

**Murværks styrke**

**B.J. Rambøll og Ole Glarbo**

**Tidsskrifter**

**Byggeindustrien 8, 1955**

**1955**

# Murværks styrke

Professor, dr.techn. B.J.Rambøll  
og laboratorieingeniør,  
cand. polyt. Ole Glarbo.

I denne artikel er fremdraget en del primære resultater fra en række forsøg, hvortil der er medgået over 50.000 mursten. Der opstilles formler til beregning af såvel centralt som excentrisk belastet murværk og virkningen af lette sten i bagmur, betydningen af forbandtets art og af murværkets kvalitet m. m. er diskuteret.

De fleste forsøg over murværks styrke er af let forståelige grunde udført med prøvelegemer, der er mindre end de i virkeligheden forekommende murvægge. Imidlertid afhænger en muret vægs styrke af så mange faktorer, at det ikke er forsvarligt uden videre at drage slutninger på basis af små forfinede prøvelegemer. I den nedenfor omtalte forsøgsrække indgik foruden mindre prøvelegemer også større mure, og der er her opnået nogle brudstyrkeresultater, som må antages at have direkte relation til virkeligt murværk.

Den egentlige årsag til forsøgenes igangsættelse var den stigende anvendelse af lette isoleerende sten i bagmur og vejrfaste teglsten i formur samt det manglende beregningsgrundlag for excentrisk belastet murværk. I husbygningsnormerne står som bekendt beregningsregler for centralt belastede mure, men intet om excentrisk belastning.

Det var Akademiet for de tekniske Videnskaber, der i 1946 på professor E. Suensons initiativ nedsatte et udvalg, der skulle beskæftige sig med de lige nævnte problemer. Med professor Suenson som formand udførte udvalget en del forberedende arbejde og forsøg<sup>1)</sup>. Da professor Suenson på grund af alder trak sig tilbage fra sin lærergerning og som leder af Laboratoriet for Byggeteknik og dermed overlod

1) Resultaterne er nedfældet i en rapport: E. Suenson: Teglstens-Pillers Trykstyrke og Sammentrykkelighed, Ingeniør-lenskabelige skrifter, nr. 1, 1951.

TABEL I - Stenenes trykstyrke (halvstensprøvelegemer) og bøjningsstrækstyrke.

Stensort	Trykstyrken i kg/cm <sup>2</sup>			Bøjningsstyrken i kg/cm <sup>2</sup>		
	Antal prøver	$\sigma_{\text{middel}}$	$\sigma_{\text{max}}$ $\sigma_{\text{min}}$	Antal prøver	$\sigma_{\text{middel}}$	$\sigma_{\text{max}}$ $\sigma_{\text{min}}$
Flamsten I	50	191	340 70	20	41	58 21
Flamsten II	50	297	374 194	20	46	58 31
Molersten	50	83	117 55	20	12	18 7
Gasbetonsten	50	63	76 41	20	15	18 11
Klinkerbetonsten	50	65	77 55	20	12	16 9

det videre arbejde med forsøgene til sin efterfølger, var det forberedende arbejde netop nået dertil, at hovedforsøgene kunne planlægges i deres endelige form og sættes i gang. Forsøgene blev udført på Laboratoriet for Byggeteknik i årene 1949–50, og efter en omfattende bearbejdning publiceredes resultaterne som en udvalgsberetning fra Akademiet for de tekniske Videnskaber<sup>2)</sup>.

Forsøgene omfattede foruden styrkeforholdene også murværks deformationsforhold. I det følgende skal dog kun styrkeforholdene nærmere omtales.

### Forsøgets omfang og udførelse.

Af sten — alle i alm. murstensformat — blev benyttet flamsten, molersten, gasbetonsten og klinkerbetonsten (Leca). Af mørtler anvendtes alm. kalkmørtel, kalk-

2) Akademiet for de tekniske Videnskaber, Beretning nr. 14, Forsøg over Murværks Styrke og Elasticitetsforhold, 1953.

cementmørtel og cementmørtel.

Stenenes styrkeforhold blev undersøgt ved knusning af terninger af 2 med cementmørtel sammenmurede halve sten, og desuden blev stenenes bøjningsstyrke bestemt. Styrkeresultaterne fremgår af tabel I.

Kalkmørtelen var maskinblandet kalkmørtel med 7,5 % Ca(OH)<sub>2</sub>. Indholdet af calciumhydroxyd blev kontrolleret ved titrering, og der fandtes kun ringe afvigelse fra de forlangte 7,5 %.

Cementmørtelen havde blandingsforholdet cement:sand = 1:3 efter vægt; cementen var alm. portlandcement og sandet alm. mørtelsand.

Kalkcementmørtel blev blandet ved hånden af maskinblandet kalkmørtel og maskinblandet cementmørtel. Forholdet mellem kalkmørtelens og cementmørtelens tørvægtsmængder var 2:1.

Vandindholdet i de forskellige mørtler bestemtes af mureren udfra hensynet til passende arbejdsconsistens.

Undersøgelserne over mørtlernes styrkeforhold omfattede bøjningsstyrken af  $2 \times 2 \times 12$  cm prismer og trykstyrken af 2 cm terninger og 7 cm terninger. Styrkeresultaterne fremgår af tabel II.

Murværksprøvelegemerne omfattede dels piller, der var 1,2 m høje (18 skifter) og med  $1\frac{1}{2}$  stens kvadratisk tværsnit og dels mure, der var 2,6 m høje (39 skifter),  $1\frac{1}{2}$  stens tykkelse og 85 cm brede. Murene skal nærmere omtales her, da de har størst praktisk interesse.

Der fremstilledes og prøvedes i alt 76 store mure, hvilket svarer til 38 forskellige typer, idet der altid anvendtes 2 stk. af samme type. Følgende blev varieret:

- 1) murværket fremstilledes af ensartede sten helt igennem (flamsten, molersten, gasbetonsten og klinkerbetonsten).
- 2) murværket fremstilledes af flamsten i den ene side og henholdsvis en af de 3 svage-re sten i den anden side.
- 3) der anvendtes de 3 nævnte mørtler.
- 4) der blev belastet med op til 4 forskellige excentriciteter.

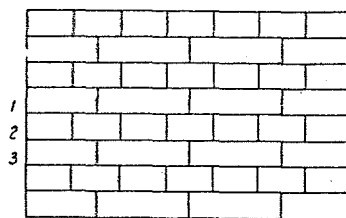
Skulle alle varianter være kombineret med alle var forsøget svulmet op til et meget stort antal mure; det var derfor nødvendigt at indskrænke sig til at kombinere de forskellige varianter på en sådan måde, at et forsvarligt grundlag måtte siges at blive resultatet. Selv på denne måde medgik 52.000 sten til forsøget — dette for at antyde, at de praktiske vanskeligheder ved et sådant forsøgs gennemførelse på et laboratorium ikke er helt små.

Der blev kun anvendt eet for-

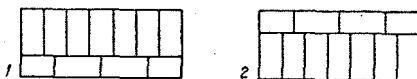
TABEL II - Mørtlernes styrkeegenskaber.

Mørtel	Bøjningsstyrke i kg/cm <sup>2</sup>			Trykstyrke (4 cm <sup>2</sup> ) i kg/cm <sup>2</sup>			Trykstyrke (50 cm <sup>2</sup> ) i kg/cm <sup>2</sup>		
	Antal prøver	$\sigma_b$	$\sigma_{\max}$ $\sigma_{\min}$	Antal prøver	$\sigma_{c,2}$	$\sigma_{\max}$ $\sigma_{\min}$	Antal prøver	$\sigma_{c,7}$	
Kalkmørtel	246	7,3	15,2 2,3	492	9,3	17,9 3,8	96	5,4	8,4 2,9
Kalkcementmørtel	228	11,8	27,5 3,8	456	30,0	60,0 8,6	69	10,9	21,1 3,6
Cementmørtel	66	51	68 36	132	203	336 115	30	130	185 90

bandt til hele forsøget (se fig. 1); efter at hovedforsøget var udført, blev der imidlertid udført en supplerende række med et formodet svagt forbandt (se fig. 2). Resultaterne fra denne supplerende række findes senere i denne artikel.



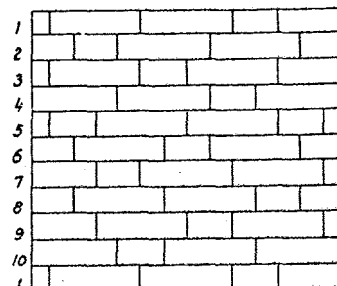
Standard 1:20



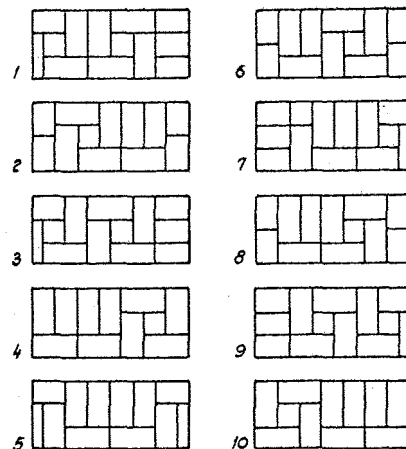
Snit 1:40  
Fig. 1.

Kalkmørtlens hærdning tager som bekendt flere år, men ud fra den betragtning, at et murstenshus også skal være stabilt de første måneder af sin levetid, fastsattes prøvealderen til 28 døgn. Det er ganske vist sjældent, at så ungt murværk bliver fuldt belastet, men forskellige undersøgelser har vist, at 3 månedersstyrken kun ligger ca. 10 % over 28 døgnstyrken, og at styrken iøvrigt stiger meget langsomt med alderen.

Murerarbejdet kan, bortset fra 2 tilfælde, karakteriseres som gedigent håndværk. Således blev alle stødfuger fyldt med mørtel,



Standard 1:20



Snit 1:40  
Fig. 2.

hvorimod ikke alle lejefuger altid var jævnet. De 2 undtagelser blev fremstillet som de i praksis bliver udført i god akkordmuring. Disse sidste adskiller sig fra de øvrige hovedsagelig ved stødfugernes ufuldstændige fyldning.

Murene blev opmuret på et I N P 45 med vandret kropplade og forblev herpå under prøvningen, se f. eks. fig. 3. Mellem 1. skifte og kroppladen og som af-

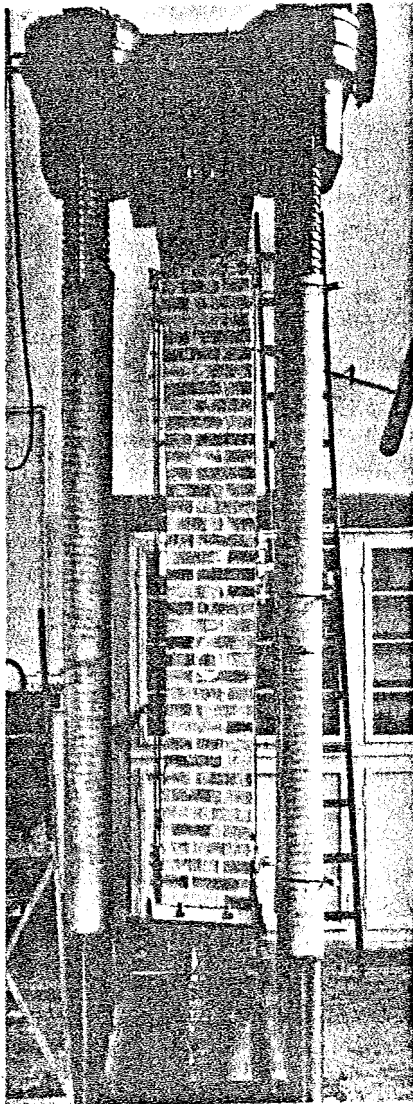


Fig. 3.

retningslag over øverste skifte anvendtes for alle mure cementmørtel.

Lagringen foregik indendørs, beskyttet mod direkte sol. Murværket blev overbruset 2 gange ugentlig i de første 3 uger.

Til prøvningen anvendtes en Amsler 1000 t hydraulisk presse indstillet til 200 t eller 500 t maximallast. På fig. 3 ses en mur under forsøget. For at sikre excentriciteten blev der mellem maskinens trykplader og den lastfordelende armerede betonblok anvendt et cylinderleje.

På fig. 4 er vist en mur efter et pludseligt brud. Det ses, hvordan muren så at sige spalttes

langs en flade med stødfuger:  $1\frac{1}{2}$  stens muren deles i en  $\frac{1}{2}$  stens og en 1' stens mur. Udenlandske forsøgsresultater viser, at en 1' stens mur har en relativt højere brudstyrke end en tykkere mur — fladen med de

TABEL III - Brudstyrker i  $\text{kg/cm}^2$  for murværk af ensartede sten efter 28 døgns hærning.

Sten	Mørtler	Kalkmørtel	Kalkcementmørtel	Cementmørtel
Flamsten .....		22	46	86
Molersten .....		15	—	—
Gasbetonsten .....		16	29	—
Klinkerbetonsten .....		15	25	46

lodrette stødfuger danner ganske øjensynligt et svagt led i  $1\frac{1}{2}$  stens muren.

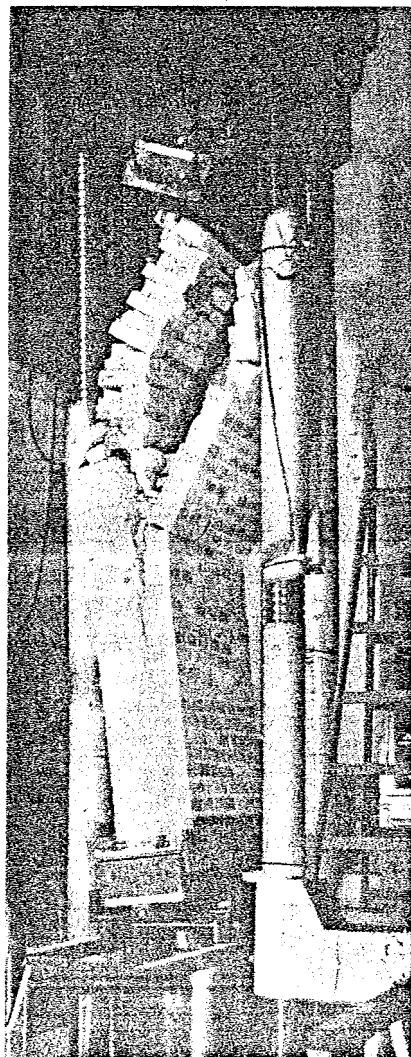


Fig. 4.

### Forsøgets resultater.

#### Forskellige murværks styrke.

Idet det skal pointeres, at alle murene havde  $1\frac{1}{2}$  stens tykkelse, skal følgende skema over brudstyrken gengives:

#### Murværks styrke som funktion af stenstyrken og mørtelstyrken.

På basis af de opnåede murværksstyrker  $\sigma_M^c$ , stenstyrker  $\sigma_s^c$  bestemt ved prøvning af 2 med cementmørtel sammenmurede halve sten og mørtelstyrker  $\sigma_m^c$  bestemt ved prøvning af 2 cm terninger er følgende empiriske formelsæt for murværksstyrkens afhængighed af sten- og mørtelstyrker opstillet:

for  $\sigma_m^c \leq 18 \text{ kg/cm}^2$ :

$$\sigma_M^c = (0,8 + 0,1 \cdot \sigma_m^c) \sqrt{\sigma_s^c}$$

for  $\sigma_m^c > 18 \text{ kg/cm}^2$ :

$$\sigma_M^c = \sqrt[3]{\sigma_m^c} \cdot \sqrt{\sigma_s^c}$$

Formlerne gælder for  $1\frac{1}{2}$  stens mure med højder mellem 2,4 og 3,5 m og sten- og mørtelstyrker under  $250 \text{ kg/cm}^2$ .

Formlerne er efterprøvet for en del udenlandske forsøg med tilfredsstillende resultat; tilfredsstillende vil p. gr. af den store spredning murværksstyrker altid udviser sige at middelspredningen er ca.  $\pm 15\%$ .

#### Murværk med lette sten i bagmur.

Hvad angår murværksstyrken for mure med flamsten i formur og lette sten i bagmur fandtes denne styrke i almindelighed at

være af samme størrelse som murværksstyrken for mure af udelukkende lette sten.

#### Excentrisk belastede mure.

Af forsøgets resultater for de excentrisk belastede mures styrke kunne følgende formel udledes:

$$P = P_0 \left(1 - \frac{2 e \beta}{t}\right)$$

Her er:  $P \infty$  brudlasten,  $P_0 \infty$  brudlasten for central påvirkning,  $e \infty$  excentriciteten,  $t \infty$  tykkelsen ( $1\frac{1}{2}$  sten) og endelig  $\beta$  en faktor, der er afhængig af forholdet  $\frac{h}{t}$  ( $h$  er murens højde) og de indgående materialers styrke og elasticitetsforhold; for de i disse forsøg anvendte materialer og murdimensioner er følgende  $\beta$ -værdier fundet:

for flamsten i kalkmørtel .....  $\beta = 1,45$   
for lette sten i kalkmørtel .....  $\beta = 1,25$   
for alle sten i stærkere mørtel .....  $\beta = 1,10$

Formlen gælder for murværk af såvel ensartede sten som af flamsten med lette sten i bagmur.

#### Forbandtets indflydelse.

Som nævnt udførtes et supplerende forsøg over forbandtets indflydelse. Med det specielle, såkaldte »Knud Hansens forbandt« (se fig. 2), der på forhånd måtte anses for at være et svagt forbandt, opnåedes brudstyrker, der kun lå ca. 3 % under de tilsvarende mure af alm. forbandt; nogen stor indflydelse på murværksstyrken for  $1\frac{1}{2}$  sten mure kan forbandtet således ikke antages at have.

#### Betydningen af murerarbejdets kvalitet.

De 2 mure, der var muret i akkordmuring og i flamsten + kalkmørtel, opnåede brudstyrkerne  $22,5 \text{ kg/cm}^2$  og  $23 \text{ kg/cm}^2$ .

Selv om forsøgs materialet er beskeden i omfang, synes disse brudstyrker, der er af samme størrelse som middelstyrken af de øvrige tilsvarende mure, at vise, at mindre forskelle i murearbejdets kvalitet ikke har nogen indflydelse på murværkets styrke.

#### Kommentarer.

I betragtning af, at den tilladelige påvirkning for alm. murværk — flamsten + kalkmørtel — er  $8 \text{ kg/cm}^2$ , virker brudstyrken  $22 \text{ kg/cm}^2$ , svarende til måske  $25 \text{ kg/cm}^2$  efter 3 måneder ikke umiddelbart overbevisende for et så inhomogent materiale som murværk. Imidlertid må det understreges, at den opnåede brudstyrke er fundet for en »virkelig« mur og ikke ved knusning af et velplejet, mindre prøvelegeme. Endvidere fremgår det af forsøgene, at hverken opmuringens kvalitet eller forbandtets art i en sådan  $1\frac{1}{2}$  stens mur synes at give store udslag, forudsat naturligvis at der ikke er tale om unormale tilfælde. Den konstaterede sikkerhedsgrad på 3 er en sikkerhedsgrad, som virkelig er til stede i den nyopførte mur. Dertil kommer, at styrken, omend i ringe grad og indtil en vis grænse, stiger med tiden, hvorfor sikkerhedsgraden ikke skal dække svækkelsen fra alderen, som det er tilfældet med andre materialer.

Når en granbjælkes sikkerhedsgrad sættes til 6 er det i forhold til styrken af en lufttør og fejlfri bjælke. Ved bøjningsforsøg med en vilkårlig, usorteret granbjælke sådan som de forefindes i en nyopført konstruktion, fås ofte bøjningsbrudstyrker helt ned til  $350 \text{ kg/cm}^2$ , hvilket med en tilladelig bøjningspåvirkning på  $90 \text{ kg/cm}^2$  kun giver en sikkerhedsgrad på

$n = 4$ , og denne sikkerhedsgrad må indeholde dækning for en forringelse af styrken med alderen.

Sikkerhedsgraden 3 for murværk er derfor absolut ikke foruroligende; praksis har da også vist, at sikkerheden i murværk er tilstrækkelig.

Det kan dog ikke nægtes, at de teglsten, som er fremstillet i de senere år og hvormed der er udført forsøg, ser ud til at være svagere end tidligere. Og da murværkets styrke er fundet at stige med ca. kvadratroden af stenstyrken, vil en fordobling af stenstyrken dog betyde en forøgelse af murværksstyrken på ca. 40 %.

Noget andet er imidlertid, at det synes urimeligt at opbygge murværk af stærke sten og svag mørtel, når sidstnævntes styrke — eller mangel på samme — altid vil give relativt svagt murværk. Ud fra disse forsøg synes det at måtte være rationelt at anvende en kalkcementmørtel med en  $\sigma_{c,2} = 30 \text{ kg/cm}^2$ , der vil forøge murværkets styrke med ca. 80 % i forhold til murværk med kalkmørtel.

Skal murværks styrke forøges, synes det derfor at være den rimeligste løsning at kombinere en noget forbedret stenstyrke med en virkelig forbedring af mørtelstyrken.

Dette at anvende en kalkcementmørtel synes også at være tendensen i tiden. Som bekendt må man nu i modsætning til tidligere gå uden om byggevedtægternes murtykkelser, når en styrkeberedning retfærdiggør det. Et højhus kan i dag udføres med rimelige murtykkelser, det lod sig ikke gøre blot for få år siden.

Stærkere mørtler er et af de midler, som må anvendes, når mursten skal tage kampen op med nye elementbyggermetoder.