I

Inden for udvalg II's rammer vil der blive foretaget laboratorieforsøg på Danmarks tekniske Højskole med et par typer facadeelementer. Disse elementer er bygget op af følgende bestanddele:

Isolation: 5 cm glasuld.

Jernbetonplader: 1 stk. 7,5 cm tyk og 1 stk. 2,5 cm tyk.

Der blev vedtaget at fremstille 2 sæt jernbetonplader, således at man havde 1 sæt i reserve, hvis der skulle ske uheld under det videre forsøg.

Nedenfor skal gøres nærmere rede for elementernes data.

Isolationen.

Denne udgøres som nævnt af 5 cm glasuld, i form af en industrimåtte med crepe på begge sider. Som følge af forsøgselementets størrelse måtte denne måtte deles i 2 stk. på 100 x 200 cm.

Jernbetonpladerne.

Disse er støbt af beton taget fra den daglige produktion på betonvarefabrikken "Sjælland". Pladernes nærmere mål og udformning fremgår af fig. 1. Ved siden af den store, på tegningen viste plade støbtes hver gang 4 mindre prøveplader ca. 48 x 48 cm og af samme tykkelse. De små plader blev udført af samme beton og med samme armering som den tilsvarende store. Endvidere støbtes hver gang 20 cm terninger til brug ved bestemmelsen af betonstyrken. Af disse terninger støbtes 2 stk. for hver blanding, d.v.s. 4 stk. terninger for hver af de 7,5 cm tykke plader og 2 stk. terninger for hver af de 2,5 cm tykke plader.

Formen.

Både de tykke og de tynde plader er støbt i samme form. Denne bestod af en bundplade af gips med træsidestykker.

Armeringen.

De tykke plader armeredes med \emptyset 5 pr. 20 cm i begge retninger, medens de tynde plader armeredes med 3 mm betonstålvæv med masker på 10 x 10 cm. Armeringen tilstræbtes placeret midt i pladerne, og den blev holdt på plads af runde afstandsklodser med hul.

Betonmaterialerne.

Cementen var almindelig Rapid cement. Trykstyrken androg efter 9 døgn ved normprøvning ca. 570 kg/cm^2 (bestemt på Statsprøveanstalten).

Tilslagsmaterialerne var de sædvanligt benyttede ved fabrikation af facadeplader. Sandet var normalt søgrus (Ellekildegrus), og stenene var søperlesten. Sandets og stenenes nærmere karakter fremgår af kornkurverne, pag. 7.16 og 7.17. Rumvægtene var for sandet 1400 kg/m^3 og for stenene 1495 kg/m^3 .

Kornkurven for det samlede tilslag, pag. 7.18 er konstrueret ud fra blandingsforholdet og sandets og stenenes kornkurver.

Blandingen.

Denne blev foretaget på en modstrømsblandemaskine, og der blev blandet i portioner svarende til 2 sække cement. Under blandingen tilsattes sammen med vandet et luftindblandingsmiddel (3,5 dl Boasitopløsning af en styrke på 2 % pr. sæk cement). Før blandingen bestemtes fugtighedsindholdet i såvel sand som sten, hvorefter vandtilsætningen til betonen afpasses således, at betonen ved de forskellige udstøbninger blev så ens som mulig. Sand og sten afvejedes i våd tilstand, og blandingsforholdet for betonen var efter vægt af tørre materialer ca. 1:2:3 $\frac{1}{4}$.

Efter at betonen var blandet, bestemtes sætmålet med en normal sætmålskægle, ligesom luftindholdet bestemtes med Meyers luftmåleapparat.

De nærmere specifikationer for blandingerne vil fremgå af tabel 1.

Den plade, der støbtes den 1.12.55, blev kasseret, da der dels ikke var kommet luftindblandingsmiddel i betonen, og dels var nogen usikkerhed med hensyn til vandtilsætningen til 1. halvdel af den benyttede betonmængde.

Udstøbningen.

Efter at armeringen i forvejen var placeret i formen, blev betonen hældt ud i denne og vibreret med en højfrekvent overfladevibrator (9000 omdr./minut). Oversiden af pladerne blev efter vibreringen trukket af med en almindelig retskede.

Terningerne vibreredes med samme vibrator som pladerne.

Lagring.

De tykke plader og terningerne blev afformet 3. dagen efter støbningen, mens de tynde plader fik lov til at blive i formen i 6 dage. Alle plader og terninger blev oplagret indendørs, men derudover blev der ikke foretaget specielle foranstaltninger. Temperaturen var, i den tid pladerne blev oplagret på fabrikken, middel ca. + 7° C.

Prøvning.

De støbte terninger er alle blevet prøvet på Laboratoriet for Bygningsteknik, hvortil de blev indsendt den 13.1.1956. Betonstyrkerne fremgår af rapporten fra laboratoriet (pag. 7.15). Pladerne blev afleveret til Laboratoriet for Opvarmning og Ventilation den 31.1.1956.

Jernbetonplader til forsøgsэлемент.

TABEL 1.

Dato	Væg- plade	For- søgs- plade	Ter- ning	Ce- ment (Ra- pid)	Sand			Sten				Vand- til- sæt- ning	Vand- ind- hold ialt	Vand- ce- ment- tal	Sæt- mål	Luft- ind- hold	
					vådt	vandindhold	tørt	våde	vandindhold	tørre							
1955	nr.	nr.	nr.	kg	kg	%	kg	kg	kg	%	kg	kg	kg	kg	cm	%	
1-12	-	-	1A-2A	85	175	6,0	10,5	164,5	280	1,5	4,2	275,8	26	40	0,48	7,0	1,1
1-12	-	-	3A-4A	85	173	5,5	9,5	163,5	281	1,8	5,1	275,9	23,0	37,6	0,44	1,0	1,1
6-12	1	1-2	1-2	85	180	6,0	10,8	169,2	280	1,5	4,2	275,8	21,7	36,7	0,43	2,0	4,8
6-12	1	3-4	3-4	85	180	4,0	7,2	172,8	280	1,4	3,9	276,1	24,7	35,8	0,42	0	3,0
10-12	2	5-6	5-6	85	177	3,5	6,1	170,9	280	1,5	4,2	275,8	26,0	36,3	0,43	1,0	4,1
10-12	2	7-8	7-8	85	177	3,5	6,1	170,9	280	1,5	4,2	275,8	26,0	36,3	0,43	1,0	4,3
13-12	3	9-10	9-10	85	179	4,5	8,1	170,9	280	1,5	4,2	275,8	24,0	36,3	0,43	1,0	4,3
20-12	4	11-12	11-12	85	177	3,5	6,1	170,9	282	2,0	5,6	276,4	25,5	37,2	0,44	1,0	4,8

Afskrift

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE
Laboratoriet for Bygningsteknik.

SAG 5/56
2.2.1956

Trykforsøg med 16. stk betonterninger.

Rekvireret af Dansk Ingeniørforening's rationaliseringsudvalg II har laboratoriet den 17. januar foretaget trykforsøg med 16 stk. 20 cm betonterninger indleveret af rekvirenten.

Umiddelbart før forsøget er alle prøver vejet. Trykforsøgene er udført i laboratoriets 1000 t presse på sædvanlig måde. Laststigningen er ens for alle forsøg $\sim 5 \text{ kg/cm}^2/\text{sek.}$ på den rette del af arbejdskurven.

I tabellen er anført de opnåede resultater af rumvægte og terningsstyrker.

Mrk.		1A	2A	3A	4A	1	2	3	4	
Alder ved prøve	døgn		47					42		
Rumvægt	kg/l	2,41	2,42	2,44	2,44	2,34	2,33	2,39	2,38	
Trykstyrke	kg/cm ²	537	552	580	603	480	457	587	565	
Middel	kg/cm ²		568					522		

Mrk.		5	6	7	8	9	10	11	12	
Alder ved prøve	døgn		38					35		28
Rumvægt	kg/l	2,35	2,37	2,40	2,39	2,40	2,40	2,38	2,37	
Trykstyrke	kg/cm ²	510	550	525	500	470	493	520	448	
Middel	kg/cm ²		521					482		484

(Sign.) Axel Efsen / H. Krenchel.

Dansk Ingeniørforening.
 Udvalget til rationalise-
 ring af byggeriet (udvalg II)

PRØVNING AF GRUS

prøve nr. **A3** nr. 1

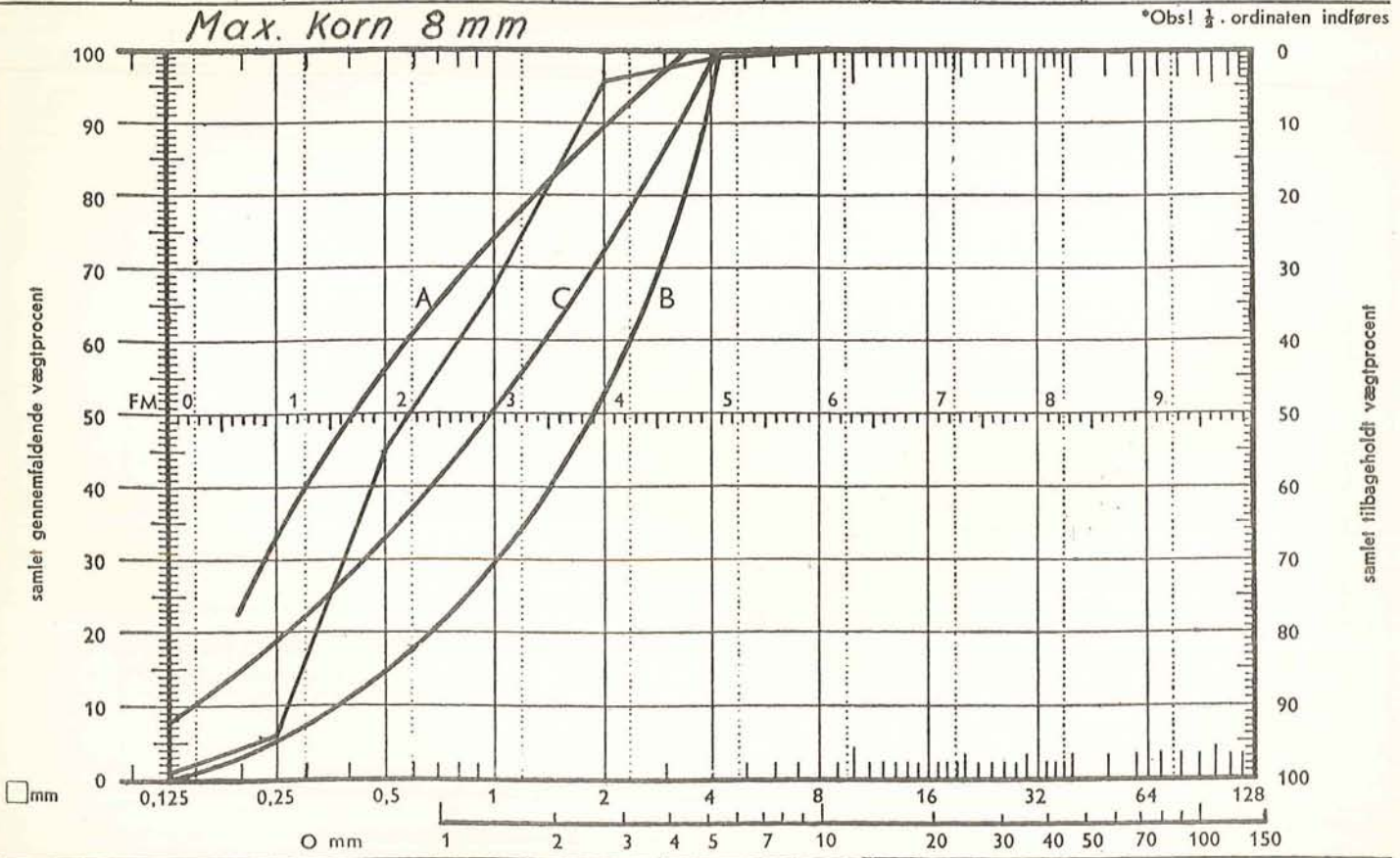
Unders. af sand og sten til beton iflg. Ξ DS Ξ 411
 vedr.: **Ellekildesand**

sag nr.

dato

leverandør	anvendes til Forsøgselement	betonrecept B4 nr.	betegnelse 7.16
indvindingssted	lev. fra	pr. nr.	mængde lev. dato
prøvemængde	udtaget bemærkning		

kornform:	<input type="checkbox"/> tør <input type="checkbox"/> våd sigtning		1. prøve	2. prøve	3. prøve	sum	middel	for standardsigter			
	prøvens vægt før sigtningen		g	g	g	g	%	gennemfald Σ %	gennemfald Σ %	tilbageholdt Σ %	
mineral:	Sigte		Sigterester								
beskrivelse:	<input type="checkbox"/> mm										
	128										
	64										
	32										
	16										
	8		5	4		9	0,5		100	0	
	4		37	34		71	3,5		99	1	
	2		300	276		576	28,8		96	4	
	1		212	227		439	21,9		67	33	
	0,5		377	407		784	39,2		45	55	
	0,25		59	47		106	5,3		6	94	
	0,125		10	5		15	0,8		1	50	
	ialt	1000	1000		2000	100,0		F. M. = 2,37			



firmastempel

Dansk Ingeniørforening
 Udvalget til rationalisering
 af byggeriet (udvalg II)

PRØVNING AF GRUS

prøve nr. **A3** nr. 2

Unders. af sand og sten til beton iflg. $\text{DS} \equiv 411$

vedr.:

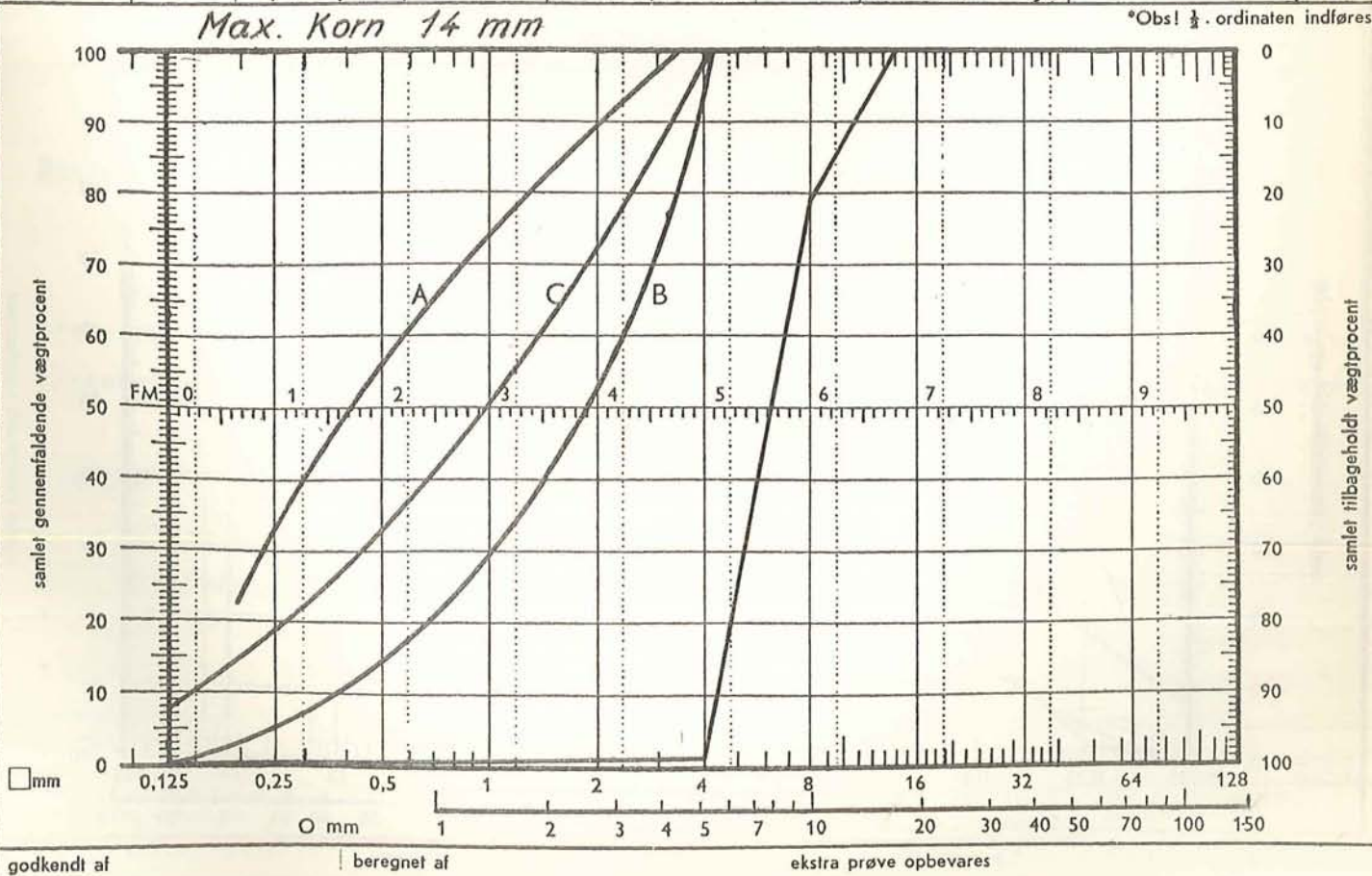
Søperlesten

sag nr.

dato

leverandør	anvendes til <i>Forsøgsэлемент</i>	betonrecept B4 nr.	betegnelse 7.17
indvindingssted	lev. fra	pr. nr.	mængde lev. dato
prøvemængde udtaget	bemærkning		

kornform:	<input checked="" type="checkbox"/> tør <input type="checkbox"/> våd sigtning		1. prøve	2. prøve	3. prøve	sum	middel	for standardsigter					
	prøvens vægt før sigtningen		1/2 g 55	1/2 g 55	g	g	0/0	gennem-fald	gennem-fald	tilbageholdt			
mineral:	Sigte		Sigterester					Σ 0/0	Σ 0/0	Σ 0/0			
beskrivelse:	<input type="checkbox"/> mm												
	128												
	64												
	32												
	16		183	230		413	207		100	0			
	8		810	763		1573	786		79	21			
	4		5	5		10	0,5		1,0	99			
	2		1	1		2	0,1		0,5	100			
	1								0,4	100			
	0,5		1	1		2	0,1		0,3	100			
0,25								0,2	100				
0,125								0,1	50				
ialt		1000	1000		2000	1000		F. M. = 5,70					



Dansk Ingeniørforening
 Udvalget til rationalisering
 af byggeriet (Udvalg II)

PRØVNING AF GRUS

prøve nr. **A3** nr. 3

Unders. af sand og sten til beton iflg. EDS 411
 vedr.:

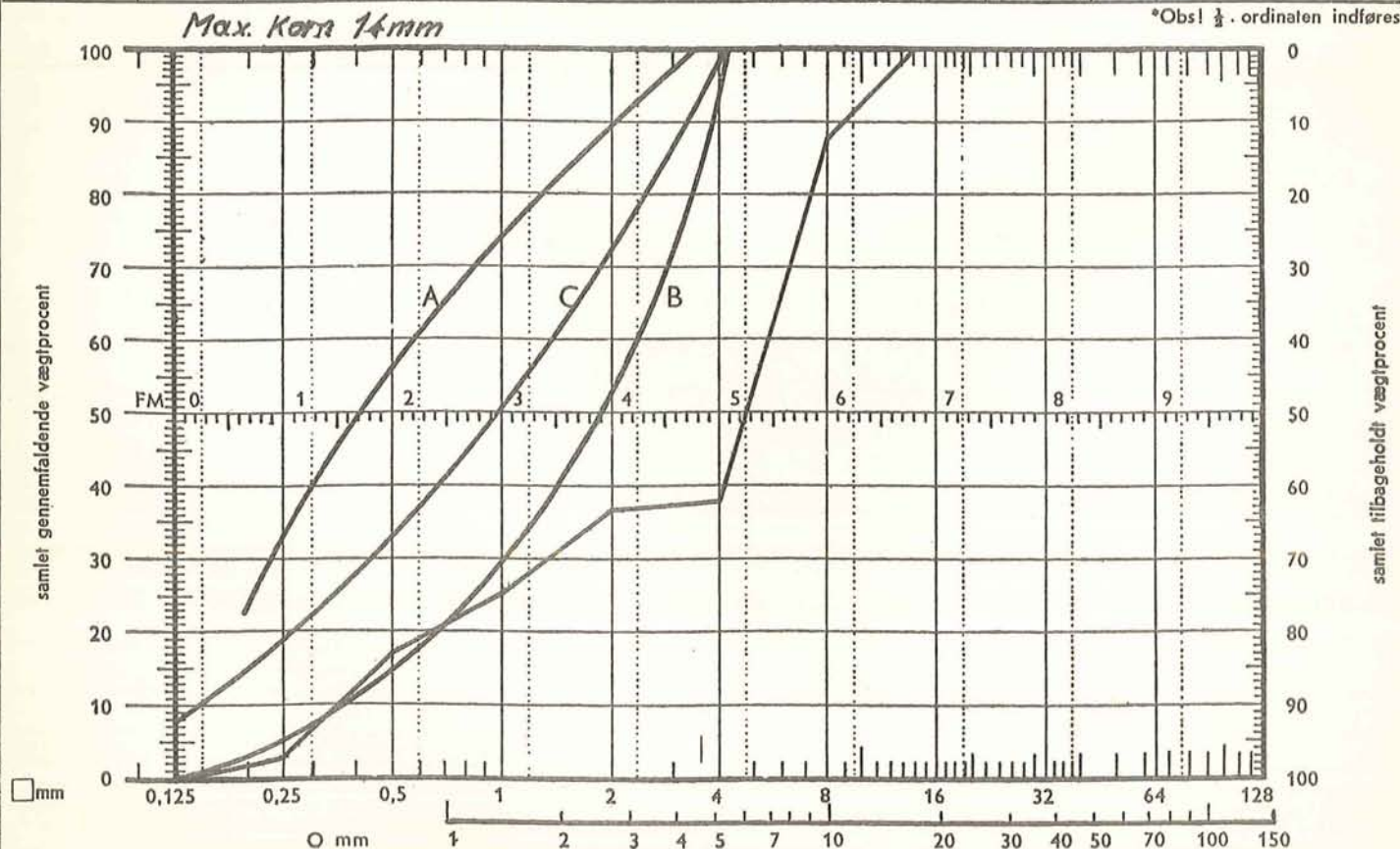
Samlet tilslag

sag nr.

dato

leverandør	anvendes til	betonre apt	betegnelse
	Forsøgsэлемент B4 nr.		7.18
indvindingssted	lev. fra	pr. nr.	mængde lev. dato
prøvemængde	udtaget	bemærkning	
		Kornkurven er konstrueret	

kornform:	prøvens vægt før sigtningen		1. prøve g	2. prøve g	3. prøve g	sum g	middel %	for standardsigter		
	Sigte		% Sigterester					gennemfald Σ %	gennemfald Σ %	tilbageholdt Σ %
mineral:	<input type="checkbox"/> tør	<input type="checkbox"/> våd sigtning	2 x sand	3,25 x sten			100,0			
beskrivelse:	<input type="checkbox"/> mm		%	%						
	128									
	64									
	32									
	16			671		671	12,8	100	0	
	8		9	2556		2565	48,9	87	13	
	4		71	16		87	1,7	38	62	
	2		576	3		579	11,0	36,5	63,5	
	1		439	1		440	8,4	25,5	74,5	
	0,5		784	1		785	14,9	17,5	82,5	
	0,25		106	1		107	2,0	2,5	97,5	
	0,125		15	1		16	0,3	0,5	99,5	
	ialt		2000	3250		5250	100,0	F. M. = 4,43		



(Bilag III fortsat)

RAPPORT II

Efter at de første resultater fra forsøgene med de først støbte elementer (rapport I) forelå, enedes man i udvalget om at udføre forsøg med et element, hvor den indvendige side bestod af en noget "damputæt" plade. Det vedtoges at støbe pladen af lecabeton.

Mål.

Pladens mål og nærmere udformning er fuldstændig som de tidligere støbte jernbetonplader. Tykkelsen er 5 cm. Ligesom ved de øvrige pladers støbning, blev der her støbt 4 af de små prøveplader, der også var 5 cm tykke. Der støbtes 2 stk. 20 cm terninger til nærmere bestemmelse af betonens data.

Formen.

Pladen støbtes direkte oven på en tidligere kasseret 7,5 cm tyk forsøgsplade, hvor omkring der sættes træsidestykker.

Armeringen.

Denne var den samme som for den tidligere støbte 7,5 cm jernbetonplade: \varnothing 5 pr. 20 cm i begge retninger placeret midt i pladen.

Betonmaterialerne.

Cementen var ligesom før almindelig Rapid cement.

Tilslaget var lecaklinker i størrelsen 3 - 10 mm og blandingsforholdet 1:10 efter rumfang. Blandingen foregik på en modstrømsblandemaskine, og betonen blev ved udstøbningen håndstampet. Der blev ikke tilsat luftindblandingsmiddel til betonen.

Lagring.

Pladen lagredes på den plade, der tjente som bundform lige til leveringsdagen. Den første uge skete lagringen indendørs, resten af tiden udendørs.

Prøvning.

Pladen m.m. støbtes den 9.5.56 og den blev afleveret den 31.5.56 til Laboratoriet for Opvarmning og Ventilation. Terningerne afleveredes samme dag til Laboratoriet for Bygningsteknik. Forsøgsresultaterne for terningerne fremgår af laboratoriets rapport.

A f s k r i f t

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Laboratoriet for Bygningsteknik.

Sag: 30/56

12.6.56

Trykforsøg med Lecabetonterninger.

Rekvireret af Dansk Ingeniørforenings rationaliseringsudvalg II har laboratoriet den 6. ds. foretaget trykforsøg med to stk. lecabetonterninger indleveret af rekvirenten.

Umiddelbart før forsøget er prøverne vejede. Trykforsøgene er udført på laboratoriets 200 tons presse indstillet til $P_{\max} = 20$ tons.

Resultaterne var følgende:

Terning mrk. SR 176:	Rumvægt:	665 kg/m^3
	Trykstyrke:	22 kg/cm^2
Terning mrk. SR 177:	Rumvægt:	710 kg/m^3
	Trykstyrke:	27 kg/cm^2

(Sign.) Axel Efsen / H. Krenchel.

Bilag IV

LITTERATURFORTEGNELSE

- E. Suenson: Vanddamps diffusion i vægge og rørkapper.
Ingeniørvidenskabelige skrifter. København 1946.
- Ingeniørhandboken, udgivet af C. A. Strömberg. Stockholm 1947.
- B. J. Rambøll: Varme- og lydisolering af betonhuse.
København 1949.
- Carl Munters: Fukt i kylrumsväggar.
Tidsskrift VVS, nr. 2 og 3. Stockgölm 1950.
- H. Niemann, VDI Hannover: Die Entfeuchtung von Kälteisolierungen.
"Schiff und Hafen", Heft 8. August 1950.
- K. Egner: Feuchtigkeitdurchgang und Wasserdampfkondensation in Bauten.
Fortschritte und Forschungen im Bauwesen, Reihe C, Heft 1. 1950.
- The Refrigerating Data Book, udgivet af The American Society of Refrigeration Engineers (ASRE). 1951.
- Poul Becher og Vagn Korsgaard: Fugt og Isolering.
Udgivet af Statens Byggeforskningsinstitut,
anvisning nr. 7. København 1951.
- Matts Bäckström: Kylteknikern. Stockholm 1951.
- G. Hofbauer: Wärme- und Feuchtschutz im Bauwesen.
Allgemeine Wärmtechnik 1954. Nr. 8.
- H. B. Jespersen: Rapport over forsøg vedrørende ligevægts- og diffusionsfugtindhold i vægmaterialer.
Teknologisk Institut 1954.
- H. Granum, Sven D. Svendsen og Annanias Tveit: Lette treveggers vindtethed.
Norges Byggeforskningsinstitut,
rapport nr. 7, 1954.
- Annanias Tveit: Vanddampdiffusjonstal for papp og trefiberplater.
Norges Byggeforskningsinstitut,
rapport nr. 9, 1954.

Sven D. Svendsen: Driving rain.

Norges Byggforskningsinstitut 1954.

Øivind Birkeland og Robert Wigen: Vindundersøkelser i fuge mellem karm og vegg.

Norges Byggforskningsinstitut, rapport nr. 15, 1955.

Folke Hagmann: Icke bärande ytterväggar.

Byggmästaren B 3, 1955.

Bo Adamson og Lars Aldrin: Lätta träväggskonstruktioner i Norge.

Byggmästaren B 5, 1955.

Bo Adamson og Lars Aldrin: Regelväggskonstruktioner i Sverige.

Byggmästaren B 3, 1956.

Ingemar Nyquist: Elementbyggda flerfamiliehus.

Byggmästaren B 5, 1956.

Fuger. Publikation nr. 4 fra Dansk Ingeniørforenings Udvalg til Rationalisering af Byggeriet. Teknisk Forlag.

Asbjørn Torp og Trygve Græe: Konveksjonsstrømninger i isolationsmaterialer.

Bygg nr. 8, 1956.

BILAG V
SUMMARY

Appendix V

Summary

In this publication, the Committee for Rationalization of Building Activities set up by the institution of Danish Engineers gives a summarized account of the design and construction of present day facing components and the manner in which they act, the main emphasis being laid on concrete sandwich components. Page 3.00 fol. shows a number of examples of designs that have been constructed. The chapter, page 4.00, fol. gives a summary of the technical data and fields of applications of concrete and insulating materials. The chapter, page 5.00 fol. sums up a number of the functions of a facing component: resistance to heat transmission, wind and water tightness, transmission or passage of moisture, heat capacity, cold conductor effects, the influence of the weather, the effect of and resistance to fire, and decorative effects. The section on passage of moisture (diffusion, condensate, capillary action, draining etc) is summed up on greater detail page 5.42 and the section on cold conductors (linear and local) is summed up in greater detail on page 5.78 and 5.94.

In the chapter on page 6.00 fol. is given an account of the purpose and a description of the methods used in research work to examine the factors governing passage of moisture that the committee has started in the laboratory of the Technical University of Denmark. This work is as yet far from finished, and a research report will be published later. Results obtained up to the present would seem to show that, for normal sandwich components, i.e. concrete-mineral wool-concrete, dangerous quantities of condensed ice will not be formed even under extreme conditions. (For three weeks the outer temperature was about -7° C (19° F), the inner temperature about 20° C (68° F) and the relative humidity was 70 %).

It is, however, necessary that the insulating layer is drained outwards. On the other hand, ventilated hollow spaces behind the outer concrete shell do not seem to have any beneficial effects. The effect may even be detrimental.

For information about joints and jointing, the reader is referred to the committee's publication no. 4 "Joints in pre-cast Constructions", which also gives a number of detailed examples of concrete constructions as have been made.

Attention is drawn to the fact that in the Danish text, a comma is used to indicate the decimal point, and that for subtraction and negatives both the signs - and ÷ are used while the sign : is used to indicate division. Temperatures are given in $^{\circ}$ Centigrade.

PLANLAGTE PUBLIKATIONER
I MONTAGEBYGGERI-SERIEN

omhandler følgende emner:

Udvalg 1. *Montagebyggeriet idag. (Publ. nr. 9).*

Udvalg 2. *Kuldebroer. (Publ. nr. 2).*
Fugttransport i ydervægge. (Publ. nr. 7).
Facadeelementers rationelle opbygning og
virkemåde. (Publ. nr. 8).
(Publ. nr. 8 inkluderer publ. nr. 2 og 7).

Udvalg 3. *Skiver opbygget af elementer. (Publ. nr. 1).*
Bæreevne af tværbelastede,
indstøbte bolte.

Koncentrerede belastninger på
bjælker. (Publ. nr. 5).

Udvalg 4. *Fuger. (Publ. nr. 4).*
Samling af elementer,
specielt betonelementer.

Byggeriets nøjagtighed. (Publ. nr. 6).
Statistik, målinger fra praksis,
betonelementer, forme, råbygningen.

Installationer.
Modulordningen. (Publ. nr. 3).

KAT.

DANSK INGENIØRFØRENING · BYGGERATIONALISERINGSUDVALGET

MONTAGEBYGGERI

PUBLIKATION NR.

8

Arbejdsudvalg 2: Hovedrapport
(includerer publ. nr. 2 og 7).

FACADEELEMENTERs

Rationelle opbygning og virkemåde

*Rational Design of Facing
Components and their Function*

ARBEJDSUDVALG 2 KØBENHAVN 1957

I KOMMISSION HOS TEKNISK FORLAG

LABORATORIET FOR BYGNINGSTEKNIK

MONTAGEBYGGERI 8

FACADEELEMENTER