

INSTITUTTET FOR HUSBYGNING

Rapport nr. **116**

N.-O. HILBERT
CYRILL HOLTSE

**FUGTTRANSPORT
FRA FUGEMØRTEL
TIL BETONELEMENTER**

Den polytekniske Lærestalt, Danmarks tekniske Højskole
Lyngby 1976

FORORD	
SYMBOLLISTE	
INDLEDNING	1
RESUMÉ	2
1. FORSØGSBESKRIVELSE	3
1.1 Forsøgsbetingelser	3
1.2 Forsøgssopstilling til fugttransportmåling	5
2. KVALITATIVE MÅLINGER	7
2.1 Fugernes sætning	7
2.2 Utætheder i formsamlinger	7
2.3 Adhæsion mellem fuge og element	7
2.4 Revner i fugerne	7
3. KVANTITATIVE MÅLINGER	10
3.1 Fugernes sætning	10
3.2 Fugernes massefylde	10
3.3 Fugernes styrke	10
4. FUGTTRANSPORT	12
4.1 Fugttransport fra fuge til element bestemt ud fra fugernes massefylde	12
4.2 Fugttransport fra fuge til element bestemt ud fra gamma-stråletransmission	12
4.3 Vandopsugning i elementbetonen som funktion af tiden	13
5. TIDLIGERE FORSKYDNINGSFORSØG MED VÆGFUGER	16
5.1 Pommeret's forsøg	16
5.2 Hansen & Olesen's forsøg	17
5.3 Vurdering af forsøgsbetingelser	17
5.3.1 Støbeprocessen	17
5.3.2 Geometrien	17
5.3.3 Elementbetonen	18
5.3.3 Fugemørtelens v/c-tal	18
6. KONKLUSION	19
7. LITTERATUR	21

FORORD

De undersøgelser, som er behandlet i nærværende rapport, er udført, for at få en idé om hvad fugttransporten fra frisk til hærdet beton betyder for en fugemørtel udstøbt mellem tørre betonelementer. Når problemet er taget op, skyldes det dels, at de forskydningsforsøg med vægfuger, som hidtil er udført, ikke behandler problemet, dels at man i dag har mulighed for at måle fugttransporten fra mørtel til betonelement ved hjælp af gammastråletransmission.

Det foreliggende arbejde er udført ved Instituttet for Husbygning i forbindelse med et licentiatprojekt, som Cyrill Holtse arbejder på, omfattende bl.a. fuger i betonelementbyggeri. Idéen til det udførte forsøg fik N.-O. Hilbert efter en række diskussioner mellem de to forfattere.

Forsøgets fugttransportmålinger er foretaget af lic.techn. A.F.Nielsen, Laboratoriet for Varmeisolering, ved hjælp af laboratoriets gammatransmissionsmåleudstyr. Udstyret er udviklet med støtte fra Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd.

SYMBOLLISTE

	side
A : Samlet fugeareal	16
B : Samlet areal af forskydnings- låse	16
B : Kapillaritetstal	14
F : Tværsnitsareal af armering	16
G : Vandopsugning	12
N : Talletal	13
N ₀ : Talletal til starttidspunkt	13
N _t : Talletal til tiden t	13
P : Brudlast	9
t : Tid fra starttidspunkt	14
x _b : Fugetykkelse	13
x _n : Afstand fra sugende flade	14
x _m : Regningsmæssig vandindtræng- ningsdybde	14
Δ : Tilvækst	13
Δρ : Ændring i massefylde	12
Δψ : Opsuget vandmængde	13
Δψ _t : Opsuget vandmængde til tiden t	13
Φ : Armeringsgrad	16
μ _v : Svækkelseskoefficient for vand	13
ρ _v : Massefylde for vand	13
σ _c : Cylinderstyrke for beton	9
σ _f : Flydespænding for armering	16
σ _t ^b : Bøjetrækstyrke for beton	16
σ _{sp} ^b : Spaltetrækstyrke for beton	9
τ _b : Forskydningsbæreevne for fuger	16
ψ : Fugtindhold	13
ψ ₀ : Fugtindhold til starttidspunkt	13
ψ _t : Fugtindhold til tiden t	14

INDLEDNING

Udstøbes mørtelfuger mellem tørre beton-elementer, må det antages, at der sker en fugttransport fra fugemørtel til elementer. For at få en idé om denne fugttransport's indflydelse på fugemørtelens egenskaber har vi udført en række forsøg.

Mellem tørre betonprøveelementer udstøbtes to typer fuger. Den ene type, der blev anvendt som reference, var forseglet i den hensigt helt at forhindre fugttransport. Den anden type fuger var også forseglet dog ikke langs de to flader, der stødte op til elementerne. På denne måde var det muligt at få et billede af fugttransporten til elementerne ved at sammenligne de to fugetyper.

Straks efter udstøbningen startedes kontinuerlige målinger af elementernes og fugemørtelens vandindhold ved hjælp af gammastråletransmission.

Efter 14 dages forløb blev fugerne skilt fra elementerne, og fugernes massefylde blev bestemt. Fugerne blev derefter skåret i ca. 14 cm lange prizmer, der blev anvendt til bestemmelse af spaltettrækstyrken.

Elementbetonens og fugemørtelens trykstyrker blev bestemt ved prøvning af 15/30 cm prøve-cylindre.

Endelig blev der til belysning af elementbetons vandopsugningsevne udført et opsugningsforsøg på et prøveemne fremstillet af den anvendte elementbeton.

Ved valg af materialer og geometri har vi søgt at efterligne forholdene i den normale danske vægfuge, men forsøgene dækker ikke variationer i disse forhold.

RESUME AF RAPPORTENS INDHOLD:

1. Forsøgsbeskrivelse

Der beskrives forsøgsbetingelser og forsøgsopstilling for fugeforsøg med 4 mørtelfuger med tværsnit 7 x 7 cm og højde 70 cm udstøbt lodret mellem 7 cm tykke betonelementer. Tegninger og fotografi af forsøgsopstillingen er vist på side 4.

2. Kvalitative målinger

Her beskrives iagttagelser under forsøget vedrørende sætning, adhæsion, revnedannelser og utætheder. Fotografier af revnedannelser i fugerne er vist på side 6, 7 og 8.

3. Kvantitative målinger

Afsnittet beskriver måling af fugernes sætning, massefylde og spaltetrækstyrke. Måleresultaterne er angivet i tabelform på side 9.

4. Fugttransport

Afsnittet behandler måling af fugttransporten fra fuge til element, dels bestemt ud fra fugernes massefylde og dels bestemt ved hjælp af gammastråletransmission. Derudover omhandler afsnittet en undersøgelse af vandopsugningen i en prøve af elementbeton.

5. Tidligere vægfugeforsøg

Her gennemgås forsøgsbetingelserne for tidligere udførte vægfugeforsøg af Pommeret og af Hansen & Olesen, specielt med henblik på betydning for fugttransporten fra fuge til element såsom støbeprocess, geometri, betonelementernes tæthed og fugemørtelens v/c-tal.

6. Konklusion

Hovedresultat af undersøgelsen er, at man må forvente revner i fugemørtelbetonen p.g.a. plastisk svind, hvis den normale danske vægfuge udstøbes med fugemørtel i henhold til fugeanvisningen [7].

Forfatterne mener ikke, at disse revner kan undgås ved forvanding af elementerne, idet det for tørre betonelementer vil kræve over en times vanding, men at problemet bør løses ad betonteknologisk vej.

	Beton kg/m ³	Mørtel kg/m ³
Rapid cement	305	360
Fint sand (tørt)	960	1470
Perlesten	875	—
Vand	215	330
Flydemål	—	23 cm

Tabel 1.1. Sammensætning af beton og mørtel i egne forsøg.

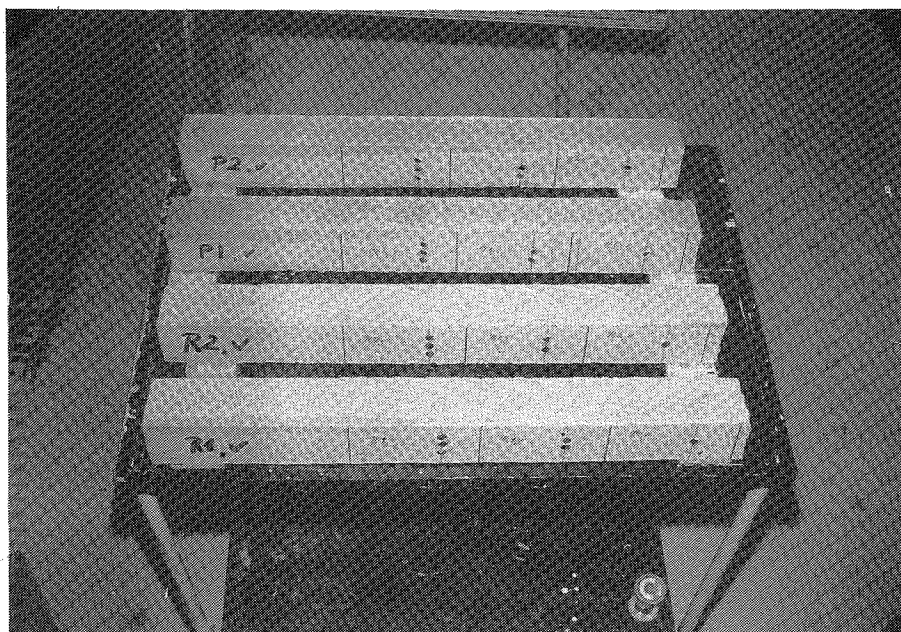


Fig.1.1. Forsøgsfugerne.

1. FORSØGSBESKRIVELSE

1.1. Forsøgsbetingelser

Til forsøgene blev fremstillet 5 elementer, som blev støbt vandret og vibreret under støbningen. De havde en størrelse på 70 x 19,5 x 7 cm. Den ene rand på hvert element blev støbt med en så glat overflade som muligt, dels for at efterligne overflader støbt mod stål, dels for at gøre det lettere at skille de senere udstøbte fuger fra elementerne. Betonen i elementerne var af nogenlunde samme styrke som den beton, der normalt anvendes til fabriksfremstillede elementer ($v/c = 0,7$). Sammensætningen fremgår af tabel 1.1. Elementerne blev afformet efter 1 døgn og derefter lagret indendørs i yderligere 13 døgn, før fugeudstøbningen fandt sted.

Mellem de 5 betonelementer blev der udstøbt 4 fuger (70 x 7 x 7 cm). Fugemørtelen blev fremstillet i overensstemmelse med "Anvisning i udstøbning af fuger" [7], og data for mørtelen fremgår af tabel 1.1. Flydemålet afviger dog 3 cm fra anvisningens anbefalede værdi. Fremgangsmåden med udstøbningen var ligeledes i overensstemmelse med anvisningen, d.v.s. at fugerne blev fyldt ved hjælp af spand og stampet med et armeringsjern. Der blev ikke foretaget vanding af elementerne før udstøbningen.

For at kunne måle vandopsugningen fra mørtel til elementer gennem kontaktfladerne så entydigt som muligt blev de øvrige fugeoverflader forseglet. Desuden blev to af fugerne forseglet på alle flader. Disse fuger blev anvendt som referencefuger.

For nøjere at kunne studere fugernes egenskaber blev disse efter 14 døgn skilt fra elementerne og skåret op i ca. 14 cm lange prizmer. Prismene blev mærket med en, to eller tre prikker afhængig af placeringen i fugen. Det øverste prisme fik således en prik (se fig. 1.1).

Til trykstyrkeprøvning blev fremstillet tre 15/30 cylindre ved både elementstøbning og fugeudstøbning.

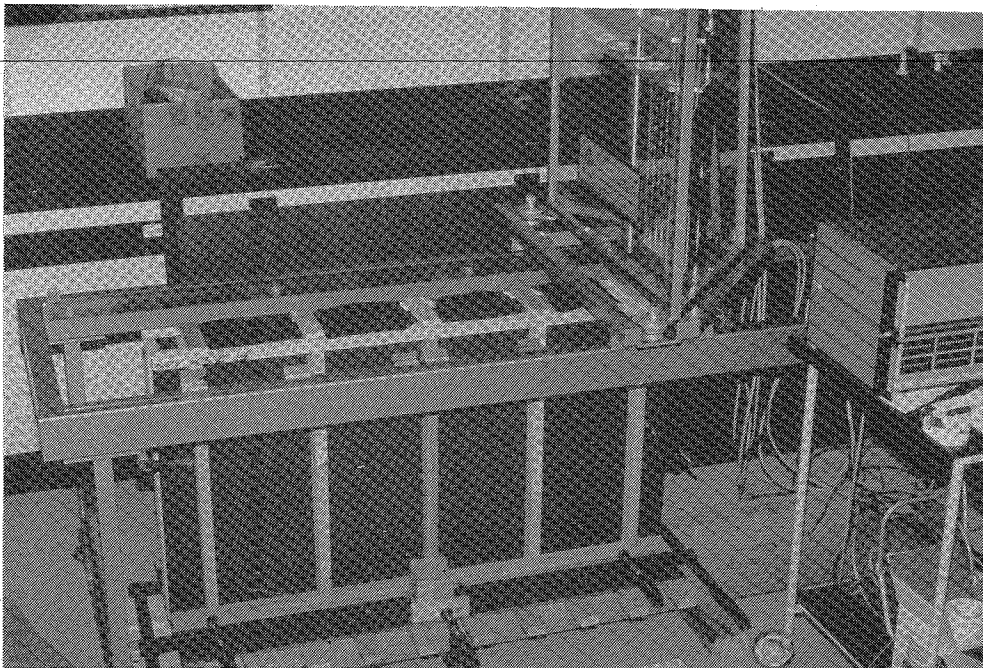


Fig.1.2.

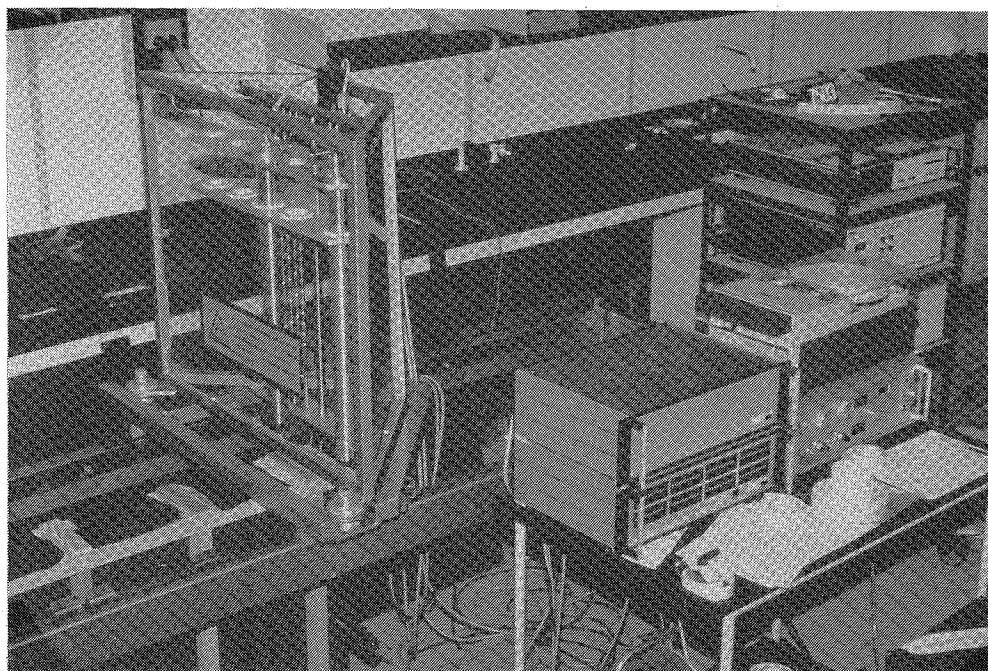


Fig.1.3.

Fotos af forsøgsopstilling.

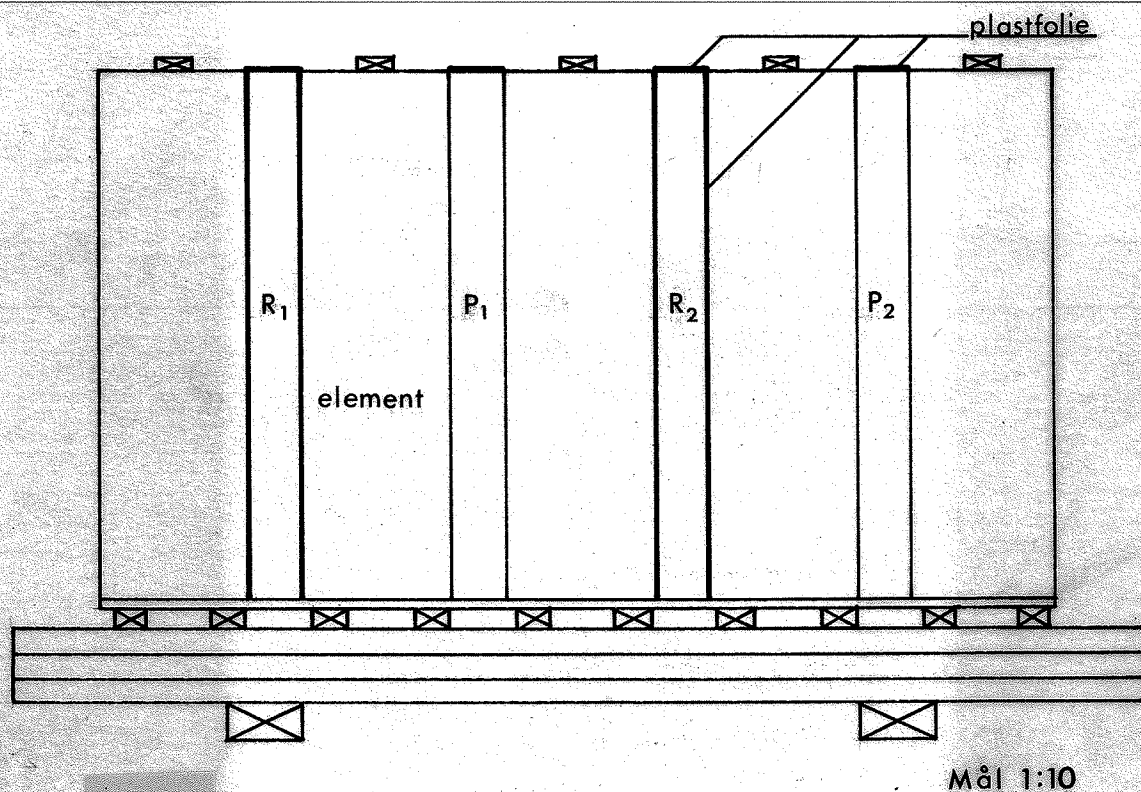


Fig. 1.4. Lodret længdesnit i opstilling.

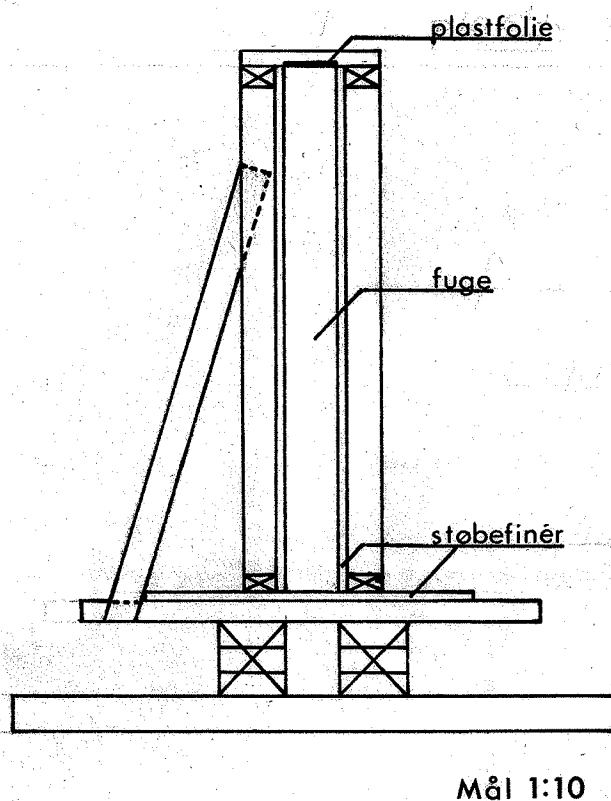


Fig. 1.5. Lodret tværsnit i opstilling.

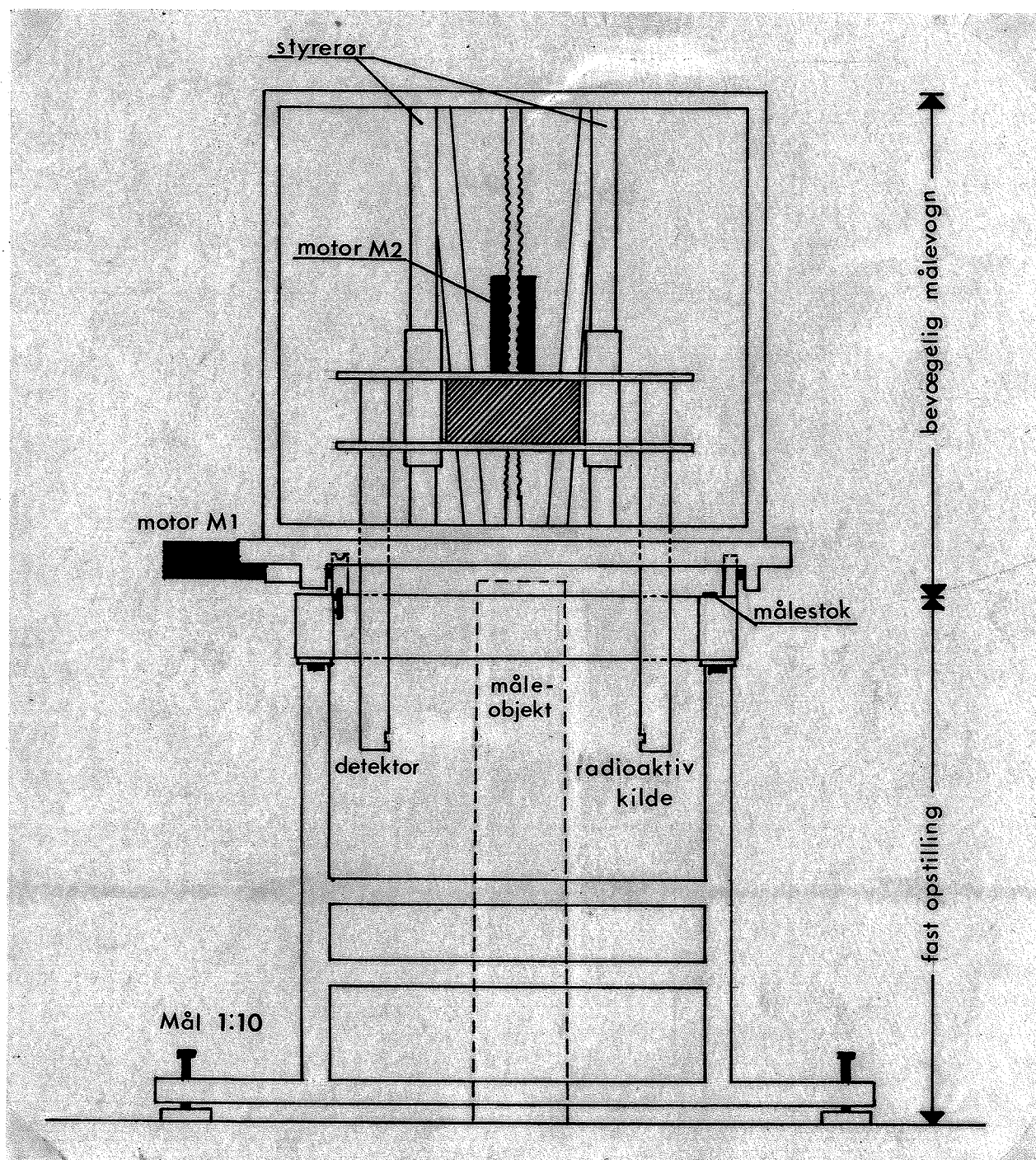
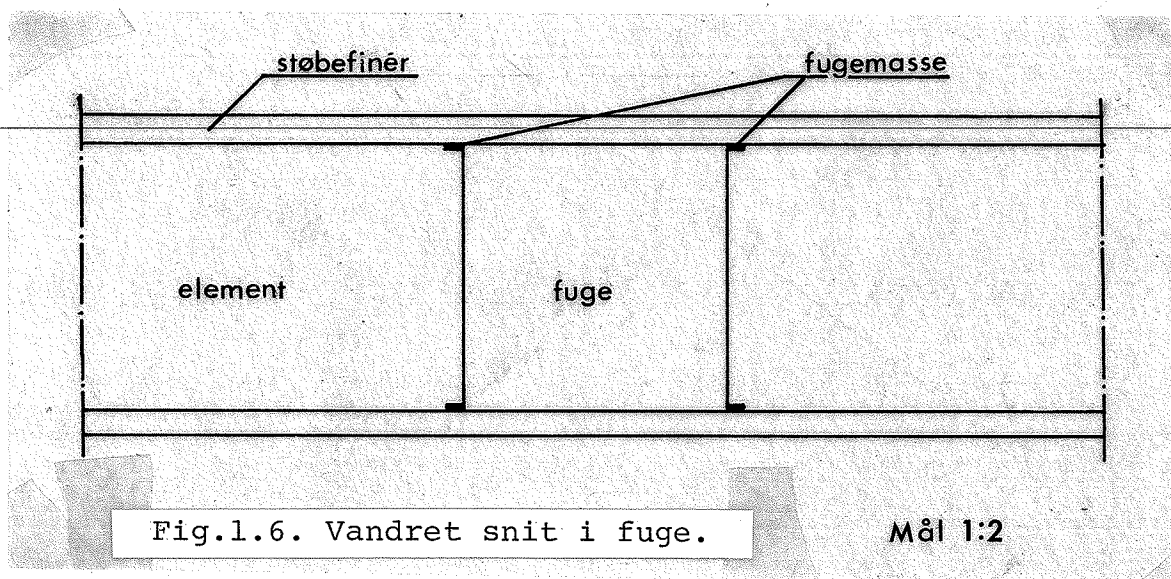
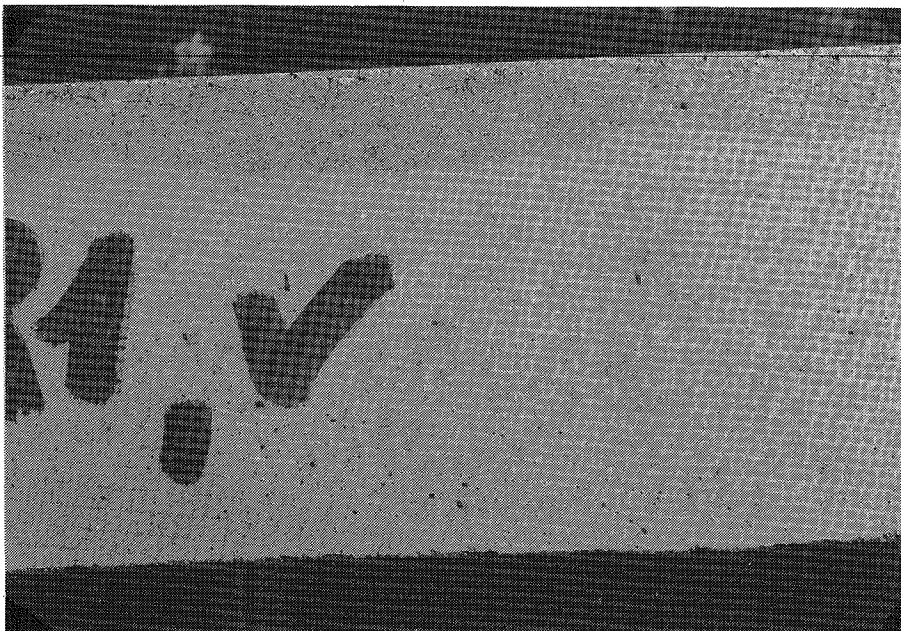


Fig.1.7. Gammastråletransmissionsmåleudstyr.

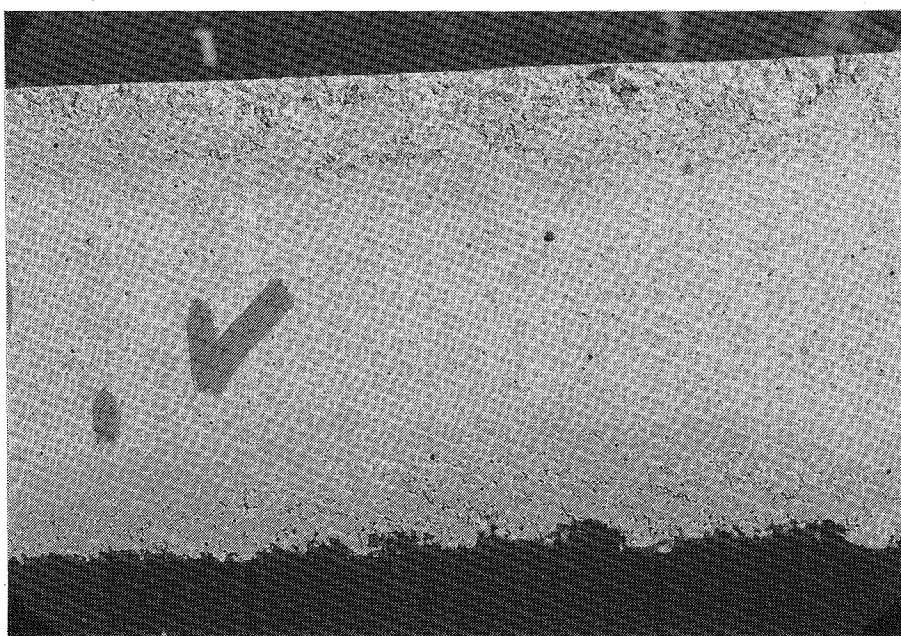
1.2 Forsøgsopstilling til fugttransportmåling

Opstillingens geometri fremgår af 1.4 & 1.5. På fig. 1.4 er vist, at der i kontaktfladen mellem element og referencefuge er placeret en vandtæt plastfolie. Forseglingen over samtlige fuger er ligeledes vist. Forskallingen var overfladebehandlet støbefinér. For at sikre at der ikke trængte vand ind mellem element og forskalling, blev samlingerne forseglet med fugemasse, som vist på fig. 1.6.

Fig. 1.7 viser et lodret snit i apparatet til fugtmåling. Det består af 2 dele, en fast del samt en bevægelig målevogn, der kan bevæges i vandret retning. Denne bevægelse styres af motoren M1. På vognen er selve måleaggregatet monteret. Det består af to lodrette rør, der ved hjælp af motoren M2 kan bevæges i lodret retning. Det ene rør indeholdende en radioaktive kilde (Cobolt 57) og det andet en detektor, som registrerer antallet af modtagne impulser udsendt som gammastråler fra den radioaktive kilde. Detektoren er tilkoblet elektronisk udstyr til registrering af målingerne (se fig. 1.2 & 1.3). Måleobjektet placeres mellem kilden og detektoren. Både vognens bevægelser og målingerne kan indstilles til at foregå fuldstændig automatisk.

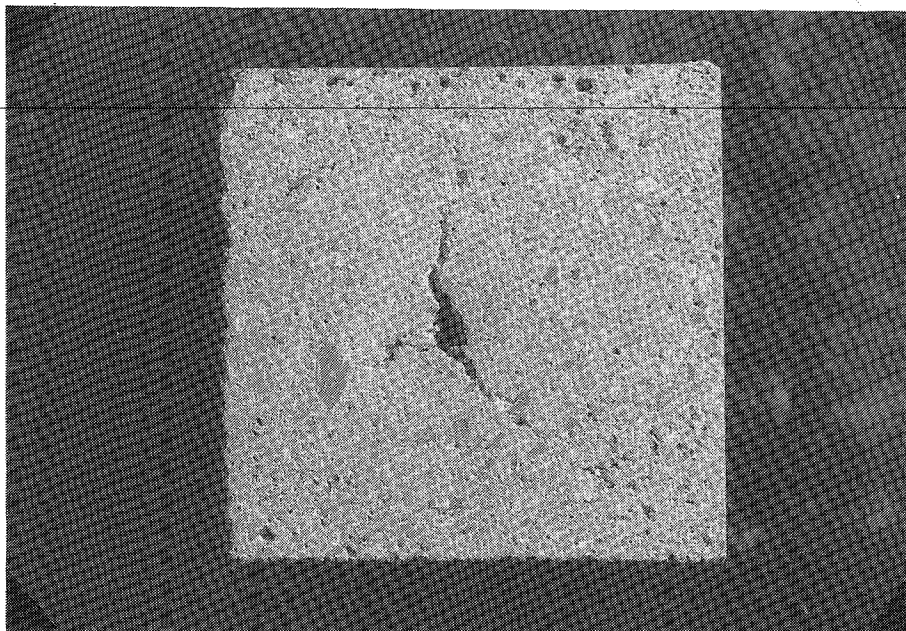


a) Referencefuge R_1 .

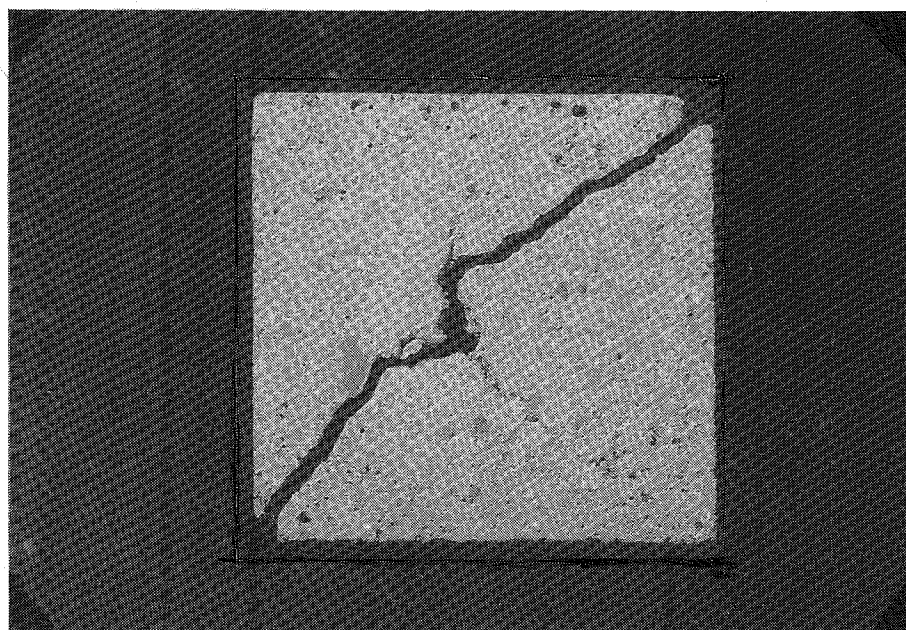
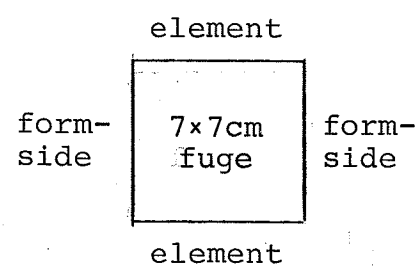


b) Prøvefuge P_1 .

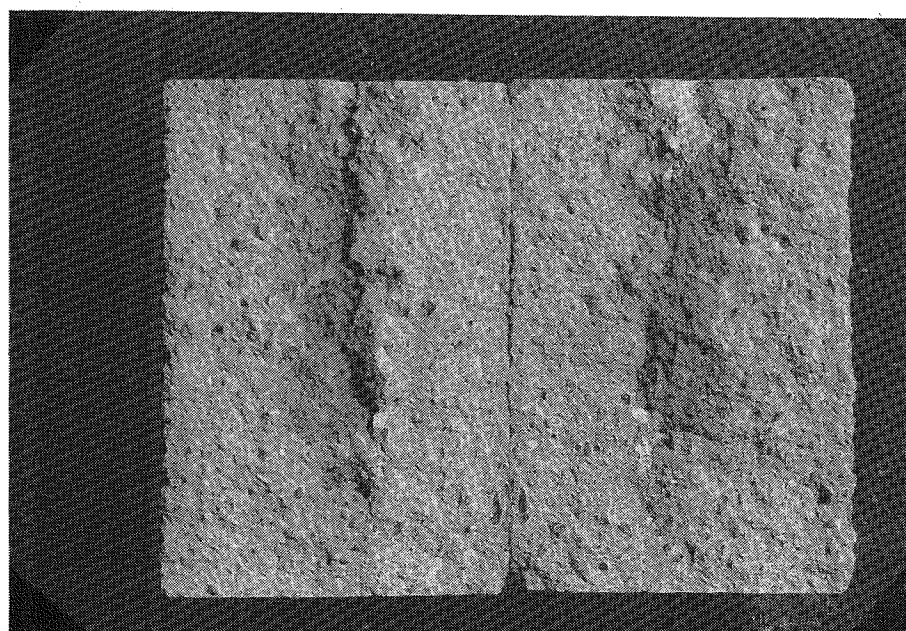
Fig.2.1. Formside af fuge nederst.



a) Snit 20 cm under overkant fuge.

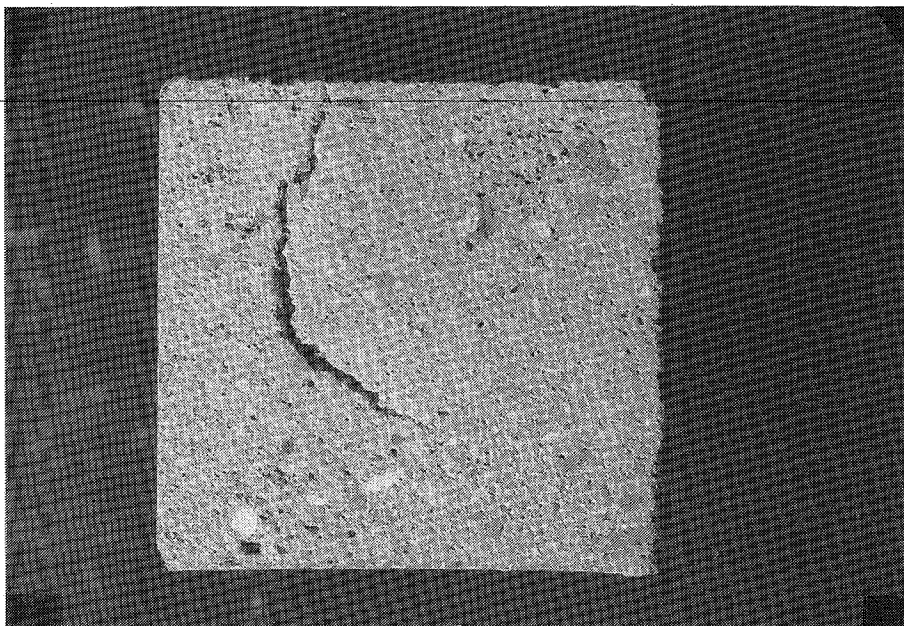


b) Som a) efter diagonal spaltning.

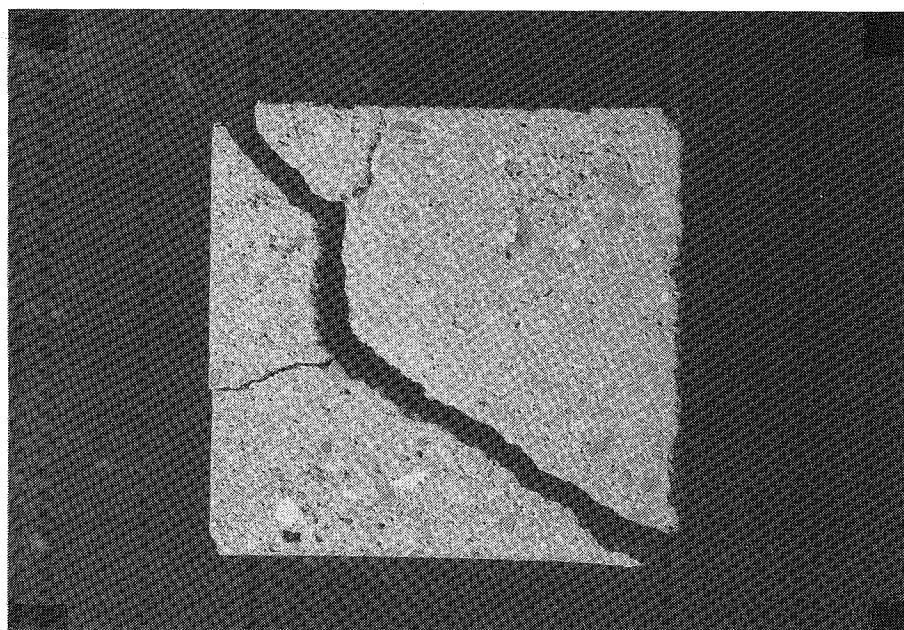
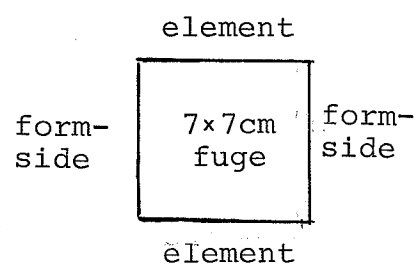


c) Brudflade efter spalteprøvning.

Fig.2.2. Prøvefuge P₁ ..
lodret revne.



a) Snit 20 cm under overkant fuge.



b) Som a) efter diagonal spaltning.



c) Brudflade efter spalteprøvning.

Fig.2.3. Prøvefuge P₂, lodret revne.

2. KVALITATIVE MÅLINGER

2.1 Fugernes sætning

Fugerne var som nævnt for oven lukket med tætsluttende plast. Efter kort tids forløb konstateredes en nedsugning af plastfolien over de to referencefuger R_1 og R_2 , hvori- mod der intet var at se på de to andre.

Denne observation fortæller os, at der i referencefugerne sker sætninger kort tid efter udstøbningen. At en tilsvarende ned- sugning af folien ikke viser sig ved P_1 og P_2 kan skyldes, at sætningen foregår så langsomt, at undertryk kan udlignes gennem små utætheder.

2.2 Utætheder i formsamlinger

Som nævnt var det ønskeligt om formen var fuldstændig vandtæt. Desværre lykkedes det ikke fuldt ud at opnå dette, idet vi obser- verede udsivende vand forneden ved de to referencefuger. At det samme fænomen ikke indtraf ved fugerne P_1 og P_2 kan skyldes, at elementerne har opsuget vandet.

Desuden viser fig.2.1 mørkfarvning af hjør- nerne, som yderligere viser, at formen ikke har været helt tæt.

2.3 Adhæsion mellem fuge og element

Da fugerne skulle skilles fra elementerne, viste der sig en ret stor adhæsion, på trods af at elementerne ikke blev forvan- det.

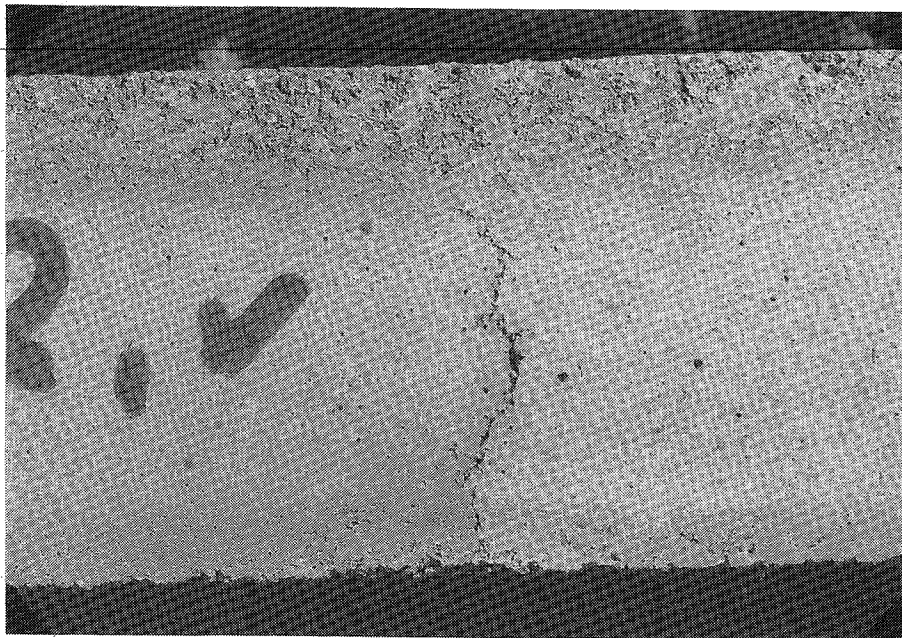
Det må her antages, at de tørre elementer straks begynder at suge vand fra fugemørte- len. Ved denne transport sker samtidig en transport af cementpartikler, som sammen- kitter fuge og element i støbeskellet.

2.4 Revner i fugerne

Ved opskæringen af fugerne konstateredes revner i det indre af fugerne P_1 og P_2 men ikke i fugerne R_1 og R_2 . Revnerne i fugerne P_1 og P_2 viste sig at være lodrette revner af en længde på op til 15 cm, se fig. 2.2 og 2.3.

Forklaringen på revnernes opståen kan være følgende:

a) Revne 58 cm under
overkant fuge,
side mod form.



b) Som a), men
side mod element.

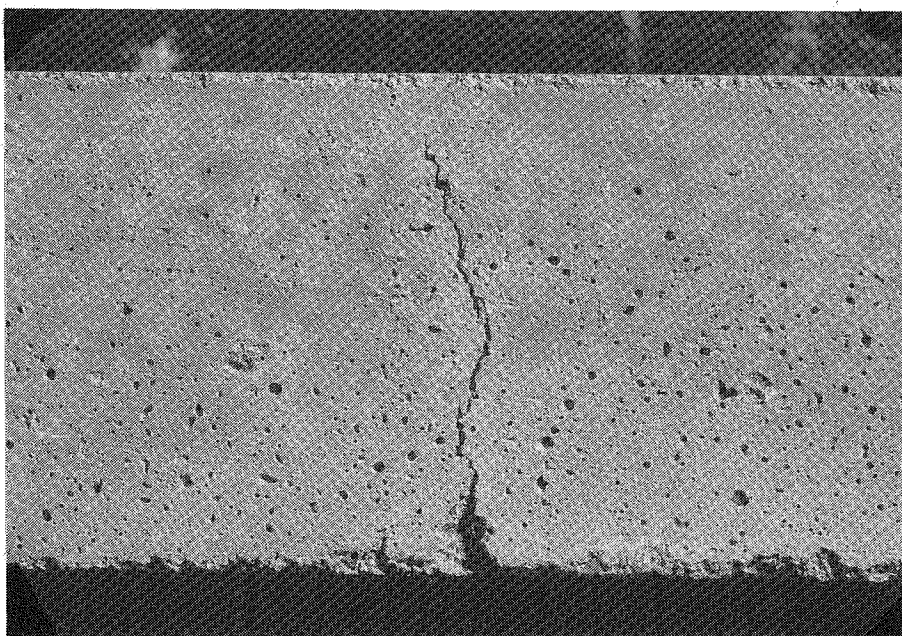


Fig.2.4. Prøvefuge P₂,
vandret revne.

På grund af elementernes porøsitet er de begyndt at suge vand fra mørtelen kort efter udstøbningen. Dette medfører at mørtelen hurtigt bliver stiv i nærheden af støbeskellet. Den sætning som efterhånden måske, kan således kun foregå i den midterste plastiske zone. Denne zone har imidlertid en så lille vandret udstrækning, at "sætningen" hovedsagelig foregår i vandret retning, hvorved de lodrette revner opstår. Det sås tydeligt på revnerne, at de måtte være dannet i det plastiske stadium, idet der ikke var tegn på brud. Det vil sige, at det observerede fænomen må antages at være et tilfælde af plastisk svind.

Til slut skal nævnes at prøven P_2 også havde en ret stor vandret revne forinden, se fig. 2.4.

Fuge	Sætning mm	Massefylde Kg/m ³
R ₁	12	2180
R ₂	9	2190
P ₁	7	2150
P ₂	4	2130

Tabel 3.1. Data for fuger i egne forsøg.

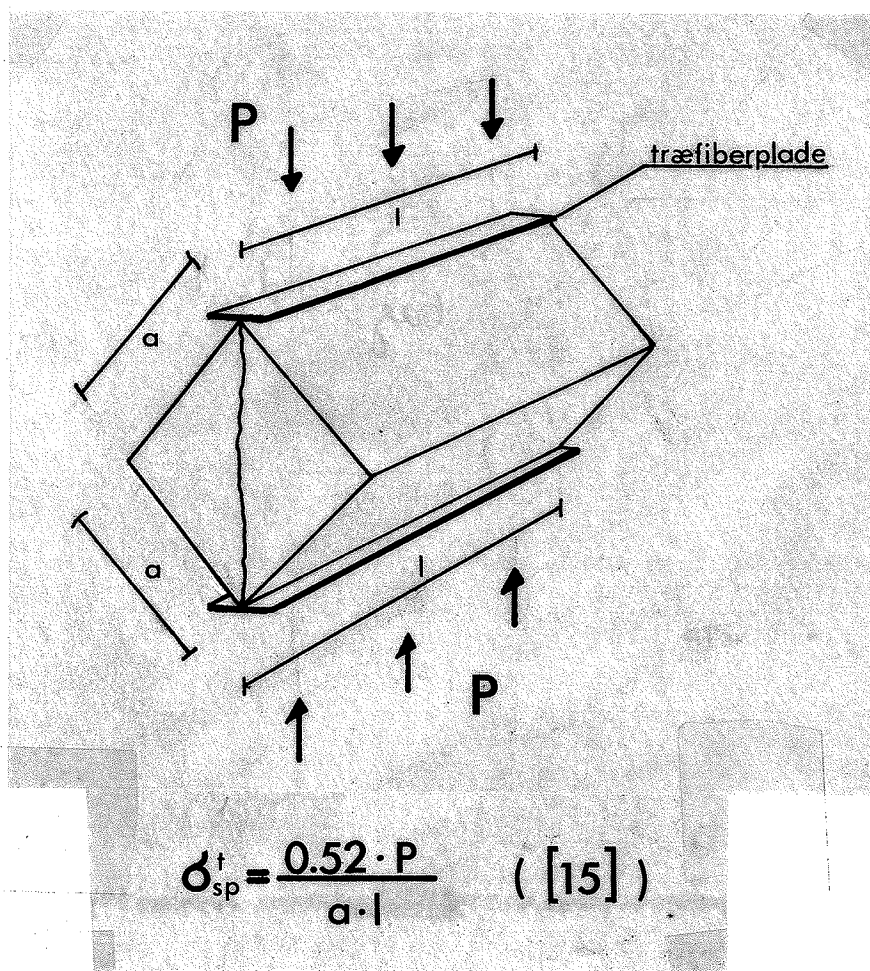


Fig.3.1. Spaltetrækforsøg.

Prisme	P kN	σ_{sp}^t MN/m ²
R ₁	50,5	2,58*
R ₁ ^{...}	32,5	1,66
R ₁ ^{...}	41,2	2,07
R ₂	34,1	1,69
R ₂ ^{...}	42,0	2,11
R ₂ ^{...}	34,4	1,73
P ₁	32,9	1,65
P ₁ ^{...}	33,9	1,70
P ₁ ^{...}	36,8	1,85
P ₂	26,9	1,37*
P ₂ ^{...}	27,6	1,38*
P ₂ ^{...}	38,8	1,92

Tabel 3.2. Brudlast P og spaltetrækstyrke σ_{sp}^t ved spaltetrækforsøg.

	P kN	σ_c MN/m ²	Middel MN/m ²
Element- beton	575	32,47	32,2
	586	33,09	
	549	31,00	
Fuge- mørtel	408	23,04	23,0
	405	22,87	
	410	23,15	

Tabel 3.3. Brudlast P og cylinderstyrke σ_c for materialer i tabel 1.1.

3. KVANTITATIVE MÅLINGER

3.1 Fugernes sætning

Referencefugernes sætning var, som det fremgår af tabel 3.1 ca. 1 cm, mens de for prøvefugerne var ca. halvt så store. Det skal i denne forbindelse nævnes, at der i referencefugerne ingen revner fandtes. (se afsnit 2.4). Forskellen på P_1 og P_2 kan skyldes, at P_1 kun havde lodrette revner, mens P_2 både havde de vandrette og lodrette revner.

3.2 Fugernes massefylde

Massefylderne af de 4 fuger blev målt efter afformningen. Resultatet ses i tabel 3.1. Volumenbestemmelsen blev foretaget, ved at tværsnittet blev målt på alle fuger for hver 5 cm i længderetningen. Af tabellen ses, at referencefugernes massefylde ligger 40-50 kg/m^3 højere end massefylden for de to andre. Denne forskel kan skyldes, at der fra P_1 og P_2 er blevet transporteret en tilsvarende vandmængde til de tilstødende elementer (se afsnit 4).

3.3. Fugernes styrke

Da man normalt karakteriserer en betons styrke ved dens trykstyrke, var det nærliggende at finde trykstyrken for de enkelte prismen. Men da vi ønskede at studere revnernes lodrette forløb, valgte vi en spalteprøvning over diagonalen (se fig. 3.1) og må derfor karakterisere fugernes styrke ved hjælp af spaltetrækstyrken. Af tabel 3.2 fremgår resultaterne af spalteprøvningen. Som det ses, er værdierne nogenlunde af samme størrelsesorden med undtagelse af dem, der er mærket med *.

Den største værdi 2.58 MN/m^2 fandtes ved første prøvning, og det har ikke været muligt at finde en forklaring på den meget store værdi. De to mindste værdier blev fundet for prøver, hvor spaltebruddet fulgte de indvendige revner, se fig. 2.3.b. Det ser ud til, at det kun er i sådanne tilfælde, man kan konstatere en svækkelse i spaltetrækstyrken.

Revnernes betydning for fugernes forskydningsevne, mener vi ikke at kunne aflede af resultaterne fra spalteprøvningen, idet revnerne meget vel kan ændre fugernes virkemåde, ikke mindst for armerede fuger, således at den normale relation mellem forskydningsbæreevne og betonstyrke ikke gælder.

UDSTØBNING AF BETØN I FUGER

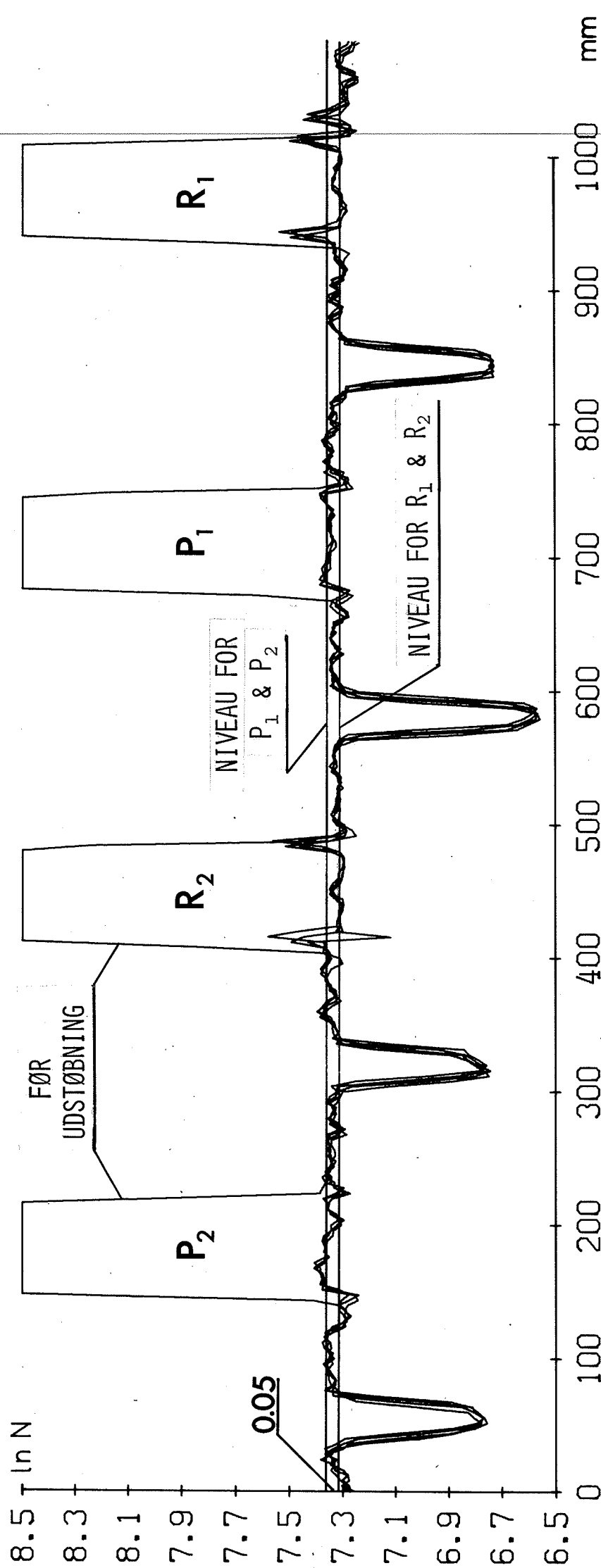


Fig.4.1. Grafisk afbildning af gammastråletransmission ($\ln N$)
10 cm under overkant af opstilling fig.1.4.

4. FUGTTRANSPORT

4.1 Fugttransport fra fuge til element bestemt ud fra fugernes massefylde

Som nævnt i afsnit 3.2, er forskellen mellem massefylderne af henholdsvis referencefugerne (R_1 og R_2), og de fuger (P_1 og P_2), som havde kontakt med betonelementerne, målt til ca. 45 kg/m^3 efter 14 døgn. Idet fordampningen fra de to fugetyper var lille og næsten ens, er den målte massefyldedifference et udtryk for den vandmængde, prøvefugen har afgivet til nabobetonelementerne. Vandopsugningen i kg. pr. m^2 betonelement var:

$$\begin{aligned} G &= \Delta\rho \cdot \frac{1}{2} \text{ fugebredde} \\ &= 45 \cdot \frac{1}{2} \cdot 0,07 = 1,6 \text{ kg/m}^2. \end{aligned}$$

4.2 Fugttransport fra fuge til element bestemt ud fra gammastråletransmission.

Måling af fugttransport ved hjælp af gammastråleudstyr og E.D.B. behandlingen af måleresultaterne, blev udført af A.F. Nielsen (Laboratoriet for Varmeisolering). Fig. 4.1 viser resultatet af målingerne vandret henover forsøgsopstillingens fuger og betonelementer, 10 cm under opstillingens overside. Ordinaten er den naturlige logaritme af talletallet ($\ln N$), og abcissen er målepunkternes vandrette afstand i mm regnet fra måleapparatets startpunkt. Hver af kurverne er middeltal af 25 gennemløb, som blev startet henholdsvis før udstøbningen af fugerne, 5 timer, 3 døgn og 8 døgn efter udstøbningen. Et gennemløb tog 0,5 time. Kurven for $\ln N$ før udstøbningen af fugerne bliver lodret ved fugekanterne. På fig. 4.1 er disse kurver kun vist op til $\ln N = 8,5$. Kurvernes kraftige dyk f. eks. ved station 580 skyldes passage af afstivninger i forskallingen. Ved referencefugernes kanter giver målingerne særlig store talletal hvilket kan forklares ved luftlommer i plastfolien. Hovedresultatet af målingerne er:

- a) at kurverne for $\ln N$ med start 5 timer, 3 døgn og 8 døgn er sammenfaldende, hvilket vil sige at den fugttransport der er foregået er afsluttet ca. $5 + 12,5 = 17,5$ timer efter udstøbningen.
- b) at der er en lille men tydelig forskel mellem talletallet for prøvefugerne og for referencefugerne $\Delta \ln N \sim 0,05$.

ØPSUGNINGSFØRSØG FOR BETON

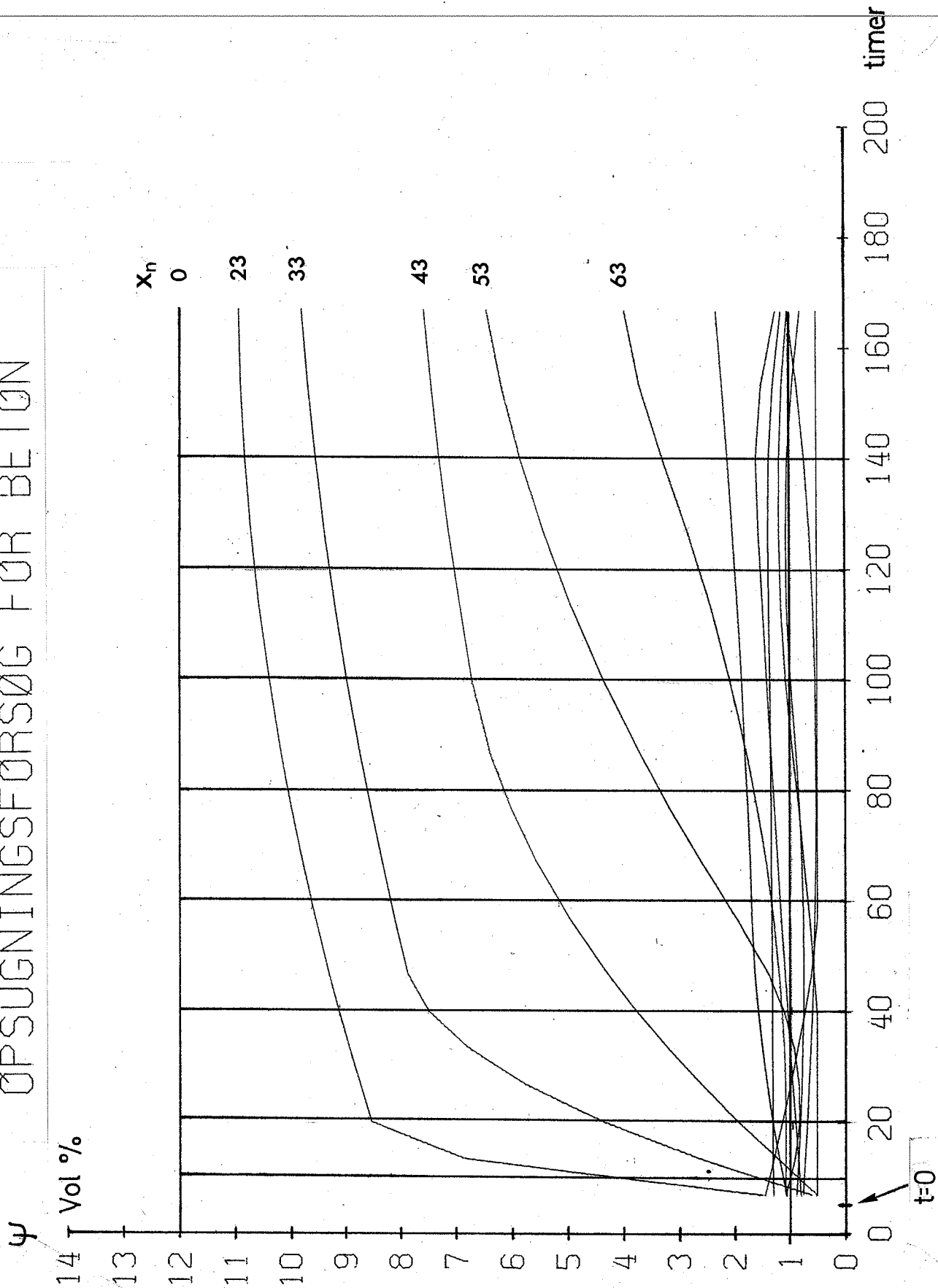


Fig.4.2. Vol.% vandindhold som funktion af tiden.

Idet det antages at denne forskel i tælle-
tal alene skyldes forskel i vandindhold
kan man ifølge A.F.Nielsen [13] beregne
forskellen i vandindhold efter følgende
formel:

$$\Delta \ln N = \mu_v \cdot \rho_v \cdot x_b \cdot \Delta \psi$$

μ_v = svækkelseskoefficienten for vand (m^2/kg)

ρ_v = er massefylden for vand (kg/m^3)

x_b = fugens tykkelse (m)

ψ = fugtindholdet (m^3/m^3)

$\mu_v \sim 0,016 \text{ m}^2/\text{kg}$ (se [13] pg. 51)

$x_b \sim 0,07 \text{ m}$

$$\rho_v \Delta \psi = \frac{\Delta \ln N}{\mu_v x_b} = \frac{0,05}{0,016 \cdot 0,07} = 45 \text{ kg}/\text{m}^3$$

D.v.s. det samme resultat som blev fundet
udfra rumvægtforskellen. Det ses dog umid-
delbart af fig. 4.1, at bestemmelsen af
 $\Delta \ln N$ er behæftet med stor usikkerhed.

4.3 Vandopsugning i elementbetonen som funktion af tiden

Fig.4.2 viser resultatet af en måling af
vandopsugningen som funktion af tiden ud-
ført af A.F.Nielsen på en prøve af element-
betonen med dimensionen 16 x 14 x 4 cm.

Abcissen angiver tiden i timer. Opsugnings-
forsøget blev startet ved abcissen 5 timer.
Ordinaten angiver vandopsugningen i volumen-
procent beregnet udfra målte tælle-
tal (N) efter nedenstående formel:

$$\ln N_0 - \ln N_t = \mu_v \rho_v x_b (\Delta \psi_t)$$

N_0 er tælle-tallet før vandopsugningen blev
påbegyndt

N_t er tælle-tallet t timer efter at vandop-
sugningen er påbegyndt

x_b er prøvens tykkelse 0,04 m

ψ_0 er sat til 1 vol. %

d.v.s.

$$\begin{aligned} \psi_t \cdot 100 &= \Delta \psi_t \cdot 100 + 1 \\ &= \frac{\ln N_0 - \ln N_t}{\mu_v \cdot \rho_v \cdot x_b} \cdot 100 + 1 \end{aligned}$$

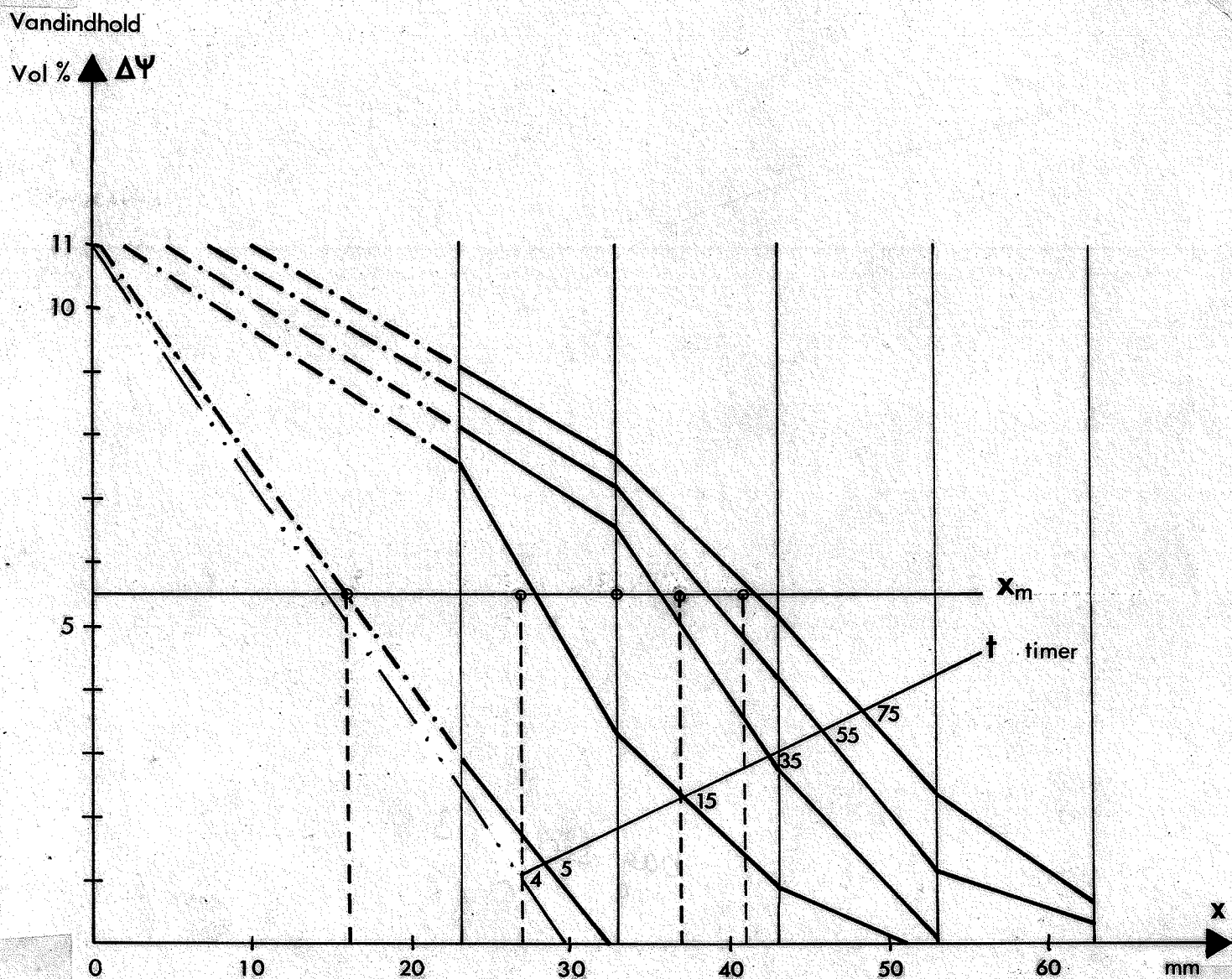


Fig.4.3. Vol.% opsuget vand som funktion af afstanden fra den sugende flade.

t timer	5	15	35	55	75
x_m mm	16	27	33	37	41

Tabel 4.1. x_m for forskellige værdier af t.

$$\psi_t \% = \frac{\ln N_0 - \ln N_t}{0,016 \cdot 1000 \cdot 0,04} \cdot 100 + 1 =$$

$$(\ln N_0 - \ln N_t) \cdot 156 + 1 \text{ (vol.\%)}$$

$\psi_{t=\infty}$ er skønnet udfra fig.4.2 til 12 vol.%
d.v.s. at den maximale fugtopsugning er
11 vol.%.

Fugtopsugningen blev målt i forskellig afstand fra den sugende flade $x_n = 23 + n \cdot 10$ mm. For hvert x_n er der på fig.4.2 optegnet en kurve for fugtindholdet som funktion af tiden. Kurverne er optegnet maskinelt og repræsenterer en udjævning af de beregnede fugtindhold.

Fig. 4.3 viser vandopsugningen som funktion af afstanden fra den sugende flade for forskellige tidspunkter efter opsugningsforsøgets start. Kurverne er optegnet manuelt på basis af fig. 4.2. De punkterede streger angiver et skønnet forløb. Formålet med at optegne fig. 4.2 er at finde fugtopsugningen G kg/m² som funktion af tiden. Ifølge Nevander m.f. [14] afsnit 5.6 er kapillarsugningen G proportional med kvadratroden af tiden:

$$G = B\sqrt{t}$$

t = tiden målt i timer fra starttidspunktet

$$G = \text{vandopsugning kg pr.m}^2 = \psi_{\max} \cdot \rho_v \cdot x_m$$

$$\psi_{\max} \sim 11\% \quad \rho_v = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$x_m = \int \frac{\psi dx}{\psi_{\max}}$$

x_m = er bestemt grafisk på fig. 4.2.

Af ovenstående formel for G og tabel 4.1 fås:

$t = 5$ timer:

$$G = 110 \cdot 0,016 = B\sqrt{5} \Rightarrow B = 0,78 \text{ kg/m}^2 \text{h}^{\frac{1}{2}}$$

$t = 15$ timer:

$$G = 110 \cdot 0,027 = B\sqrt{15} \Rightarrow B = 0,78 \quad -$$

$t = 35$ timer:

$$G = 110 \cdot 0,033 = B\sqrt{35} \Rightarrow B = 0,60 \quad -$$

$t = 55$ timer:

$$G = 110 \cdot 0,037 = B\sqrt{55} \Rightarrow B = 0,54 \quad -$$

$t = 75$ timer:

$$G = 110 \cdot 0,041 = B\sqrt{75} \Rightarrow B = 0,54 \quad -$$

Da man af fig.4.1 fandt at vandopsugningen var afsluttet 17,5 timer efter udstøbningen regnes

$$B = 0,78 \text{ kg/m}^2 \text{h}^{\frac{1}{2}}$$

$$G \approx 0,8 \sqrt{t} \text{ kg/m}^2 \quad (t \text{ i timer})$$

Idet vandopsugningen i kg pr. m^2 betonelement i afsnit 4.1 er fundet til $1,6 \text{ kg/m}^2$ kan opsugningstiden udregnes af ovenstående formel for G:

$$t = \left(\frac{1,6}{0,8} \right)^2 = 4 \text{ timer}$$

Da der blev anvendt rapidcement til fugemørtelen, hvor afbindingen er afsluttet efter ca. 4 timer, virker resultatet rimeligt, idet fugttransporten i fugemørtelen ikke foregår frit, efter at cementen er afbundet. Af fig. 4.3 ses, at fugtopsugningen $\Delta\psi$ for $t = 4$ timer med tilnærmelse varierer retliniet fra $\Delta\psi_{\max}$ for $x = 0$ til $\Delta\psi = 0$ for $x = 30 \text{ mm}$.

Af fig. 4.3 ses, at man ved yderligere undersøgelse af betons vandsugningsevne bør udføre målinger for mindre x -værdier end dem, der er anvendt her.

	Cylinderstyrke σ_c MN/m ²		Bøjetrækstyrke σ_t^b MN/m ²	σ_t^b/σ_c
	Beton	Mørtel		
Max.	63,1	35,6	3,0	0,084
Min.	26,9	5,3	0,6	0,113
Middel	45,8	—	—	—

Tabel 5.1. Tryk- og trækstyrker fra forsøg udført af Pommeret.

	Cylinderstyrke σ_c MN/m ²
Max.	55,0
Min.	17,0
Middel	28,5

Tabel 5.2. Trykstyrker for mørtel i forsøg udført af Hansen & Olesen.

5. TIDLIGERE FORSKYDNINGSFORSØG MED VÆGFUGER

Den viden, man i dag har om forholdene omkring forskydning i lodrette fortandede fuger mellem betonelementer, bygger hovedsagelig på franske forsøg udført af M. Pommeret [1] i årene 1965-71. Forsøgsserien omfatter mere end 200 enkeltforsøg. Desuden på en mindre serie indeholdene 20-30 enkeltforsøg udført af K. Hansen & S.Ø. Olsen [2]. Forsøgene danner grundlag for fastlæggelse af fugers forskydningsbæreevne og forskydningsstivhed. Forskydningsbæreevnen τ_b kan udtrykkes ved den empiriske formel fra K. Hansen m.fl. [3]:

$$\frac{\tau_b}{\sigma_c} = 0,09 \frac{B}{A} + \Phi$$

σ_c : cylinderstyrken

A : fugens areal

B : forskydningslåsenes areal

Φ : armeringsgraden $\left(\Phi = \frac{F \cdot \sigma_f}{A \cdot \sigma_c} \right)$

F : armeringens tværsnitsareal

σ_f : armerings flydespænding

Forskydningsstivheden K er i samme [3] foreslået defineret som forholdet mellem forskydningsspændingen og fugens lodrette forskydning for $\tau = \tau_b$ eller $\tau = 2/3 \tau_b$.

5.1 Pommeret's forsøg

Til forsøgene udført af Pommeret blev anvendt 1-2 m lange elementer med forskellig udformning af fortandingen. Fugerne blev udstøbt enten vandret eller lodret, størstedelen lodret. De vandrette fuger blev vibreret og de lodrette stampet. Tværsnitsgeometrien af prøvefugen fremgår af fig. 5.1.d. Elementbetonen blev fremstillet efter en og samme recept, mens fugemørtelens sammensætning blev varieret. Både elementbeton og fugemørtel blev trykprøvet ved hjælp af prøvecylindre af størrelsen 16/32 cm. Se tabel 5.1. Fugemørtelen blev yderligere prøvet ved bøjetrækforsøg med prizmer af størrelsen 7 x 7 x 35 cm. Tabel 5.1 giver yderværdier for disse målinger. Ligeledes findes oplysninger om forholdet mellem træk- og trykstyrken, som var størst

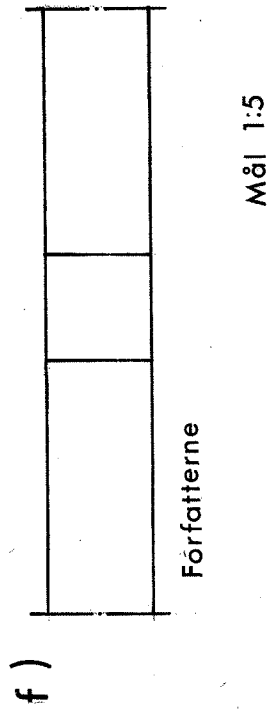
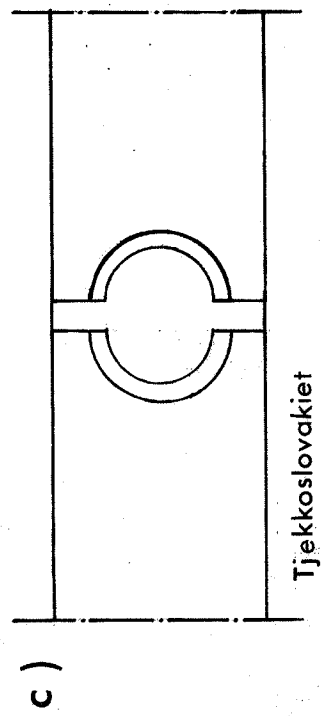
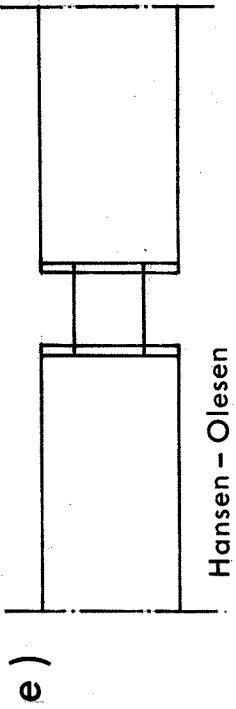
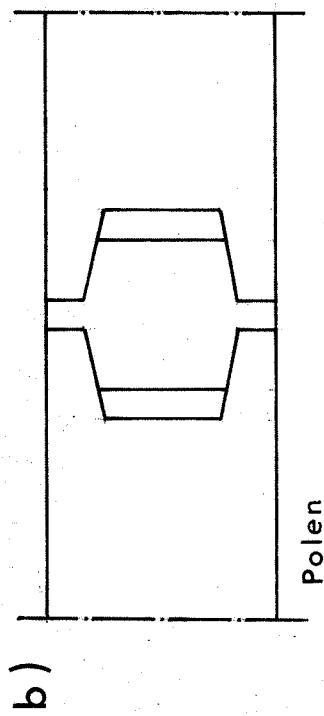
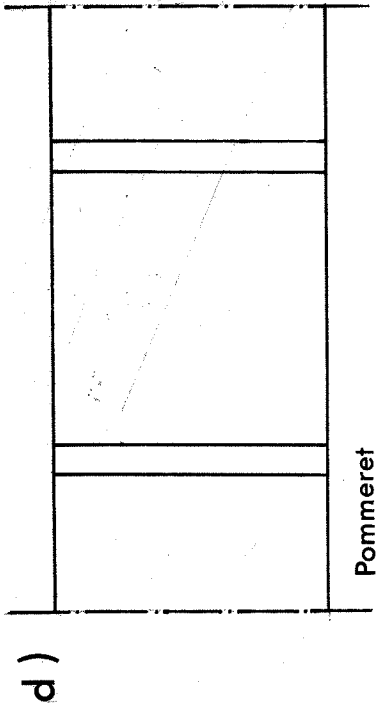
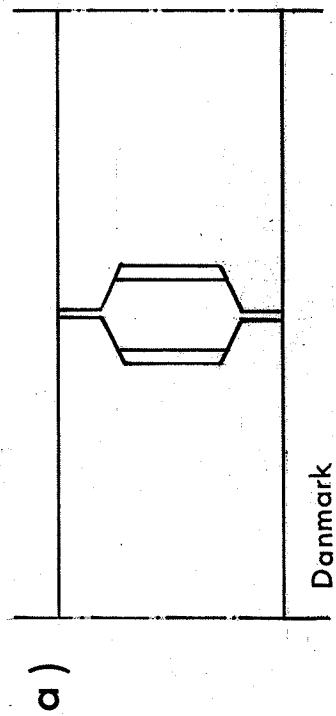


Fig. 5.1. Forskellige fugeudformninger.

for svage mørtelkvaliteter og mindst for de stærke, hvilket er helt normalt.

5.2 Hansen & Olesen's forsøg

Elementerne i denne serie var 1,2 m lange. Fortandingen var udført med $B/A = 0,50$ svarende til den normale danske vægfuge, men i halv størrelse i forhold til denne. Samtlige fuger blev udstøbt vandret og havde en tværsnitsgeometri, som fremgår af fig. 5.1.e. Mørtelstyrkerne varierer her som vist i tabel 5.2.

5.3 Vurdering af forsøgsbetingelser

Værdien af opnåede forsøgsresultater afhænger naturligt af de valgte forudsætninger. Målestoksforhold og materialeegenskaber må nøje tilpasses efter modellovene. Ofte vil det dog ikke være muligt at tage hensyn til alle forhold, og det er da af væsentlig betydning hvilke man vælger at tage hensyn til. I de omtalte forsøg skal nævnes nogle forhold som må formodes at kunne påvirke udviklingen af revner forårsaget af plastisk svind.

5.3.1 Støbeprocessen

Ved vandret udstøbning af fuger vil effekten fra plastisk svind formodentlig få en anden karakter end ved den lodrette udstøbning. Det er derfor nærliggende at mene, at de langsgående revner ikke vil forekomme ved vandret udstøbning. Det må efter denne betragtning formodes at fugerne i forsøgene udført af Hansen & Olesen ikke har haft revner.

5.3.2 Geometrien

Tværsnitsgeometrien af fuger fra forskellige lande samt fra forsøg ses på fig. 5.1 (se [4],[5] og [6]). Fugegeometriens betydning for udvikling af plastisk svind p.g.a. vandopsugning kan udtrykkes som størrelsen af forholdet mellem det sugende areal og fugevolumenet.

Nedenfor er dette forhold udregnet fra forsøgsfugerne og for den normale danske vægfuge (15 cm væg):

Normal dansk	:	56 m ² /m ³
Hansen & Olesen	:	36 m ² /m ³
Forfatterne	:	28 m ² /m ³
Pommeret	:	11 m ² /m ³

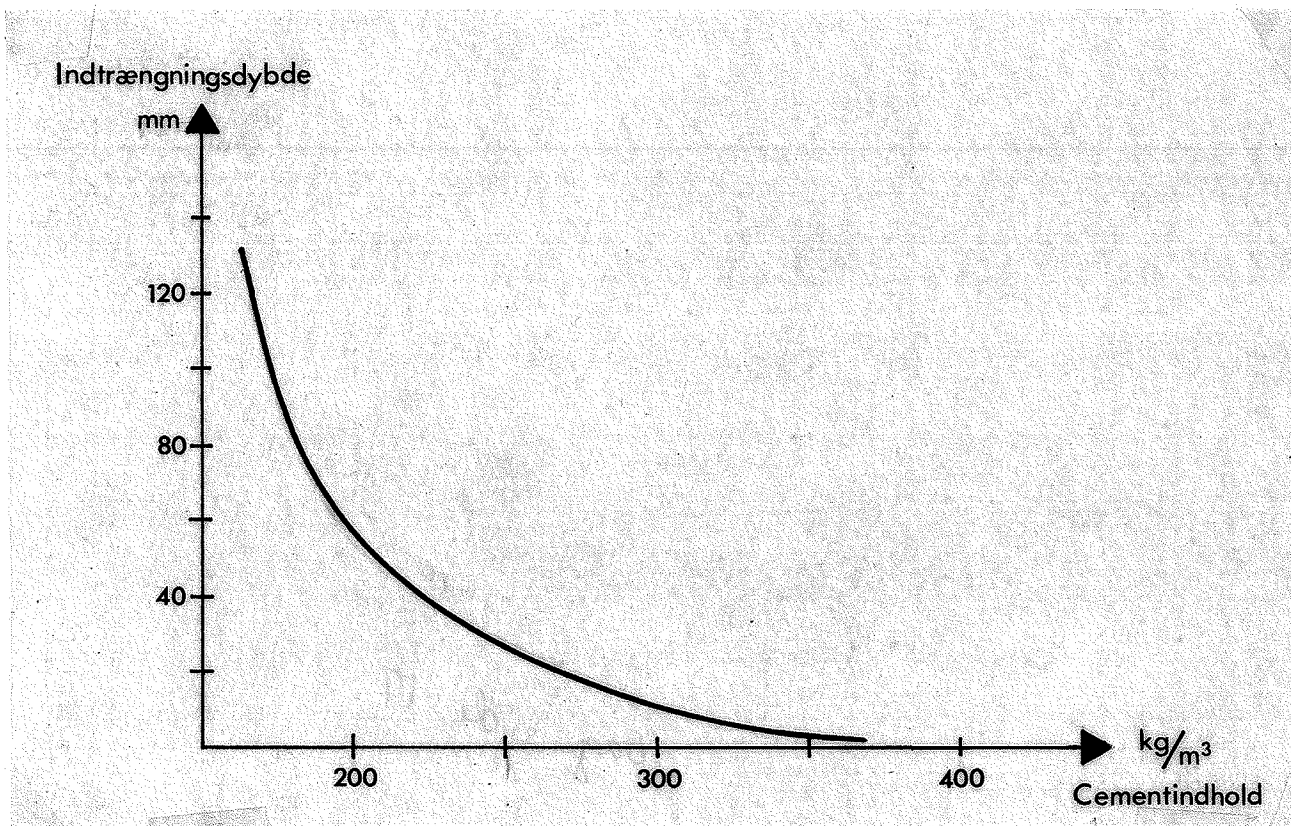


Fig.5.2. Vands indtrængningsdybde i beton som funktion af cementindholdet.

Da forfatterne har konstateret revner p.g.a. plastisk svind med et forhold på $28 \text{ m}^2/\text{m}^3$ må normal dansk vægfuge formodes at være mere udsat for revnedannelse, medens fugen i Pommerets forsøg må formodes at være mindre udsat.

5.3.3. Elementbetonen

Antages en betons vandopsugningsevne at være proportional med vandindtrængningsdybden, kan cementindholdets betydning for vandopsugningsevnen vurderes ud fra fig. 5.2 gengivet fra Sällström [9].

Sædvanligvis fremstilles betonvægelementer med et cementindhold på $250\text{--}300 \text{ kg}/\text{m}^3$, medens elementerne i Pommerets forsøg havde et cementindhold på $400 \text{ kg}/\text{m}^3$. Sammenholdes disse tal med kurven fig. 5.2, ses det, at elementerne i Pommerets forsøg ikke har givet anledning til væsentlig vandopsugning.

5.3.4 Fugemørtelens v/c-tal

Den anbefalede fugemørtel [7] har et v/c-tal på 0,9, og denne store værdi er efter forfatterens mening en væsentlig årsag til, at der opstod revner p.g.a. plastisk svind i denne mørtel.

v/c-tallet for fugemørtelen i Pommeret's forsøg varierede mellem 0,52 og 1,08 og omfatter således det ovennævnte v/c-tal. På grund af elementernes ringe vandopsugningsevne har det plastiske svind imidlertid næppe givet anledning til revner.

6. KONKLUSION

Hovedresultatet af forsøgene er, at man må forvente lodrette revner i det indre af mørtelfuger, der er udstøbt mellem standard betonelementvægge. Revnerne dannes, medens fugemørtelen endnu er plastisk på grund af vandopsugning i de tilstødende betonelementer.

De betonelementer der blev anvendt til forsøget havde en vandopsugning på $G = 0,8 \sqrt{t} \text{ m}^2$ (t målt i timer), hvilket er 15 - 20% af vandopsugningen i cementmørtel (ifølge Fukt [14]). Når vandopsugningen i så relativt tætte betonelementer alligevel kan forårsage revnedannelser i fugemørtelen, skyldes det, at det sugende areal var stort i forhold til mørtelvolumenet.

Ser vi på standard vægfugen må risikoen for sådanne revnedannelser tilmed være større, idet standardfugens sugende areal er 56 m^2 pr. m^3 fugemørtel mod forsøgets $28 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

En forvanding af elementerne vil kunne hindre revnernes opståen. Men ifølge nedenstående resonnement vil det kræve over en times vanding, hvilket ikke anses for praktisk gennemførligt.

Den samlede vandopsugning fra forsøgsgfugen blev målt til 45 l pr. m^3 fugemørtel opsluget på 4 timer. Den vandmængde, som opsluges fra standardfugen, er $56 \times G \text{ l/m}^3$, hvilket med forsøgets værdi for G giver $45\sqrt{t} \text{ l/m}^3$, gyldig så længe der er frit vand til rådighed i fugen, hvilket maksimalt er 4 timer ved anvendelse af rapidcement. I dette tidsrum vil standardfugen kunne afgive $45/4 = 90 \text{ l/m}^3$ vand. Sættes den kritiske værdi for vandopsugningen til 45 l/m^3 , ser man, at forvandingstiden for standardfugen skal være over 1 time, for at vandopsugningen kommer under denne kritiske værdi.

De forsøg der hidtil er udført for at belyse forskydningsbæreevnen af fuger mellem betonelementer tager ikke hensyn til betonelementernes vandsugende effekt, og ud fra forsøgsbetingelserne må det formodes, at det plastiske svind ikke har været så stort, at det har givet anledning til revnedannelser.

Den relation mellem forskydningsværeevne og betonstyrke, som er udledt af ovennævnte forsøg, kan således ikke umiddelbart regnes gyldig som beregningsgrundlag for bæreevnen, såfremt der i praksis anvendes en fugtteknik, der kan give revner i fugernes indre.

For nærmere at undersøge problemet bør der udføres forsøg med vægelementer i fuld skala. Viser det sig, at revnedannelserne har samme omfang som i det her rapporterede forsøg, mener vi, at problemet bør søges løst ad betonteknologisk vej fremfor at udføre nye forskydningsforsøg.

7. LITTERATUR.

- [1] Michel Pommeret:
La résistance aux efforts tangents des joints verticaux entre grands panneaux préfabriqués coplanaires.
Service d'Etude des Structures.
Saint Remy, Juin 1971.
- [2] K. Hansen - S.Ø. Olesen:
Bæreevne og brudmekanisme af fortandede fuger.
Forsøgsresultater I.
DIA-B rapport 68/23 1968.
- [3] Klavs Hansen m.fl.:
Design of vertical keyed shear joints in large panel buildings.
Building Research and Practice.
July/August 1974.
- [4] Foreløbig vejledning vedrørende statisk beregning af elementbyggede huse.
Oversættelse.
Instituttet for forskning og typeudvikling i Praha.
DIA-B 1965.
- [5] Building Systems in Poland.
II International Symposium on Bearing Walls.
Warsaw, September 1975.
- [6] Betonelementer, brochure.
Højgaard og Schultz A/S.
- [7] Anvisning i udstøbning af fuger.
Betonelement-Foreningen &
Foreningen af Rådgivende Ingeniører.
- [8] Per Nycander:
Betongens vattentäthet.
Betong nr. 2, 1954 Vol.39 (Svensk)
- [9] Stig Sällström:
Vattentäthet hos dammbyggnadsbetong.
Nordisk Betong nr. 1, 1968 Vol.12
- [10] W.H. Taylor:
Concrete technology and practice.
Angus & Robertson Ltd.
Sidney, Australia 1969.

-
- [11] Erik V. Meyer m.fl.:
Betonbogen - fra cement til beton.
Cementfabrikkernes tekniske Oplysnings-
kontor, København 1967.
- [12] H.E. Jørgensen:
Flade tage, dampbremsere og ventilation.
Papers fra Klimaskærm 1976.
Dansk VVS-information.
- [13] Anker F. Nielsen:
Fugtfordelinger i gasbeton under varme-
og fugttransport.
Laboratoriet for Varmeisolering.
Danmarks tekniske Højskole, marts 1974.
- [14] L.E. Nevander, C. Bankvall og P.I. Sandberg.
Fukt, Kompendium i BtI aKI.
Lund 1968.
- [15] D.J. Hannant:
The tensile strength of concrete:
A review paper.
The Structural Engineer, no.7 1972.