

Forsøg med murværk af molersten og almindelige teglsten

E. Suenson og H. Dührkop

Tidsskrifter

Ingeniørvidenskabelige Skrifter. nr. 01, 1944

1944

AKADEMIET
FOR DE
TEKNISKE VIDENSKABER

ACADÉMIE
DES SCIENCES TECHNIQUES

AKADEMIE
DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

ACADEMY
OF TECHNICAL SCIENCES

KØBENHAVN
DANMARK

TLF. BYEN 3580, ØSTER VOLDGADE 10, KBH. K

13023

INGENIØRVIDENSKABELIGE SKRIFTER

1944 Nr. 1

FORSØG MED MURVÆRK AF
MOLERSTEN OG ALMINDELIGE
TEGLSTEN

AF
PROFESSOR E. SUENSON
OG
CIVILINGENIØR H. DÜHRKOP

WITH AN ENGLISH SUMMARY



AKADEMIET FOR DE TEKNISKE VIDENSKABER
OG
DANSK INGENIØRFORENING

Overført til
KØBENHAVNS
UNIVERSITETS
BIBLIOTEK

I KOMMISSION HOS
G. E. C. GAD
VIMMELSKAPTET 32
KØBENHAVN K

GEOLOGISK BIBLIOTEK

Geocenter København
Øster Voldgade 10
1350 København K

CC 26/29 FOR

AKADEMIET
FOR DE
TEKNISKE VIDENSKABER

ACADÉMIE
DES SCIENCES TECHNIQUES

AKADEMIE
DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN

ACADEMY
OF TECHNICAL SCIENCES

KØBENHAVN
DANMARK

TLF. BYEN 3580, ØSTER VOLDGADE 10, KBH. K

INDHOLD

	Side
Indledning	5
A. Molerstenene	7
B. Teglstene	10
C. Mørtlerne	12
D. Pillernes Fremstilling	16
E. Pillernes Vandindhold	20
F. Pillernes Rumvægt	22
G. Elasticitetsforsøg	23
H. Pillernes Arbejdslinier og Elasticitetstal	23
I. De enkelte Stens Sammentrykning	28
a. De paa Pilleoverfladen maalte Værdier af ϵ_{st}	28
b. Mulige Aarsager til den ujævne Spændingsfordeling	31
c. Sandsynlige Aarsager til den ujævne Spændingsfordeling	33
K. Pillernes Brudmaade	35
L. Pillernes Trykstyrke	40
a. Virkningen af Stenenes Vaadhed ved Henmuringen	40
b. Stenstyrkens Indflydelse	42
c. Mørtelstyrkens Indflydelse	44
d. Formel for Pillernes Trykstyrke	46
Bilag 1. Mørtelartens Indflydelse paa indmurede Stens Sammentrykning	52
Bilag 2. Trykelasticitetsforsøg med Molersten	61
Sammenfatning	66
English Summary	71

INDLEDNING

I *Laboratoriet for Byggeteknik* ved *Danmarks tekniske Højskole* er der med Støtte af *Laurits Andersens Fond* og *A/S Skarrehage Molerværk* udført en Række Forsøg med Murværk af Molersten og almindelige Teglsten.

Molersten fremstilles ved Brænding af de i Danmark forekommende lerholdige Aflejringer af Diatomékisel, det saakaldte Moler. Molersten er meget lette (800 kg/m^3) i Forhold til deres Styrke (115^{at}), meget finporede og varmeisolerende, og de bruges derfor, hvor disse Egenskaber er paakrævet.

Forsøgene omfattede:

- (1) Undersøgelse af Stenenes Egenskaber.
- (2) Undersøgelse af 32 Stykker 1-Stens Piller opmuret af Stenene i 4 forskellige Mørtler.

Resultaterne af (1) er meddelt i Stykkerne A—B, Resultaterne af (2) i Stykkerne E—L.

Stenene hennemredes enten i lufttør eller i vanddrukken Tilstand for at faa Tørhedsgradens Indflydelse belyst.

Prøvningen fandt Sted, da Pillerne var 9 Maaneder gamle og omfattede saavel Bestemmelse af Trykstyrken som Maaling af Pillernes Forkortelser. Ved disse Maalinger bestemtes ikke alene Pillens samlede Forkortelse; ogsaa Stenenes Sammentrykning blev maalt paa 4 Sten i hver Pille, idet man ønskede at paavise, at Trykkraften i en muret Pilles Tværsnit er ujævnt fordelt.

En Sammenfatning af Forsøgsresultaterne findes i Beretningens sidste Stykke.

A. MOLERSTENENE

Molerstenene leveredes af *A/S Skarrehage Molerværk*. De var meget regelmæssige og af ens Størrelse ($23 \cdot 11 \cdot 5,5 \text{ cm}^3$); blandt 360 Sten, som maales, havde de 295 (82 %) Længder, der kun varierede mellem 22,9 og 23,1 cm^3 .

Rumvægten efter Tørring ved 105° fandtes at være 800 (780—830) kg/m^3 , og den var ens i Stenenes Hjørner og Midte. Vægtfylden var 2,20 g/cm^3 og Porerumfanget 63,9 %.

Hygroskopiske Egenskaber. Stenene er noget hygroskopiske, hvilket muligvis skyldes et Indhold af MgSO_4 , muligvis blot deres fine Porer. Fig. 1 a viser, hvor hurtigt Tværskiver med forskellig Tykkelse optager Vand, naar de henligger i vandmættet, $16\text{--}17^\circ$ varm Luft. Vandindholdet

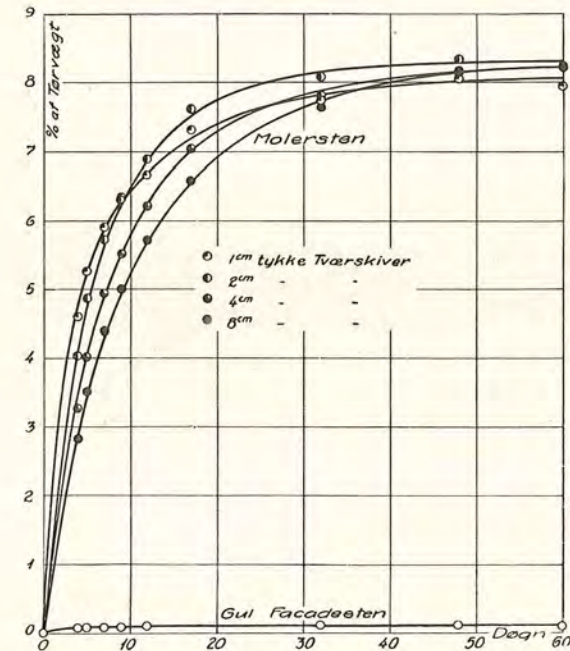


Fig. 1a. Molerstens- og Teglstensskivers Vandoptagelse ved Lagring i vandmættet Luft.

synes under disse Forhold ikke at kunne overstige ca. 8,2% af Skivernes Tørvægt (ca. 6,6 Rumfangsprocent), og denne Ligevægtstilstand naas først i Løbet af ca. 2 Maaneder. Jo tyndere Skiven er, desto hurtigere sker Vandoptagelsen, naar Vandmængden udtrykkes i Vægtprocent — som i Fig. 1 a — eller i Rumfangsprocent; udtrykkes Vandmængden i Gram eller i Gram pr. Overfladeenhed — Fig. 1 b — vokser Optagelses-

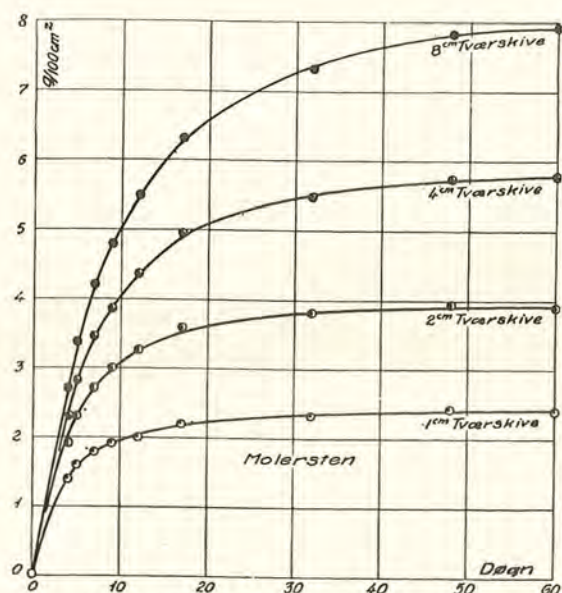


Fig. 1b. Molerstensskivers Vandoptagelse ved Lagring i vandmættet Luft.

hastigheden med Skivens Tykkelse. Optagelsen af 1 Gram Vand pr. Overfladeenhed kræver altsaa des kortere Tid, jo tykkere Skiven er, hvilket tyder paa, at Vandet hurtigt fordeler sig over hele Skivens Tykkelse; i Optagelsesperioden vil Overfladens Tørhed da vokse med Skivens Tykkelse.

Tilsvarende Skiver af en gul Facadesten optog kun 0,11 Vægtprocent Vand (ca. 0,2 Rumfangsprocent), en Værdi som naaedes i Løbet af ca. 1 ½ Maaned (Fig. 1 a, nedre Kurve); disse Stens Vandoptagelsehastighed varierede ligesom Molerstenenes med Skivetykkelsen, men Forskellene kan ikke vises i den valgte Maalestok.

Der var ved disse Forsøg truffet saadanne Forholdsregler, at Nedslag af Fortætningsvand maa betragtes som udelukket; naar Vandindholdet ved andre Forsøg med Molersten — se senere — fandtes at overstige 8,2%, skyldes det utvivlsomt Fortætningsvand.

Vandsugningshastighed. Molerstenene har finere Porer end almindelige Teglsten og suger derfor Vandet langsommere til sig, naar de berører vaad Mørtel. Vandets Opsugningshøjde h i en Sten af hver Slags, anbragt paa Enden i en lav Vandbakke i Stueluft, fandtes at variere paa følgende Maade med Tiden:

	Molersten	Flamsten
h efter 30 Minutter	12,0 mm	32,0 mm
h » 20 »	11,3 »	28,7 »
h » 10 »	9,5 »	20,0 »

Opsugningshastigheden $\frac{\Delta h}{\Delta t}$ aftager stærkt med voksende h ; den er fra det 10. til det 30. Minut meget nær 4,8 Gange saa stor for Flamstenene som for Molerstenene.

Vandoptagelsen bestemt med hele Sten under forskellige Lagringsforhold fandtes at være:

Lagring i Stueluft (8 Maaneder)	2,4 Vægtprocent	
- - vandmættet Luft (7 Døgn)	5,3	-
- - Vand (7 Døgn)	74,9	(59,4 Rmf. %).

Selvætningsevnen = $\frac{\text{Optaget Vand}}{\text{Porerumfang}} = \frac{59,4}{63,9} = 0,930$. Denne høje Værdi forklarer, at Stenene ikke er frostfaste.

Sten udtaget af 9 Maaneder gamle Murværkspiller, der havde henstaaet i Stueluft, indeholdt 4,37 Rumfangsprocent Vand. Dette Tal er 12 Gange saa stort som det tilsvarende for Flamsten (Side 11).

Trykelasticitetstallet bestemt af de totale Forkortelser ved lave Spændinger ($\sigma \leq 21^{at}$) kan regnes at være 20 000^{at}. Se nærmere om Forsøgenes Udførelse i Bilag 2.

Trykstyrken af cylindriske Prøvelegemer ($h = 5,5^{cm}$, $d = 5,0^{cm}$) fandtes 3% større for Prøvelegemer udtaget i Stenenes Hjørner end for Prøvelegemer udtaget midt i Stenene. Som Middeltal for 20 Prøvelegemer fandtes:

Cylindrenes Tilstand	Vand i Vægtprocent	Trykstyrke i at
Vandfrie	0	95 (63—125)
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	9,45 ¹⁾	73 (53—105)
» 7 » » Vand	ca. 75	71 (51—82)

¹⁾ Værdien er høj, hvilket utvivlsomt skyldes Fortætningsvand.

Ved Forsøg med sammenmurede Halvsten (10 Prøvelegemer) tørret ved 60° fandtes Trykstyrken at være 92—138^{at}, gennemsnitlig 116^{at}, altsaa 22 % større end for Cylindrene, hvilket skyldes de stærke Mørtelfuger (Cementmørtel 1 : 0 og 1 : 1).

Bøjningsstyrken af hele Sten (5 Prøvelegemer) var mere variabel end Trykstyrken. Ogsaa den viste sig aftagende med voksende Vandindhold:

Stenenes Tilstand	Vand i Vægtprocent	Bøjningsstyrke i at
Vandfrie	0	15,4 (10—18)
Stuetørre	2,36	13,0 (8—18)
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	5,33	11,6 (8—15)
» 7 » » Vand	74,9	9,5 (4—13)

Naar Bøjningsstyrken udtrykkes i Procent af de tilsvarende Cylindres Trykstyrke, bliver Tallene:

Stenenes Tilstand	Bøjningsstyrke
Vandfrie	15,6 % af Trykstyrken
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	15,4 » » »
» 7 » » Vand	13,6 » » »

Et Vandindhold i Stenene forringer altsaa Bøjningsstyrken og Trykstyrken i nogenlunde samme Forhold.

B. TEGLSTENENE

Teglstenene var almindelige flammede Bagmuringssten, *Flamsten*, fra *Sølyst Teglværk* indkøbt af Laboratoriet. Deres Størrelse var den samme som Molerstenenes (23 · 11 · 5,5^{cm}). Blandt 360 Sten havde de 281 (78 %) en Længde, der varierede mellem 22,7 og 23,0^{cm}.

Rumvægten efter Tørring ved 105° fandtes at være 1740 (1680—1800) kg/m³, og den var ens i Stenenes Hjørner og Midte. Vægtfylden var 2,74 g/cm³ og Porerumfanget 37,6 %.

Hygroskopiske Egenskaber og Vandsugningshastighed er omtalt under Molersten (Side 7 og 9).

Vandoptagelsen under forskellige Lagringsforhold fandtes at være:

Lagring i Stueluft (8 Maaneder)	0,16 Vægtprocent
- - vandmættet Luft (7 Døgn)	0,34 -
- - Vand (7 Døgn)	17,8 - (30,9 Rmf. %).

$$\text{Selvmætningsevnen} = \frac{30,9}{37,6} = 0,822.$$

Sten udtaget af 9 Maaneder gamle Murværkspiller, der havde henstaaet i Stueluft, indeholdt 0,38 Rumfangsprocent Vand (Tabel 5).

Trykstyrken af cylindriske Prøvelegemer ($h = 5,2$ cm, $d = 5,0$ cm) udtaget i Stenenes Hjørner fandtes 11 % større end Trykstyrken af cylindriske Prøvelegemer udtaget midt i Stenene. Som Middeltal (20 Prøvelegemer) fandtes:

Cylindrenes Tilstand	Vand i Vægtprocent	Trykstyrke i at
Vandfrie	0	431 (216—810)
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	0,89 ¹⁾	370 (224—882)
» 7 » » Vand	Ej bestemt	390 (119—792)

Stenene ses at være meget uensartede.

Naar Trykstyrken bestemtes ved Hjælp af sammenmurede Halvsten (10 Prøvelegemer), paavirkedes den stærkt af Midterfugens Mørtelart og Tykkelse:

Halve Flamsten sammenmuret med	Trykstyrke i at
Cement-Mørtel 1 : 0 som vanligt 2—3 mm Fuge	} efter Tørring ved 60° 426 (157—823)
Cement-Mørtel 1 : 3 Alm. Sand og 12 mm Fuge	
Kalk-Cement-Mørtel 0,18 ²⁾ : 0,315 : 3 Alm. Sand og 12 mm Fuge	} » Lufttørring 369 (281—490)
	} » » 204 (181—255)

I første Tilfælde er Styrken kun 1 % mindre end Cylindrenes.

Bøjningsstyrken af hele Sten (5 Prøvelegemer) var mindre varierende end Trykstyrken. Som Middeltal fandtes:

Stenenes Tilstand	Vand i Vægtprocent	Bøjningsstyrke i at
Vandfrie	0	61,5 (40—93)
Stuetørre	0,16	53,2 (35—80)
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	0,34	48,0 (31—87)
» 7 » » Vand	17,8	55,5 (25—94)

Naar Bøjningsstyrken udtrykkes i Procent af de tilsvarende Cylindres Trykstyrke, bliver Tallene:

Stenenes Tilstand	Bøjningsstyrke
Vandfrie	14,3 % af Trykstyrken
Efter 7 Døgn i vandmættet Luft	14,1 » » »
» 7 » » Vand	15,1 » » »

¹⁾ Værdien er høj, hvilket utvivlsomt skyldes Fortætningsvand.

²⁾ Vægt af Ca(OH)₂.

Disse Værdier afviger kun lidet fra Molerstenenes. For begge Stensorter under et kan regnes $S^b : S^c = 0,147$ uafhængigt af Vandindholdet.

Hvis S^c er bestemt med sammenmurede Halvsten, findes $S^b : S^c = 0,118$ gældende for tørre Sten.

For sidstnævnte Forhold har *Hirsch*¹⁾, *Hecht*²⁾ og *Drögsler*³⁾ fundet Middelværdier, som ligger mellem 0,16 og 0,17, mens man af *Hanssons* Forsøg⁴⁾ kan udregne — se nedenfor — Værdier mellem 0,17 og 0,30, gennemsnitlig 0,22.

De tre førstnævnte Forskere har fundet, at $S^b : S^c$ ikke varierer lov-mæssigt med Rumvægten, hvilket stemmer med de foreliggende Forsøg. Men for svenske Teglsten er $S^b : S^c$ fundet omvendt proportionalt med Rumvægten. *Bergström*⁵⁾ finder saaledes:

$$S^b : S^c = \frac{1}{K \cdot \gamma} \begin{cases} K = 3 & \text{for højporøse Sten} \\ - = 3,25 & \text{lette} \\ - = 3,5 & \text{alm.} \end{cases}$$

hvor γ er Rumvægten i kg pr. Liter, og *Royen*⁶⁾ angiver, at Forholdet aftager fra 0,40 til 0,16, naar γ vokser fra 1,0 til 1,6 kg/Liter. *Royen* henviser kun til *Hanssons* Beretning om Murværksforsøg i »Tegel« 1937, Nr. 8, men Yderværdierne maa stamme fra andre Forsøg, thi *Hanssons* Værdier er følgende:

Rumvægt kg/Liter	1,17	1,18	1,21	1,39	1,39	1,46	1,50	1,58	1,59
Forholdet $S^b : S^c$	0,30	0,25	0,30	0,18	0,19	0,22	0,21	0,18	0,17.

C. MØRTLERNE

Til Pillernes Opmuring brugtes 4 forskellige Mørtler, hvis Sammensætning efter Vægt var:

	Sand	Ca(OH) ₂	Diatomol	Cement	Bindemiddel ialt
Kalk-Diatomol-Mørtel	100	10	15		25
Kalk-Mørtel	100	8,7			8,7
Kalk-Cement-Mørtel	100	6		10,5	16,5
Cement-Mørtel	100			33,3	33,3

¹⁾ *H. Hirsch*: Neuere deutsche wissenschaftliche Forschungen auf dem Gebiete der Ziegelindustrie. Tonindustrie-Zeitung 1930, Nr. 84, Side 1331.

²⁾ *H. Hecht*: Normenfähige Prüfverfahren in der Grobkeramik. Tonindustrie-Zeitung 1937, Nr. 24/25, Side 277 og I. A. T. M., London Congress 1937, Side 381, 422, 423.

³⁾ *Otto Drögsler*: Ziegelprüfung. Tonindustrie-Zeitung 1932, Nr. 90, Side 1112.

⁴⁾ *Olof Hansson*: Murværksprovningen. »Tegel« Nr. 8, Stockholm 1937.

⁵⁾ *M. Bergström*: Über die Möglichkeit die Druckfestigkeit der Ziegel aus der Biegefestigkeit zu berechnen. Tonindustrie-Zeitung 1934, Nr. 9, Side 110.

⁶⁾ *N. Royen*: Ytter- og innervæggar av tegel och lättbetong. Högre Kurs I, Byggnadsteknik. Norrköping 1939, Side 40.

Sandet var finkornet Havsand, som det almindeligvis bruges til Kalkmørtel i København. Kornfordelingen, bestemt med Pladesigter med cirkulære Huller, var:

5—2 mm	0,1	Vægtprocent
2— $\frac{1}{2}$ -	2,4	—
$\frac{1}{2}$ —0 -	97,5	—

Kalken var Kulekalk.

Diatomol er ubrændt Moler, malet og vindsigtet. Det er et lyst, brungraat Pulver, hvis Litervægt bestemt med Böhmes Apparat fandtes at være 443^g. Kalkmørtel med en passende Diatomtilsætning holder langt stærkere paa Vandet end almindelig Kalkmørtel og er derfor velegnet til Henmuring af stærkt sugende Sten.

Cementen var almindelig dansk Portlandcement.

Mørtlernes Vandindhold. Mørtlerne fremstilledes i en lukket, haandrevet Blandemaskine, og Vand tilsattes, indtil Mørtlens Konsistens var saadan, at Muringen foregik lettest muligt. Det halve Antal Piller opmuredes af lufttørre Sten, det halve Antal af vanddrukne Sten, og Mørtlernes Vandindhold maatte derfor afpasses ikke blot efter Stenenes Art, men ogsaa efter Stenenes Vaadhed (Tabel 1); det kom derved til at aftage i Ordenen:

Tørre Flamsten
- Molersten
Vaade Flam- og Molersten.

Mørtlernes Konsistens er ogsaa indført i Tabel 1. Den bedømtes ved en Mørtelkeglestubs Udflydning paa Laboratoriets lille Rystebord (Fig. 2), hvis Faldhøjde er 0,9^{cm}. Efter 12 Fald i 12 Sekunder bestemtes Forholdet mellem det udflydte og det oprindelige Mørtellegemes Diameter, og dette Forhold — Flydeevnen — er brugt som Maal for Konsistensen.

Tabel 1. Mørtlernes Vandindhold i % af Tørstofvægten samt Mørtlernes Konsistens.

Mørtlens Art	Vand i Mørtler brugt til			Flydeevne hos Mørtler brugt til		
	lufttørre Flam- sten %	vanddrukne Moler- sten %	Flam- og Molersten %	lufttørre Flam- sten	vanddrukne Moler- sten	Flam- og Molersten
Kalk-Diatomol . . .	28,50	27,30	24,34	2,00	2,00	1,31
Kalk	32,44	28,44	21,73	2,39	2,36	1,29
Kalk-Cement	25,60	24,60	20,60	2,27	2,08	1,25
Cement	24,20	22,12	17,50	2,38	2,10	1,16



Fig. 2. Rystebord.

Af Tabellen fremgaar følgende:

(1) Lufttørre Sten kræver en langt vaadere og mere flydende Mørtel end vanddrukne.

(2) Lufttørre Flamsten kræver en noget vaadere Mørtel end lufttørre Molersten; dette skyldes Flamstenenes hurtigere Sugning. Kalk-Diatomol-Mørtlerne og Kalkmørtlerne har vist ens eller meget nær ens Flydeevne trods Forskellen i Vandindhold; deres Evne til at bevare Konsistensen, selv om Vandindholdet varierer lidt, er større end de cementholdige Mørtlers.

Mørtlernes Rumvægt og Styrke. Den Styrke, en Muremørtel faar, naar den anbringes mellem sugende Sten, kan ikke bedømmes ved Hjælp af Prøvelegemer støbt i Metalforme paa almindelig Maade. For at komme de naturlige Forhold nærmere har Laboratoriet i en Aarrække ved Bedømmelse af Muremørtels Styrke brugt at udsætte Mørtlerne for Sugning umiddelbart efter Støbningen¹⁾. Prøvelegemerne er da $2 \cdot 2 \cdot 12$ cm Stænger, der støbes liggende i en Metalform. Naar Formen er fyldt, dækkes den med 4 Lag Træpapir og en Glasplade og vendes, hvorefter den nu opadvendende Bund fjernes og erstattes med 4 andre Lag Træpapir

¹⁾ Se E. Suenson: Magniumklorid som Mørteltilsætning. «Ingeniøren» 1926, Nr. 46 og Samme: Sækkealk. «Arkitekten» 1933, Ugehefte 45.

og en Glasplade, der belastes med et Blylod. Efter 3 Timers Henstand afformes Stængerne.

Ogsaa ved de foreliggende Forsøg blev denne Fremgangsmaade brugt. Stængerne støbtes samtidig med at Pillerne opmuredes, og de afformede Stænger lagredes sammen med disse.

Stængerne prøvedes samme Dag som den tilsvarende Pille; Gennemsnitsalderen var 9 Maaneder. Bøjningsstyrken bestemtes ved at belaste Stængerne med en Enkeltkraft paa Midten; en af de ved Støbningen lodretstaaende Sideflader var Trækside. Trykstyrken bestemtes ved at belaste Brudstykkerne fra Bøjningsforsøgene gennem to kvadratiske Staalplader med 2^{cm} Sidelinie lagt paa de Sideflader, der var Træk- og Trykside ved Bøjningsforsøgene. At Mørtlerne var fremstillet med 3 forskellige Vandmængder (Tabel 1) havde kun i ringe Grad paavirket deres Rumvægt og Styrke; Trækpapiret har altsaa suget mere Vand ud af de vaade Mørtler end af de tørrere, saaledes som det var tilsigtet.

Middelværdierne af Rumvægt og Styrke er indført i Tabel 2. Man ser, at Forholdet mellem Bøjningsstyrke og Trykstyrke aftager med voksende Styrketal.

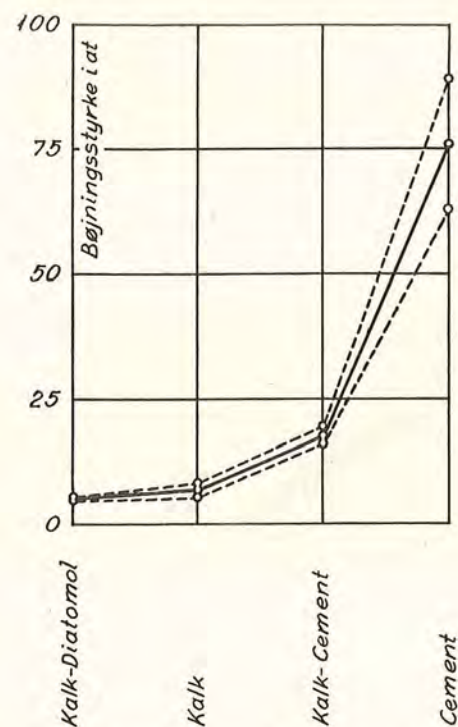


Fig. 3. Mørtlernes Bøjningsstyrke bestemt med afsugede Mørtelstænger.

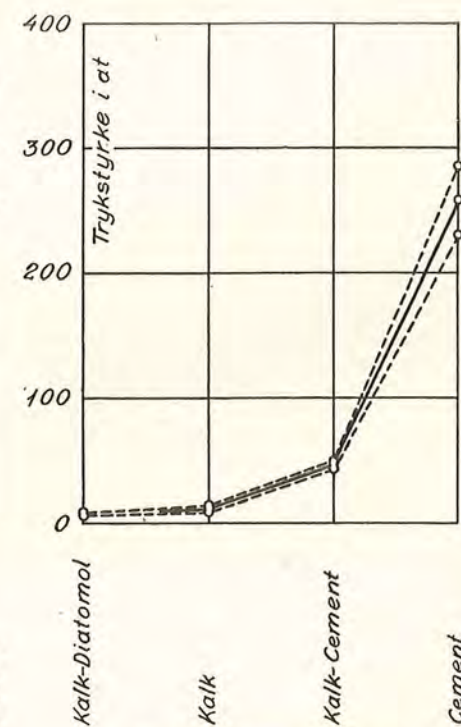


Fig. 4. Mørtlernes Trykstyrke bestemt med afsugede Mørtelstænger.

Tabel 2. Mørtelstængernes Rumvægt og Styrke.

Mørtlens Art	Rumvægt kg/m ³	Bøjnings- styrke S ^b at	Tryk- styrke S ^c at	$\frac{S^b}{S^c}$
Kalk-Diatomol.....	1720	5,2	6,9	0,75
Kalk.....	1710	6,5	10,8	0,60
Kalk-Cement.....	1800	18,0	46,2	0,39
Cement.....	1940	76,0	258,0	0,29

Styrketallenes Variation er desuden fremstillet grafisk i Fig. 3 og 4, og her er ikke blot Middelværdien, men ogsaa Ydergrænserne vist.

D. PILLERNE FREMSTILLING

Pillerne (Fig. 5—8) var 1-Stens Piller med 10 Skifter opmuret paa en kvadratisk Staalplade 25 · 25 · 1,8^{cm} og dækket foroven med en tilsvarende Plade. Fugen nærmest Pladerne var i alle Tilfælde af Cementmørtel.

Med hver af de 4 Mørtelarter opmuredes:

- 2 Piller af vanddrukne Molersten
- 2 - - lufttørre -
- 2 - - vanddrukne Flamsten
- 2 - - lufttørre -

ialt 32 Piller.

Opmuringen skete i 1. Uge af September.

Det halve Antal Piller opmuredes med vanddrukne Sten, det halve Antal med lufttørre Sten, d. v. s. med Stenene i Leveringstilstanden. Molerstenene indeholdt henholdsvis 75 og 0,8 Vægtprocent Vand (60 og 0,64 Rumfangsprocent), Flamstenene 18 og 1,6 (31 og 2,8 Rumfangsprocent).

Muringen udførtes ikke af Murere, men af Laboratoriets Personale. Der muredes paa almindelig haandværksmæssig Maade, idet Mørtlen udlagdes som en Bunke under hver enkelt Sten. Dog fyldtes Stødfugerne omhyggeligt.

Ved Muring med vanddrukne Sten forblev Mørtlen »levende« i lang Tid. Muringen foregik let og bekvemt, men Mørtlen vilde gerne løbe ud af Fugerne, og det viste sig senere, at der i 3 Molerstenspiller (2 i Kalk-Cement-Mørtel, 1 i Kalkmørtel) var Lunker i de vandrette Fuger over Stødfugerne (Fig. 24—25).

Ved Muring med lufttørre Sten sugedes Mørtlen hurtigt »død«, hvilket besværliggjorde Muringen, idet Stenene hurtigt maatte trykkes i Leje. Muringens Vanskelighed voksede i den Orden, i hvilken Mørtlerne er

opført i Tabel 3. Cementmørtlen blev væsentlig hurtigere »død« end de andre og kunde i Praksis ikke have været brugt sammen med tørre Sten; man prøvede at forøge dens Vandindhold, men det var ikke muligt at arbejde med en vaadere Mørtel.

Fugetykkelsen blev som Følge af de nævnte Forhold noget varierende (Tabel 3) og størst i Flamstenspillerne paa Grund af Flamstenenes hurtigere Sugning.

Tabel 3. Pillerne gennemsnitlige Fugetykkelse.

Mørtlens Art	Molersten		Flamsten		Middel cm
	vanddrukne cm	lufttørre cm	vanddrukne cm	lufttørre cm	
Kalk-Diatomol....	0,90	1,08	0,99	1,15	1,03
Kalk.....	0,86	1,12	1,05	1,09	1,03
Kalk-Cement.....	1,01	1,01	1,08	1,18	1,07
Cement.....	1,16	1,10	1,18	1,19	1,16
Middel...	0,98	1,08	1,08	1,15	1,07

Lagring. Efter Opmuringen henstod Pillerne i Laboratoriets Betonstøberum, hvor Temperaturen svingede omkring 13°; i den 1. Uge var de dækket med vaade Sække. Efter 4¹/₄ Maaned flyttedes de til Laboratoriets Prøverum, hvor Temperaturen var ca. 17°; der forblev de indtil Prøvningen.

Saltudslag. Ved Overflytningen blev Pillerne fotograferet (Fig. 5—8).

Ved Flytningen gjordes følgende Iagttagelser:

(1) Pillerne af lufttørre Molersten var helt fri for Saltudslag.

(2) - - vanddrukne - - næsten - - -

(3) - - lufttørre Flamsten viste ret kraftige - -

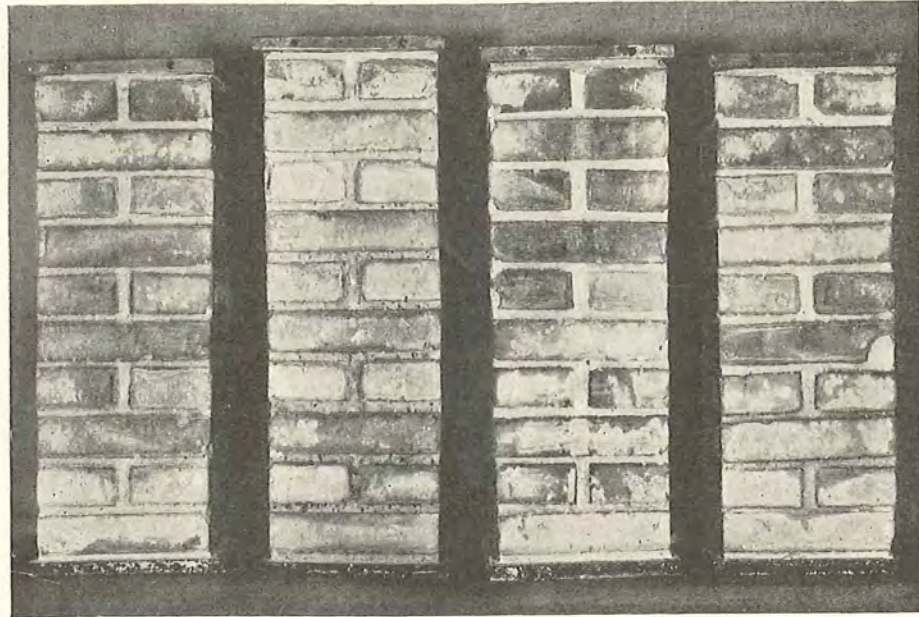
(4) - - vanddrukne - - endnu kraftigere - -

(5) Saltene fremkom paa Stenene; kun Piller af vanddrukne Flamsten havde i enkelte Tilfælde Salte paa Fugemørtlen. At der ikke forekom Salte paa Fugerne paa Piller af lufttørre Flamsten, der ellers havde ret kraftige Udslag, skyldes utvivlsomt, at disse Pillers Mørtler i højere Grad har afgivet Vand til Stenene end til Luften.

(6) Saltmængden paa Flamstenspillerne aftog i Rækkefølgen: Cement-Mørtel, Kalk-Cement-Mørtel, Kalk-Diatomol-Mørtel, Kalk-Mørtel.

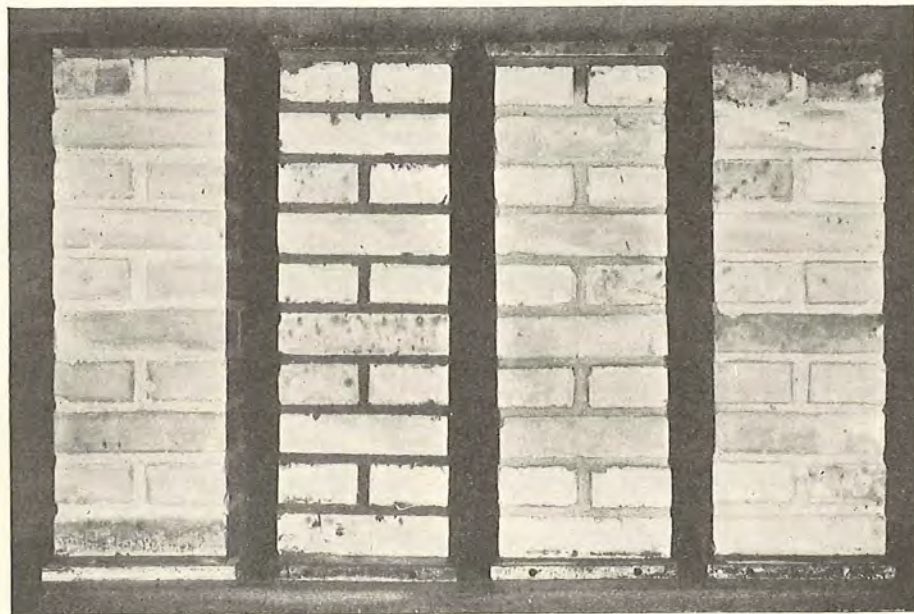
Forskellen mellem Molersten og Flamsten skyldes ikke, at Molerstenene indeholdt en ringere Saltmængde, men at Vandet i deres fine Porer transporteres saa langsomt, at Fordampningen ikke sker i selve Overfladen, men i en Flade bag denne, saa Saltene udskiller sig inde i Stenen¹⁾.

¹⁾ Se E. Suenson: Natursten 1942, § 119.



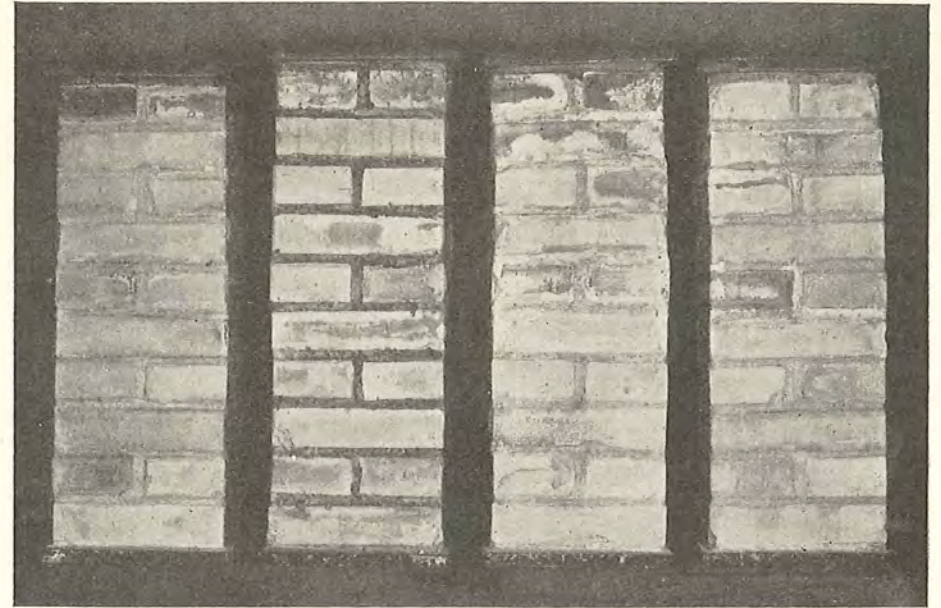
Kalk Cement Kalk-Cement Kalk-Diatomol

Fig. 5. Piller opmuret af vanddrukne Molersten.



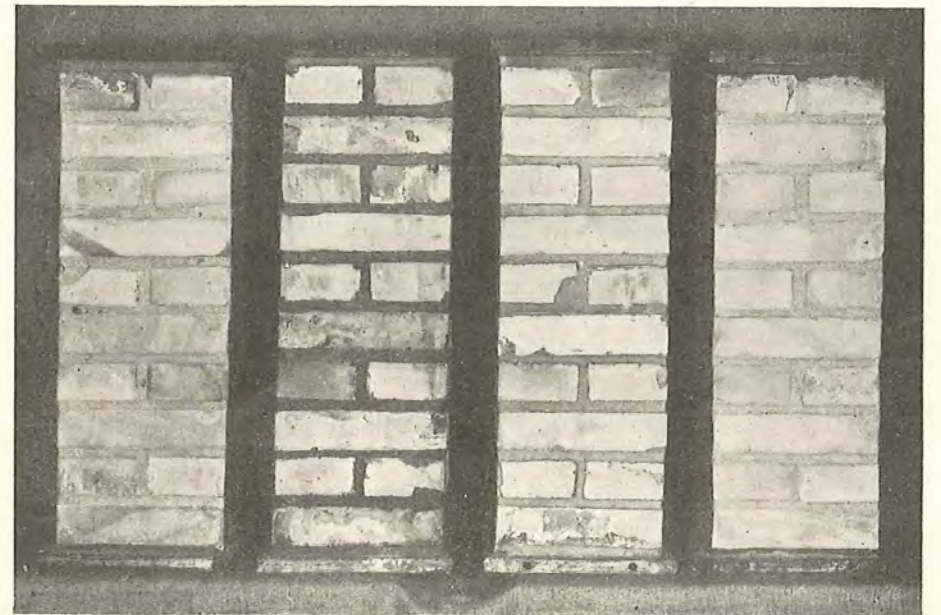
Kalk Cement Kalk-Cement Kalk-Diatomol

Fig. 6. Piller opmuret af lufttørre Molersten.



Kalk Cement Kalk-Cement Kalk-Diatomol

Fig. 7. Piller opmuret af vanddrukne Flamsten.



Kalk Cement Kalk-Cement Kalk-Diatomol

Fig. 8. Piller opmuret af lufttørre Flamsten.

E. PILLERNES VANDINDHOLD

Umiddelbart efter hver Pilles Knusning udtoges en Sten- og Mørtelprøve fra Pillens Kærne. Ved Hjælp af disse Prøver bestemtes Vandindholdet i Sten og Mørtel, og af de fundne Værdier udregnedes Pillens totale Vandindhold.

For Stenenes Vedkommende bestemtes Vandmængden ved Tørring ved 105°. For Mørtlernes Vedkommende brugtes et Xylolapparat, hvorved Optagelse af CO₂ blev undgaaet. Samtlige Værdier omregnedes fra Vægtprocent til Rumfangsprocent. For Mørtlernes Vedkommende blev Rumvægten af de til Styrkeforsøg støbte Mørtelstænger brugt ved Omregningen. Værdierne er indført i Tabellerne 4, 5 og 6.

Mørtlernes Vandindhold (Tabel 4) i de 9 Maaneder gamle Piller varierede stærkt med Mørtlens Art. At Kalkmørtlen indeholder saa meget mindre Vand end de øvrige Mørtler kan forklares ved dens ringe Indhold af Bindemiddel (Stykke C) og ved, at den ikke har afgivet Gelvand i den høje Temperatur, ved hvilken Vandmængden bestemtes (137°, Xylolets Kogepunkt), fordi den ikke indeholder saadant Vand, men kun Porevand, samt ved, at de cementholdige Mørtler har hygroskopiske Egenskaber. At Kalk-Diatomol-Mørtlen indeholder saa meget mere Vand end Kalkmørtlen maa forklares ved, at Kalk-Diatomol-Mørtlens Indhold af Bindemiddel pr. 100^g Sand er 3 Gange saa stort.

Tabel 4. Mørtlernes Vandindhold i Rumfangsprocent.

Mørtlens Art	Vanddrukne Sten			Lufttørre Sten		
	Molersten %	Flamsten %	Middel %	Molersten %	Flamsten %	Middel %
Kalk-Diatomol.	5,28	2,87	4,08	2,39	2,36	2,38
Kalk	0,82	0,68	0,75	0,58	0,42	0,50
Kalk-Cement	5,85	3,96	4,91	2,71	2,47	2,59
Cement	9,97	7,64	8,81	4,38	4,54	4,46

De Mørtler, der har ligget mellem vanddrukne Sten, er vandrigere end de, der har ligget mellem lufttørre Sten, skønt de ved Muringen var tørrere.

De Mørtler, der har ligget mellem vanddrukne Molersten, er vandrigere end de, der har ligget mellem vanddrukne Flamsten, hvilket skyldes, at Molerstenene ved Indmuringen indeholdt dobbelt og ved Prøvningen 12 Gange saa meget Vand som Flamstenene.

De Mørtler, der har ligget mellem lufttørre Sten, har omtrent ens Vandindhold, hvad enten Stenene er Molersten eller Flamsten.

Som Middeltal for samtlige Piller opmuret i samme Slags Mørtel findes følgende Vandindhold (bestemt ved Tørring ved 137°):

Kalk-Diatomol	32,3	Liter pr. m ³ Mørtel
Kalk	6,3	- - - -
Kalk-Cement	37,5	- - - -
Cement	66,3	- - - -

Stenenes Vandindhold (Tabel 5). Molerstenene indeholder gennemsnitlig ca. 12 Gange saa meget Vand som Flamstenene, hvilket skyldes deres finere Porer og eventuelt hygroskopiske Salte (se ogsaa Fig. 1 a). De lufttørre Molersten indeholder ca. 6 Gange saa meget Vand som ved Indmuringen.

Tabel 5. Murstenenes Vandindhold i Rumfangsprocent.

Mørtlens Art	Molersten			Flamsten		
	vanddrukne %	lufttørre %	Middel %	vanddrukne %	lufttørre %	Middel %
Kalk-Diatomol.	5,14	3,62	4,38	0,45	0,21	0,33
Kalk	5,19	3,75	4,47	0,49	0,30	0,40
Kalk-Cement	5,40	4,13	4,77	0,30 ¹⁾	0,40	0,35
Cement	4,49	3,22	3,86	0,47	0,38	0,43
Middel...	5,06	3,68	4,37	0,43	0,32	0,38

De vanddrukne Sten er stadig de vaadeste, men de er ikke meget vaadere end de lufttørre.

Mørtlens Art er næsten uden Betydning for Stenenes Vandindhold.

Pillernes Vandindhold (Tabel 6). Piller af vanddrukne Sten indeholder ca. 47 % mere Vand end Piller af lufttørre Sten.

Tabel 6. Murværkets (beregnete) Vandindhold i Rumfangsprocent.

Mørtlens Art	Molersten			Flamsten		
	vanddrukne %	lufttørre %	Middel %	vanddrukne %	lufttørre %	Middel %
Kalk-Diatomol.	5,17	3,40	4,29	0,88	0,64	0,76
Kalk	4,53	3,17	3,85	0,53	0,32	0,43
Kalk-Cement	5,48	3,89	4,69	0,99	0,82	0,91
Cement	5,56	3,43	4,50	1,93	1,23	1,58
Middel...	5,19	3,47	4,33	1,08	0,75	0,92

¹⁾ Denne Værdi maa antages at være fundet for lav.

Molerstenspillernes Vandprocent er gennemsnitlig 4,7 Gange Flamstenspillernes, hvilket hovedsageligt skyldes Molerstenenes store Vandprocent (Tabel 5).

Af de 9 Maaneder gamle Molerstenspillers samlede Vandmængde fandtes gennemsnitlig 84 % i Stenene og 16 % i Mørtlen, hos Flamstenspillerne fandtes 41 % i Stenene og 59 % i Mørtlen.

F. PILLERNES RUMVÆGT

Umiddelbart før Prøvningen blev Pillerne vejjet og maalt og deres Rumvægt udregnet (Tabel 7). Ved Udregningen blev der gjort Fradrag for øverste og nederste Fuge, der i alle Piller var af Cementmørtel.

Tabel 7. Pillernes Rumvægt i kg/m^3 efter 9 Maaneders Lagring.

Mørtlens Art	Molersten		Flamsten	
	vanddrukne kg/m^3	lufttørre kg/m^3	vanddrukne kg/m^3	lufttørre kg/m^3
Kalk-Diatomol	961	998	1699	1721
Kalk	982	982	1716	1704
Kalk-Cement	1005	996	1724	1731
Cement	1054	1000	1752	1762
Middel	1000	994	1722	1729

Cementmørtel har i alle Tilfælde givet de tungeste Piller, Kalk- eller Kalk-Diatomol-Mørtel de letteste.

Stenenes Vaadhedsgrad ved Indmuringen ses at være uden regelmæssig Indflydelse paa Pillernes Rumvægt efter 9 Maaneders Lagring i Stueluft, og tages samtlige Mørtler under et, maa Rumvægten siges at være upaa-virket af, om Pillerne er opmuret af vanddrukne eller af lufttørre Sten. De forholdsvis store Forskelle i 1. og 4. Linie mellem Piller af vanddrukne og lufttørre Molersten skyldes i nogen Grad Fugetykkelsen (Tabel 3).

Molerstenspillernes Rumvægt er gennemsnitlig 25 % større end de tørre Stens, fordi Mørtlernes Rumvægt er stor i Forhold til Molerstenenes.

Flamstenspillernes Rumvægt er gennemsnitlig 1 % mindre end de tørre Stens, fordi Mørtlernes Rumvægt omtrent er lig Flamstenenes.

Forholdet mellem Molerstens- og Flamstenspillernes Rumvægt er 0,58, medens Forholdet mellem Stenenes Rumvægt kun er 0,46. Ogsaa dette skyldes, at Mørtlens Rumvægt er stor i Forhold til Molerstenenes men ikke i Forhold til Flamstenenes.

G. ELASTICITETSFORFORSØG

Trykprøvningens Udførelse. Pillernes Alder paa Prøvedagen var gennemsnitlig 9 Maaneder.

Til Prøvningen brugtes en 200 Tons hydraulisk Presse. Efter at Pillerne var sat under et let Tryk, blev Pressens Trykplader, der hvilede i Kugleskaale, fastkilet, hvorpaa Trykket ophævedes. Spændingen øgedes derefter trinvis med 7^{at} . Naar et Lasttrin var naaet, holdtes Lasten konstant i 5 Minutter, hvorpaa Maaleapparaterne aflæstes. Under Stigningen fra det ene Trin til det andet øgedes Spændingen med $1,0^{\text{at}}/\text{Min.}$; Vente-tiderne iberegnet var Stigningen ca. $0,6^{\text{at}}/\text{Min.}$

Pillernes Sammentrykning maalttes paa 3 forskellige Maader (Fig. 9).

(1) Den totale Sammentrykning maalttes mellem Pillernes Jærnlader med to diametralt modsat anbragte Zeiss-Maaleure (Z1 og Z2) visende Forkortelsen ca. 170 Gange forstørret.

(2) Sammentrykningen mellem øverste og nederste Skiftes vandrette Midterplan maalttes med to andre Zeiss-Maaleure (Z3 og Z4). Maalingerne (1) og (2) stemte overens bortset fra smaa forklarlige Uoverensstemmelser paa de første og de sidste Lasttrin, og Arbejdslinierne blev derfor optegnet paa Basis af Maalingerne (2).

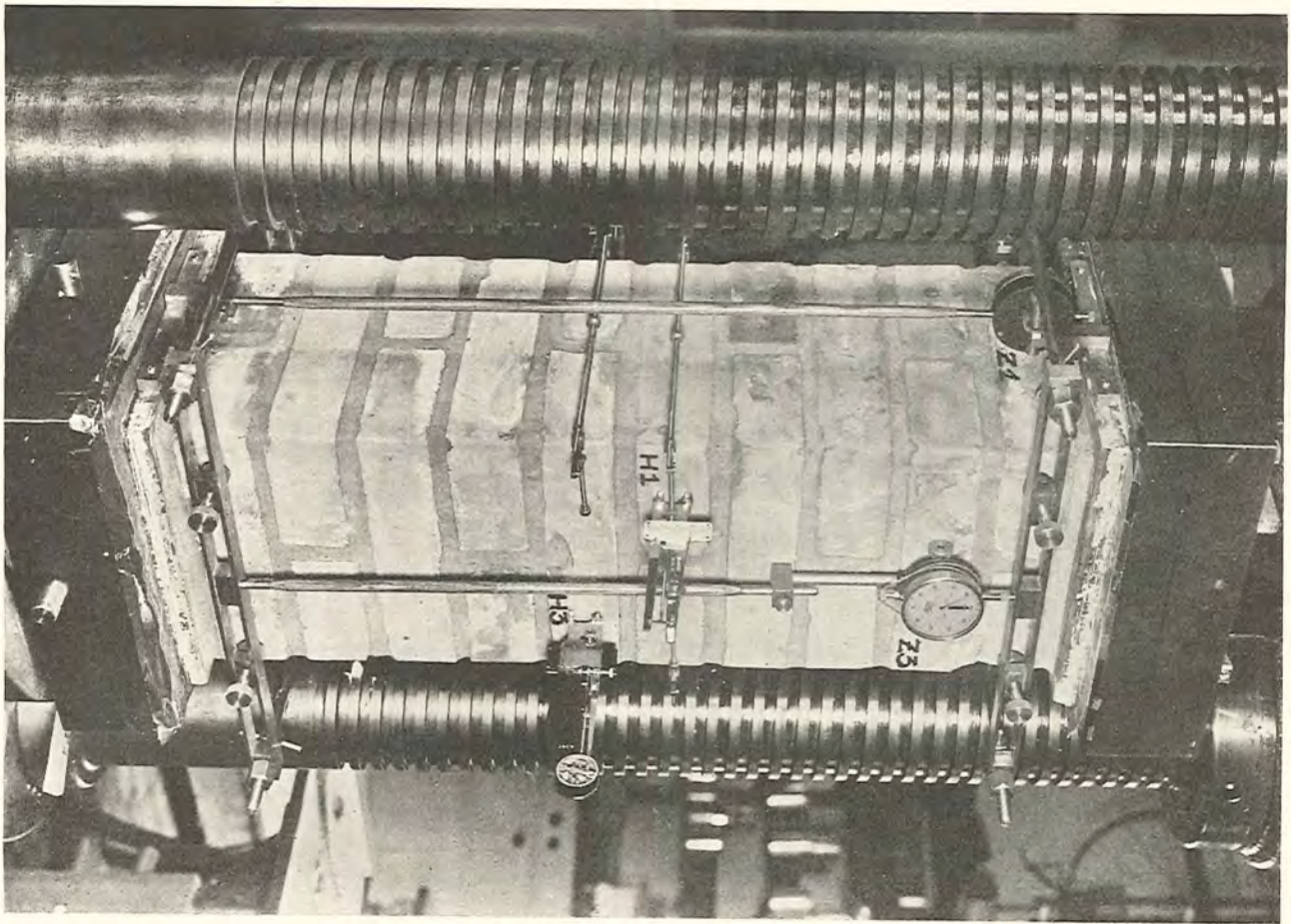
(3) De enkelte Stens Sammentrykning maalttes med 4 Huggenberger-Maalere (H1—H4) visende Forkortelserne ca. 1000 Gange forstørret. Maalerne var anbragt paa de 4 Sten i Pillens to midterste Skifter; H1 og H2 sad diametralt modsat midt paa Endefladerne af hver sin Sten i det øvre af disse Skifter; H3 og H4 sad diametralt modsat i Fjerdedels-punkterne af Sidefladerne paa hver sin Sten i det nedre Skifte. Alle 4 Maalere sad altsaa i ca. $5,5^{\text{cm}}$ Afstand fra Pillens Hjørner. Maalelængden var kun 2^{cm} .

H. PILLERNES ARBEJDSLINIER OG ELASTICITETSTAL

I Fig. 10—13 er Pillernes Arbejdslinier vist. Hver Kurve er Middelkurve for 2 Piller, Kalk-Kurven paa Fig. 13 dog ikke. Kurvernes Endepunkt svarer ikke til Brudøjeblikket; er det indcirklet, svarer det til det Øjeblik, da Maaleapparaterne fjernedes.

Sammenligner man Arbejdslinierne indbyrdes, finder man — som det er at vente — at Flamstenspillernes Arbejdslinier er stejlere end Molerstenspillernes; dette faar man et godt Overblik over ved at danne Middelkurver for Piller af vanddrukne og lufttørre Sten (Fig. 14).

Fig. 9. Flamstønstøkke indsat i Pressen og forsynet med Maaleapparatet.



E. Svendsen og H. Dührkop:

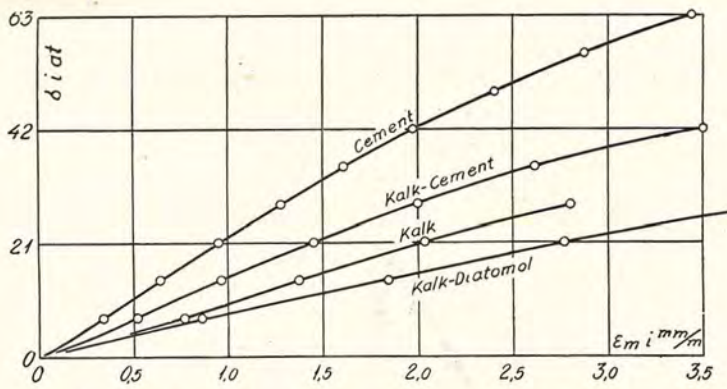


Fig. 10. Arbejdslinier for Piller opmuret af vanddrukne Molersten.

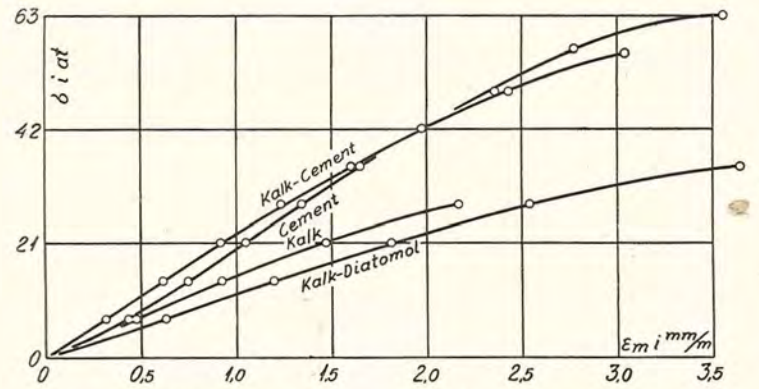


Fig. 11. Arbejdslinier for Piller opmuret af lufttørre Molersten.

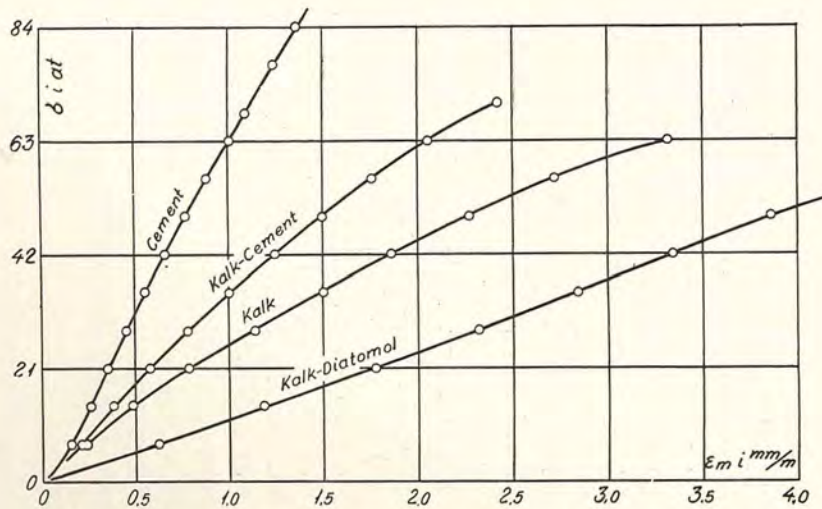


Fig. 12. Arbejdslinier for Piller opmuret af vanddrukne Flamsten.

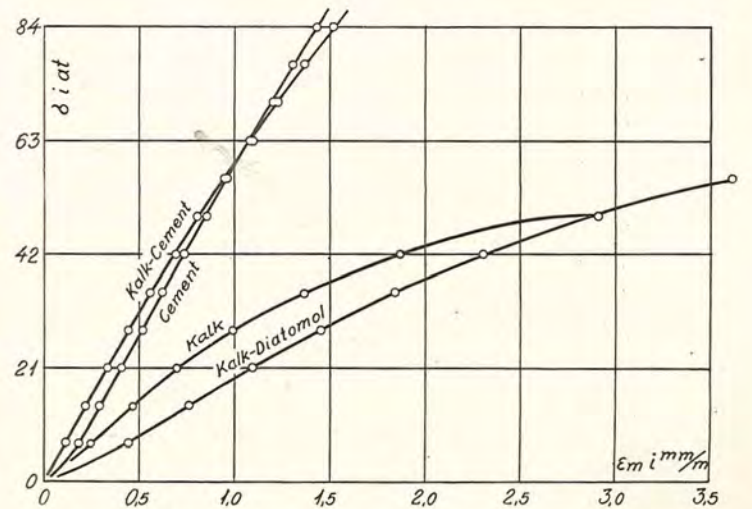


Fig. 13. Arbejdslinier for Piller opmuret af lufttørre Flamsten.

De fleste Arbejdslinier er opad hule paa de første Lasttrin — omend i forskellig Grad — og derefter nedad hule. S-Formen er særligt iøjne-faldende for Piller af tørre Sten i Cementmørtel (Fig. 11 og 13).

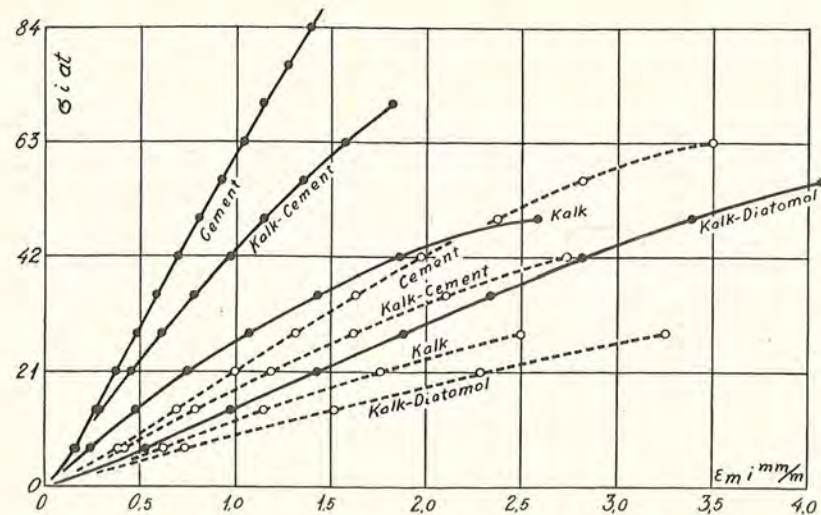


Fig. 14. Middelarbejdslinier for Piller opmuret af vanddrukne og lufttørre Molersten (de punkterede Kurver) og Flamsten (de ikke punkterede Kurver).

Hvad den opad hule Del af Kurverne angaar, lader den sig naturligt forklare ved, at der paa det eller de første Lasttrin er sket relativt store blivende Sammentrykninger i Mørtlen eller i Grænsezonen mellem Mørtlen og Stenene. I denne Tilpasningsperiode maa Arbejdslinien faa en Form svarende til, at Piletværsnittet vokser med Trykkraften; den maa altsaa blive opad hule.

Erstattes det opad hule Kurvestykke foran Vendepunktet med Tangenten i dette, og forskydes Kurven derefter saa meget, at Tangenten gaar gennem Begyndelsespunktet, faas Kurver, der utvivlsomt i højere Grad end de ukorrigerede karakteriserer de forskellige Arter af Murværk, og paa Grundlag af disse Kurver kommer man til følgende:

(1) Pillernes Stivhed vokser i Ordenen: Kalk-Diatomol, Kalk, Kalk-Cement, Cement, altsaa med Mørtlens Styrke.

(2) Piller af Flamsten er langt stivere end Piller af Molersten. Flamstenspillernes Overlegenhed vokser med Mørtlens Styrke.

(3) Piller opmuret af lufttørre Sten er stivere end Piller opmuret af vanddrukne, dog ikke naar Mørtlen er Cementmørtel. Forklaringen er, at de kalkholdige Mørtler hærder bedre mellem luftholdige Sten end mellem vanddrukne, medens Cementmørtel hærder nogenlunde lige godt i de to Tilfælde. De tørre Stens Sugning er vigtig for Adhæsionen

og dermed for Stivheden; ogsaa i denne Henseende indtager Cementmørtlen en Særstilling, idet den adhærer tilstrækkeligt stærkt, selv om Stenene ikke suger.

Pillernes Elasticitetstal E_m bestemt som Hældningen af den rette Linie gennem Begyndelsespunktet og det til 7, 14, 21 og 28^{at} svarende Punkt paa de ukorrigerede Kurver er indført i Tabel 8; for de to sidste Punkter dog kun for Flamstenspillernes Vedkommende.

Tabel 8. Pillernes Elasticitetstal E_m for forskellige Spændingsomraader.

Spændingstrin	Molersten			Flamsten		
	vand- drukne at	lufttørre at	Middel at	vand- drukne at	lufttørre at	Middel at
Elasticitetstal for Piller i Kalk-Diatomol-Mørtel						
0—7at	8300	11200	9700	11300	15900	13600
0—14 »	7600	11700	9600	11800	18400	15100
0—21 »				11800	19300	15500
0—28 »				12100	19300	15700
Elasticitetstal for Piller i Kalk-Mørtel						
0—7at	9000	14700	11900	30100	28000	29100
0—14 »	10200	15100	12600	28600	30100	29300
0—21 »				26500	30000	28600
0—28 »				24700	28200	26400
Elasticitetstal for Piller i Kalk-Cement-Mørtel						
0—7at	13500	22000	17700	33300	65100	49200
0—14 »	14500	22700	18600	36600	65100	50900
0—21 »				36200	64100	50100
0—28 »				35800	63300	49500
Elasticitetstal for Piller i Cement-Mørtel						
0—7at	20700	16100	18400	45100	40000	42600
0—14 »	22000	18700	20300	59900	48300	51600
0—21 »				60000	52200	56100
0—28 »				61600	54600	58100

Den maksimale Værdi af Elasticitetstallet — maks E_m — altsaa den Værdi, der gælder for Kurvens Vendepunkt, er indført i Tabel 9 sammen med det Spændingsomraade, indenfor hvilket Vendepunktet ligger. Naar man som paa Side 26 erstatter Kurvernes opad hule Del med rette Linier, bliver maks E_m Begyndelsesværdien af Pillernes Elasticitetstal.

Tabel 9. Pillernes maksimale E (maks E_m) og tilsvarende Spændingstrin.

Mørtlens Art	Molersten					Flamsten				
	vanddrukne		lufttørre		Middel	vanddrukne		lufttørre		Middel
	E at	σ at	E at	σ at	E at	E at	σ at	E at	σ at	E at
Kalk-Diatomol.	8300	0—7	12300	7—14	10300	14000	35—42	21900	7—14	17900
Kalk	11700	7—14	15400	7—14	13500	30100	0—7	32600	7—14	31300
Kalk-Cement ..	15900	7—14	23300	7—14	19600	40600	7—14	65100	0—14	52800
Cement	23300	7—14	23700	21—28	23500	73700	14—21	65100	28—35	69400

Af Tabel 9 fremgaar de Regler, som foran er opført under (1)—(3). Tabel 8 viser, at disse Regler ogsaa gælder for de S-formede Kurver bortset fra, at (1) ikke gælder for lufttørre Sten i Cementmørtel, og at (3) ikke gælder for Flamsten i Kalkmørtel paa det første Spændingstrin.

Der er Grund til at bemærke, at E for Piller af Molersten i Cementmørtel kun er ca. 17% større end de lufttørre Molerstens E .

I. DE ENKELTE STENS SAMMENTRYKNING

a. De paa Pilleoverfladen maalte Værdier af ϵ_{st} .

Trykkraften P i Pillens Tværsnit F er ikke jævnt fordelt; Spændingen er forskellig i Sten og Stødfuge, fordi E er forskellig, og desuden kan Spændingen variere indenfor Stentværsnittet og indenfor Stødfugetværsnittet, bl. a. fordi Mørtlen i de vandrette Fuger kan have andre Egenskaber i Pillens Kærnezone end i dens Randzone.

De i Fig. 15—18 tegnede Kurver har den paa Pillens Overflade maalte Værdi af Stenens Sammentrykning ϵ_{st} som Abscisse og Tværsnittets Middelspænding $\sigma = P : F$ som Ordinat. Hvis denne Spænding havde hersket paa Maalestedet, vilde man kun have fundet een Kurve for Molerstenene og een for Flamstenene, men dette er saare langt fra at være Tilfældet, saa Spændingen paa Maalestedet maa kunne afvige stærkt fra Middelspændingen. For at finde Aarsagen vil vi sammenligne Kurvernes Hældning dels indbyrdes, dels med Hældningen af Pillekurverne.

Sammenligner man Stenkurverne indbyrdes, finder man — som rimeligt er — at Kurverne for de haarde Flamsten er stejlere end Kurverne for de bløde Molersten; dette faar man et godt Overblik over ved at danne Middelkurver for vanddrukne og lufttørre Sten (Fig. 19).

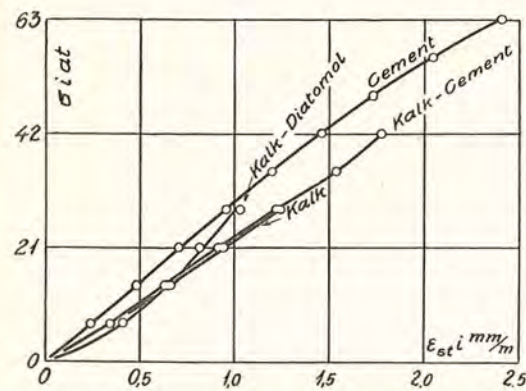


Fig. 15. Sammentrykningsmaalinger paa Molersten henmuret i vanddrukken Tilstand.

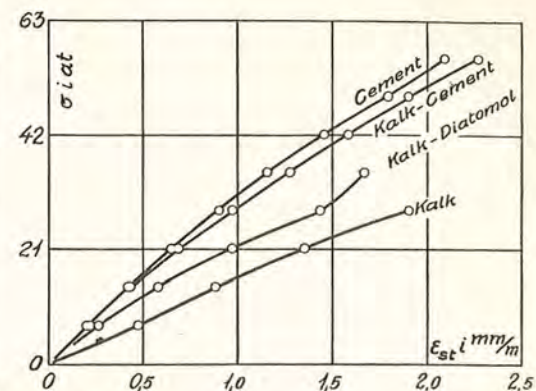


Fig. 16. Sammentrykningsmaalinger paa Molersten henmuret i lufttør Tilstand.

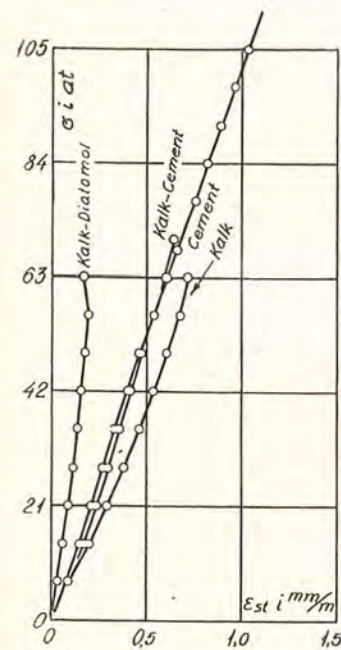


Fig. 17. Sammentrykningsmaalinger paa Flamsten henmuret i vanddrukken Tilstand.

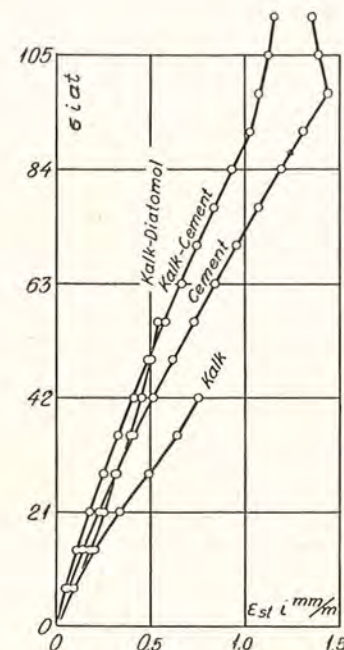


Fig. 18. Sammentrykningsmaalinger paa Flamsten henmuret i lufttør Tilstand.

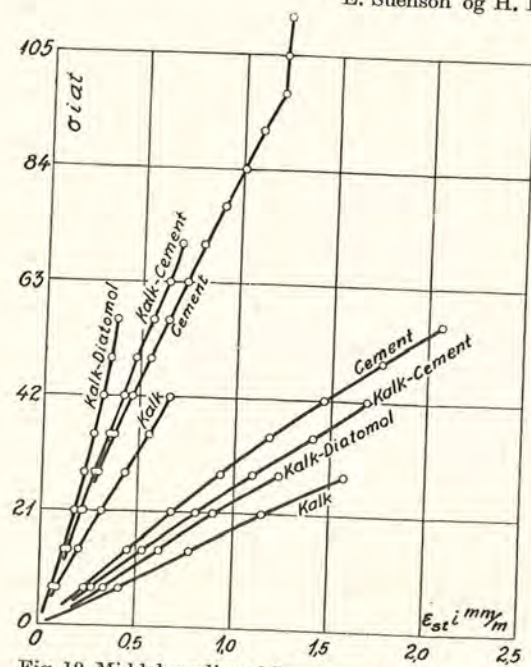


Fig. 19. Middelværdier af Sammentrykninger maalt paa vanddrukne og lufttørre Molersten (den nedre Skare) og Flamsten (den øvre Skare).

Kurvernes Stejlhed ses at vokse i Ordenen:

- Molersten:
- Kalk
 - Kalk-Diatomol
 - Kalk-Cement
 - Cement
- Flamsten:
- Kalk
 - Cement
 - Kalk-Cement
 - Kalk-Diatomol.

At Kalkmørtlen har medført de største Værdier af ϵ_{st} kan forklares ved, at den udelukkende hærder ved Karbonatdannelse og derfor er mindre hærdenet i Pillens Indre end langs dens Overflade, saa Trykkraften fortrinsvis optages af Pillens Randzone — hvor Maaleapparaterne er anbragt — eller i alt Fald er jævner fordelt over Tværsnittet, end naar de øvrige Mørtler anvendes; se desangaaende Bilag 1.

De øvrige Mørtlers Rækkefølge maa være Udtryk for, at Trykkraften i stigende Grad overføres gennem Pillens Kærnezone, hvorom nærmere i Stykke b og c.

Men Hældningen af Kurverne i Fig. 15—18 paavirkes ikke blot af Stenenes og Mørtlens Art, men ogsaa af Stenenes Vaadhed ved Indmuringen og ikke altid paa en umiddelbart forstaaelig Maade, hvorom nærmere i Stykke c.

Paa nogle af de sidste Lasttrin skifter en af Kurverne paa Fig. 16 og tre af Kurverne paa Fig. 18 Krumningsretning, hvilket skyldes, at der paa disse Lasttrin skete Beskadigelser i det over eller under den paa-gældende Sten liggende Skifte, hvorved Stenens Randzone blev aflastet.

Sammenligner man Stenkurvernes Hældning med Pillekurvernes, viser det sig, at Stenkurverne altid er stejlest; kun for lufttørre Molersten i Kalkmørtel er der ingen væsentlig Forskel. Aarsagen til, at Stenkurverne er stejlest, er een af følgende to eller begge i Forening:

(1) Stenene har større E end Mørtlen. Dette maa antages at være Tilfældet for samtlige Piller bortset fra Molerstenspillerne opmuret i Cement og muligvis i Kalk-Cement.

(2) Spændingsfordelingen i Tværsnittet har været af den i Fig. 20 viste Art; den maalte Værdi af ϵ_{st} svarer da til en lavere Stenspænding, end Ordinaten angiver.

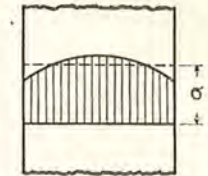


Fig. 20. Spændingsfordelings Art.

Aarsagerne til den ujævne Spændingsfordeling omtales i Stykke b og c.

b. Mulige Aarsager til den ujævne Spændingsfordeling.

Dersom Stenspændingen paa Maalestedet havde været lig med Middelspændingen σ , vilde Stenens Sammentrykning have været $\epsilon'_{st} = \sigma : E_{st}$. Den maalte Værdi ϵ_{st} er en anden paa Grund af den ujævne Spændingsfordeling.

ϵ'_{st} kan beregnes, hvis man kender E_{st} , og Forholdet $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ vil da være Maal for Forholdet mellem Randspændingen og Middelspændingen.

For Molerstenene kan regnes $E = 20\ 000^{at}$ (Bilag 2), der giver $\epsilon'_{st} = \sigma : 20\ 000$, og denne Værdi er indført i Tabel 10. For Flamstenene er E ubekendt, og ϵ'_{st} er derfor udregnet for en valgt Værdi $E = 75\ 000^{at}$, der ganske vist er lavere, end man paa Forhaand vilde skønne, men som fører til en sandsynligere Spændingsfordeling end en højere Værdi.

Tabel 10. Beregnede Værdier af Stenenes Sammentrykning $\epsilon'_{st} = \sigma : E_{st}$.

Spændings Middelværdi σ i at	7	14	21
ϵ'_{st} i mm/m for Molersten med $E = 20\ 000^{at}$	0,35	0,70	1,05
» » » Flamsten » $E = 75\ 000^{at}$	0,093	0,187	0,280

Forholdet mellem de maalte Værdier (Fig. 15—18) og de beregnede i Tabel 10 er indført i Tabel 11. Dette Forholds Afvigelse fra 1,00 er et Maal for Randspændings Afvigelse fra Middelspændingen.

Aarsagerne til den ujævne Spændingsfordeling kan være een eller flere af følgende:

(1) Karbonatdannelsen vil i de 3 kalkholdige Mørtler i overvejende Grad ske i Fugens Randzone, som derved hærder hurtigere end Kærnezonen og faar en større Værdi af E . Naar denne Virkning er eneraadende eller dominerende, bliver Forholdet i Tabel 11 større end 1, men efterhaanden som Lasten stiger, bliver E_{Rand} mindre og $E_{Kærne}$ større, fordi hærdenede Mørtlens Arbejdslinie er nedad hul, medens uhærdenede Mørtlens er opad hul, da der sker en Komprimering, og hvis disse Virkninger ikke ophæves af andre, aftager $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$.

Tabel 11. Forholdet mellem maalte og beregnede Stensammentrykninger $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$.

Mørt- lens Art	Molersten						Flamsten					
	vanddrukne			lufttørre			vanddrukne			lufttørre		
	σ i at			σ i at			σ i at			σ i at		
	7	14	21	7	14	21	7	14	21	7	14	21
K-D	1,18	0,93	0,78 ¹⁾	0,75	0,84	0,92 ²⁾	0,39	0,34	0,32 ³⁾	1,03	0,94	0,91 ¹³⁾
K	1,01	0,95	0,90 ²⁾	1,36	1,26	1,29 ⁶⁾	0,95	1,04	1,04 ¹⁰⁾	1,04	1,07	1,21 ¹⁴⁾
K-C	0,99	0,90	0,88 ³⁾	0,57	0,61	0,66 ⁷⁾	1,10	0,88	0,85 ¹¹⁾	0,51	0,57	0,64 ¹⁵⁾
C	0,69	0,68	0,67 ⁴⁾	0,63	0,61	0,62 ⁸⁾	0,96	0,79	0,75 ¹²⁾	0,68	0,74	0,82 ¹⁶⁾

1) Afskalling iagttaget ved 20,5 at

2) " " " 22 "

3) " " " 34,5 "

4) " " " 45,5 "

5) Skade " " 22,5 "

6) Revne " " 27,5 "

7) Skade " " 45 "

8) " " " 54 "

9) Skade iagttaget ved 38,5 at

10) " " " 45 "

11) Revne " " 70 "

12) Skade " " 105 "

13) Revne " " 52,5 "

14) Skade " " 44 "

15) " " " 96,5 "

16) " " " 90,5 "

De øvrige, nedenfor nævnte Aarsager til ujævn Spændingsfordeling vil i Modsætning til Karbonatdannelsen alle aflaste Randzonen.

(2) Forholdene under Pillernes Opmuring (se Stykke D) kan medføre, at Mørtlen i de vandrette Fugers Kærnezone bliver kompaktere d. v. s. faar større E end Mørtlen i Randzonen, hvorved Maalestederne aflastes. Forholdet mellem Kærnezonen og Randzonens Trykspænding maa aftage med voksende Last, navnlig naar Mørtlen let sammentrykkes.

(3) Efter Opmuringen vil Pillerne svinde som Følge af Vandets Fordampning. Overfladen vil svinde hurtigere end Kærnen og Fugerne mere end Stenene. Desuden vil der under de hydrauliske Mørtlers Hærdning i den vaade Kærne ske en Svulmning, som ikke helt ophæves af det senere Svind. Saavel Svind som Svulmning vil give lodrette Egenspændinger, Tryk i Kærnezonen og Træk i Randzonen.

(4) Naar E_{st} er meget mindre end E_{fu} , vil Trykoverføringen i ikke uvæsentlig Grad ske gennem Stødfugerne og navnlig gennem den lodrette, gennemgaaende Mørtelsøjle i Pillens Akse, hvorved Maalestederne nær Pillens Hjørner aflastes. Virkningen maa antages at vokse med Forholdet $E_{fu} : E_{st}$ og at aftage med voksende Last.

(5) Adhæsionen mellem Sten og Mørtel har været forskellig i de forskellige Piller, og de to Materialer har derfor paavirket hinandens Tværuddvidelse i forskellig Grad. Hvis Mørtlen frit kan glide ud i radiær Retning, vil den strækkes i tangentiell Retning, hvorved den faar en mindre Tykkelse udefter, saa Randzonen daarligere kan overføre det lodrette Tryk; dette fører dels til, at $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ bliver mindre, end naar Adhæsionen er god, dels til at $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ aftager med voksende Last (se Bilag 2).

(6) Naar Spændingerne i Pillen nærmer sig Brud, vil Fugemørtlen ved Pillens Overflade kunne knuses tidligere end den bagved liggende Mørtel, fordi den frit kan undvige udefter, og dette medfører en Aflastning af Randzonen. Denne Virkning maa kunne spores desto tidligere, jo svagere Mørtlen er, og den maa vokse, efterhaanden som Knusningszonen vandrer indefter; se desangaaende Bilag 1.

c. Sandsynlige Aarsager til den ujævne Spændingsfordeling.

Spændingsforholdene i Piletværsnittet afhænger af saa mange Faktorer, at det er ugørligt at udrede hver enkelt Faktors Andel; dertil vilde kræves talrige supplerende Forsøg. Man maa være tilfreds, hvis man kan opstille en fornuftig Begrundelse af, at de maalte Værdier af ϵ_{st} ikke er ens, og at de varierer, som de gør. Selv dette er kun delvis muligt, og det skyldes maaske i nogen Grad manglende Fantasi hos Bearbejderne, men man maa ogsaa regne med, at Maalingerne kan være behæftet med Fejl. Man maa erindre, at Maalelængden kun var 2^{cm}, at der arbejdedes med Maaleapparater, der forstørrede ca. 1000 Gange, at Mursten er en variabel Vare, hvilket i udpræget Grad gjaldt Flamstenene, samt at der ved Opmuringsarbejdet let kan indføres Forskelle. For at neutralisere disse Fejlkilder blev ϵ_{st} imidlertid maalt paa 4 Sten i hver Pille, og Enkeltværdierne stemte i tilfredsstillende Grad overens.

Spændingsforholdene skal først søges udredt for Molerstenene, for hvilke de udregnede Værdier ϵ'_{st} maa være meget nær rigtige, selv om der ikke er taget Hensyn til Elasticitetstallets Variation med Spændingen og med Stenenes Fugtighedsgrad; denne laa ved Hovedforsøgene mellem 3,22 og 5,40 %, og i Henhold til de i Bilag 2 omtalte Forsøg har den ringe Indflydelse paa E .

1. Lufttørre Molersten.

For **Kalkmørtlen** er $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ større end 1, altsaa Spændingen i Randzonen større end Middelspændingen, fordi denne Mørtel hærdner fra Overfladen; for alle de andre Mørtler er $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ mindre end 1. Med stigende Last bliver Spændingsfordelingen jævner (jfr. Side 31 nederst).

For **Kalk-Diatomol-Mørtlen** er $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ mindre end 1, altsaa Spændingen i Randzonen mindre end Middelspændingen. Denne Mørtel maa ligesom Kalkmørtlen antages i væsentlig Grad at hærdne ved Karbonatdannelse, men den afviger fra Kalkmørtlen ved, at Kærnezonen i nogen Grad hærdner hydraulisk samt ved at indeholde langt mere fint Stof (se Stykke C). Derfor vil Forholdet mellem Randzonens og Kærnezonen Tykkelses-Svind være større end hos Kalkmørtlen, og Forskellen er saa stor, at Spændingen i Kalk-Diatomol-Pillernes Randzone bliver mindre end $P : F$. Spændingsfordelingen er dog jævner end for Cement- og Kalk-Ce-

ment-Pillerne; hertil har Kalk-Diatomol-Mørtlens gunstigere Forhold under Opmuringen (jfr. S. 32 (2)) sikkert bidraget. Med stigende Last bliver Spændingsfordelingen i Kalk-Diatomol-Pillerne jævner, thi efterhaanden som Kærnezonen Mørtel sammentrykkes, forringes Betydningen af, at Mørtelfugens Randzone er blevet tyndere ved Svind.

Cement- og Kalk-Cement-Mørtlen har i langt højere Grad end Kalk-Diatomol-Mørtlen koncentreret Spændingerne i Kærnen, hvilket maa antages fortrinsvis at skyldes de stive Stødfuger (jfr. S. 32 (4)), men muligvis har ogsaa Forholdene under Opmuringen bidraget (jfr. S. 32 (2)). For Kalk-Cement-Mørtlen sker der en Udjævning, efterhaanden som Spændingen stiger til 21st, ikke for den stivere Cementmørtel.

2. Vanddrukne Molersten.

$\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ aftager hos samtlige Piller med voksende Last. Denne koncentrerer altsaa mere og mere i Kærnen i Modsætning til Forholdet hos lufttørre Sten. Forskellen skyldes utvivlsomt de vanddrukne Stens ringe Sugning og dermed følgende ringe Adhæsion; Randzonens Mørtel kan da friere bevæge sig i radiær Retning (jfr. S. 32 (5)). Kun for den stærkt adhærerende Cementmørtel er Stenenes Tørhed uden Betydning for Spændingsfordelingens Ændring med voksende Last.

De absolutte Værdier af $\epsilon_{st} : \epsilon'_{st}$ er — bortset fra Kalkmørtel — større for vanddrukne end for lufttørre Sten. For Kalk-Diatomol-Mørtlens Vedkommende er Forholdet søgt udredet nedenfor. For Pillerne med de to stiveste Mørtler maa Aarsagen søges i, at Mørtlen ved Opmuringen lod sig fordele jævnest, naar Stenene var vanddrukne; var de lufttørre, gled Mørtlen vanskeligt ud til Siderne og blev derfor mest komprimeret i Kærnezonen (se Stykke D).

Iøvrigt kan følgende bemærkes vedrørende de fire Mørtlers Forhold:

Kalkmørtlens Hærdning i Randzonen er mindre dominerende, formentlig fordi Mørtlens Porer længe har holdt sig vandfyldte, saa Kulsyren i Begyndelsen kun har kunnet paavirke Overfladen og her har dannet en Karbonathinde, der har sinket Kulsyre's Indtrængen. Denne Mørtel har derfor ligesom ved de i Bilag I omtalte Forsøg medført den jævnest Spændingsfordeling.

Kalk-Diatomol-Mørtlen har paa 1. Spændingstrin medført Spændingskoncentration i Randzonen, men med stigende Last ændres Forholdet hurtigt til Spændingskoncentration i Kærnen. Denne Mørtel holder stærkt paa Vandet og har til at begynde med næppe afgivet noget til de vaade Sten. Vandet i Mørtlen har da kun kunnet fordampe gennem Fugen, og dette er sket langsomt (jfr. Tabel 4, der viser, at Mørtlen ved Prøvningen indeholdt dobbelt saa meget Vand som Mørtlen i Pillerne med lufttørre

Sten), dels paa Grund af Mørtlens Tæthed, dels paa Grund af, at der paa Fugens frie Overflade dannes en Karbonatskorpe. Fugen tørrer derfor langsommere end Stenene, og dens Kærnezone afgiver efter nogen Tids Forløb Vand til disse. Kærnezonen Mørtel vil paa dette Tidspunkt svinde i Tykkelse i Forhold til Randzonens. Kærnezonen Mørtel vil tilige have mindre E end Randzonens paa Grund af den mindre Kulsyretilførsel. Begge disse Forhold har medført Spændingskoncentration i Randzonen ved Forsøgets Begyndelse, men Randzonens Mørtel bliver hurtigt overbelastet, hvorefter den knuste, adhæsionsløse Mørtels udadgaende Bevægelse har medført Spændingskoncentration i Kærnezonen.

Cementmørtlen har givet en lidt jævner Spændingsfordeling mellem vaade Sten end mellem tørre paa Grund af de gunstigere Opmuringsforhold. Spændingsfordelingen ændres kun lidet, naar Lasten stiger, hvilket skyldes Mørtlens Stivhed og store Adhæsion.

Kalk-Cement-Mørtlen har givet en langt jævner Spændingsfordeling mellem vaade Sten end mellem tørre, dels paa Grund af de gunstigere Opmuringsforhold, dels paa Grund af Karbonatdannelse i Randzonen. Den samlede Virkning er blevet en næsten lige saa jævn Spændingsfordeling som for Kalkmørtlens Vedkommende. At der i disse Piller fandtes Lunger af den i Fig. 24 viste Art har ogsaa bidraget til, at Stenspændingen paa Maalestederne er større end i de tørt opmurede Molerstenspiller med Cement- og Kalk-Cement-Mørtel.

3. Flamsten.

For Flamstenspillernes Vedkommende er Værdierne i Tabel 11 udregnet med en valgt Værdi af E , og deres absolutte Størrelse er derfor upaalidelig, men ogsaa her har Kalkmørtlen givet de højeste Værdier. Ligesom for Molerstenene gælder, at med stigende Last vokser Forholdet som Regel for lufttørre Sten og aftager som Regel for vanddrukne Sten. Ikke alle Værdier synes forklarlige, saaledes ikke de lave Værdier for vanddrukne Sten i Kalk-Diatomol-Mørtel. At Cementmørtlen giver en jævner Spændingsfordeling sammen med Flamsten end sammen med Molersten skyldes formentlig, at Forskellen mellem Stødfugernes og Stenenes E er mindst i første Tilfælde.

K. PILLERNE'S BRUDMAADE

Under Belastningen holdtes Pillernes Overflade under stadig Observation, og alle Iagttagelser blev noteret. Paa de første Lasttrin hørtes ofte en Knitren, tydeligst i Piller opmuret i Cement- eller Kalk-Cement-Mørtel. Senere — ved 20 til 113st d. v. s. ved 54 til 91 % af Brudspændingen, gennemsnitlig ved 70 % af denne — forekom synlige Tegn paa

Beskadigelse, der varslede det kommende Brud. Procenttallet var ofte væsentligt lavere for vanddrukne Sten end for lufttørre, formentlig som Følge af Adhæsionens Forskellighed. Disse Forvarslers Art var een eller flere af de nedenfor med *a*, *r* eller *k* betegnede. Hyppigst optraadte *a* først og *k* sidst, men iøvrigt fremgaar Rækkefølgen af Tabel 12. Hvis to Skader er opdaget samtidigt, er den mest fremtrædende anført først.

- a*: Afskallinger paa Murstenene langs disses Over- og Underkant.
r: Lodrette Revner i Murstenene, oftest midt paa Løbersiden.
k: Knusning af Fugemørtlen, fra hvilken det da dryssede.

Tabel 12. Rækkefølgen ved Fremkomsten af Beskadigelser før det egentlige Brud.

Mørtlens Art	Skade Nr.	Molersten				Flamsten			
		vanddrukne		lufttørre		vanddrukne		lufttørre	
K-D	1	<i>a</i>	<i>k, a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>k, r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>
	2	<i>k</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>a</i>	
	3	<i>r</i>		<i>k</i>	<i>k</i>		<i>a</i>	<i>k</i>	
K	1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>a, k</i>	<i>r, a, k</i>	
	2	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>k</i>		<i>a</i>	<i>r</i>		
	3	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>a</i>		<i>k</i>			
K-C	1	<i>a, k</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>a</i>
	2	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>k, a</i>		<i>r</i>	<i>r</i>
	3		<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>			<i>k</i>	<i>k</i>
C	1	<i>a</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>a</i>
	2	<i>r</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>r</i>	<i>r</i>			<i>r</i>
	3	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>k</i>	<i>a</i>			<i>k</i>

Naar Stenene er svage, er første synlige Beskadigelse oftest en Afskalling paa Murstenenes Over- og Underkant (*a*). Naar Stenene er stærke, er første synlige Beskadigelse oftest lodrette Revner i Murstenene (*r*).

Forud for det egentlige Brud dannedes der i samtlige Piller en lodret Revne i et af Pillens lodrette Midterplaner. Skønt denne Revne formentlig undertiden først har dannet sig i en Stødfuge, iagttoges den altid først i en Sten. Efter denne Revnes Dannelse skred Ødelæggelsen hurtigt frem, idet Revnen forlængede sig ind i Naboskifterne, og paa de sidste Lasttrin forud for Brud fik samtlige Piller ogsaa lodrette Revner udenfor Linierne gennem Stødfugerne. Fig. 21, der stammer fra en Forsøgsrække med andre Materialer, viser en Pilles Udseende efter Brud.

Tidspunktet for Fremkomsten af 1. lodrette Revne i Stenene fremgaar af Tabel 13. Revnen ses at opstaa, naar Lasten er godt $\frac{3}{4}$ af Brudlasten. Revnespændingens absolutte Værdi varierede fra 20 til 132^{at}.

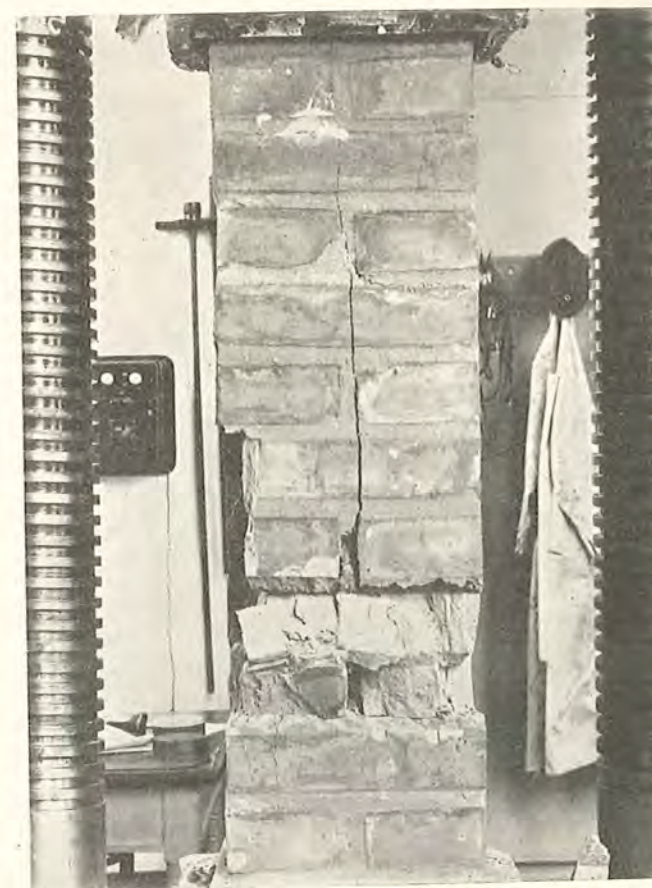


Fig. 21. Knust Pille af gule Facadesten i Cementmørtel 1:4. Bruddet indledtes med Dannelsen af den lodrette Midterrevne.

Tabel 13. Forholdet mellem Pillernes Revnespænding og Brudspænding.

Mørtlens Art	Molersten			Flamsten		
	vand- drukne	lufttørre	Middel	vand- drukne	lufttørre	Middel
Kalk-Diatomol ...	0,77	0,70	0,74	0,61	0,77	0,69
Kalk	0,84	0,86	0,85	0,66	0,91	0,79
Kalk-Cement.....	0,80	0,78	0,79	0,76	0,79	0,78
Cement.....	0,93	0,87	0,90	0,77	0,67	0,72
Middel...	0,83	0,80	0,82	0,70	0,79	0,75

Aarsagerne til den lodrette Revnes Dannelse kan være een eller flere af følgende:

(1) Pillens lodrette Trykspændinger er større i Kærnezonen end i Randzonen, hvilket medfører vandrette Trækspændinger, der er størst i Pillens lodrette Midterplaner.

(2) De lodrette Mørtelfuger kan være saa stive i Forhold til Stenene, at det lodrette Tryks Overførsel i væsentlig Grad sker gennem disse Fuger (Fig. 22). I Stenen opstaar derved en vandret Trækkraft svarende til den under (1) nævnte.

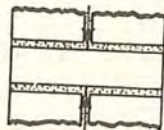


Fig. 22.
Sten mellem stive
Stødfuger.

(3) De vandrette Mørtelfugers Tværudvidelse kan være større end Stenenes, hvilket kan medføre, at Stenene rives over.

(4) En Lunke i den vandrette Fuge midt under en Løber kan medføre, at denne knækker ved Bøjning.

Ad (1): Disse vandrette Trækspændinger er nærmere omtalt i *E. Suenson*: Natursten 1942, § 77-79. De er den mest almindelige Aarsag til Midterrevnens Dannelse. Ogsaa ved Forsøgene i Bilag I var de Aarsag til Revnerne.

Ad (2): Disse Forhold forstaar man hurtigst ved at tænke sig samtlige Sten fjernet fra Pillen; man beholder da tilbage et Mørtelskelet bestaaende af vandrette Plader forbundet med lodrette Midtervægge (se Fig. 24), der skiftevis ligger i det ene og det andet af Pillens Midterplaner. Midt i dette Mørtelskelet findes en gennemgaaende lodret Mørtelsøjle, der — naar Mørtlen er stivere end Stenene — er mindre sammentrykkelig end Pil-



Fig. 23. Midte af Molersten i Pille opmuret i Cementmørtel. Som Følge af Trykket fra Stødfugerne er Stenen revnet og afskallet. Pille var opmuret af lufttørre Sten.

len iøvrigt, saaledes at der maa ske Knusninger i »Væggenes« Krydsningspunkter, førend Trykket kan blive nogenlunde jævnt fordelt over Pillen. Denne Knusning vil ledsages af en Tværudvidelse, der vil have en lignende Virkning som (3). Naar disse Knusninger er sket, vil Pillens to lodrette Midterplaner — Vægplanerne — være mindre sammentrykkelige end Pillen iøvrigt, og Stenene vil derfor blive paavirket, som om de befandt sig mellem to Knivsægge (Fig. 22), hvorved de revner i Forlængelse af Stødfugerne, og muligvis sker der samtidig Afsprængninger (Fig. 23).

Først efter at denne Revnedannelse har fundet Sted, kan Trykkraften i Pillen fordele sig jævnt over hele Tværsnittet, og naar dette er sket, vil Spændingerne vokse, indtil Stenenes Trykstyrke er naaet.

Ad (3): Disse Forhold har næppe været til Stede i Piller af Molersten opmuret i de to stærkeste Mørtler, men i de øvrige Piller kan de have forøget Trækspændingerne. Den blødere Mørtel over og under Stenens søger at presse sig ud af Fugen og frembringer derved en Friktionskraft, der naar sin Maksimalværdi i det lodrette Midterplan og faar Pillen til at revne her. Naar den 1. korte Revne er fremkommet, er Modstanden mod Mørtlens udadgaaende Bevægelse forringet; de nærmeste gennemgaaende Sten revner kort efter, og Ødelæggelsen skrider hurtigt frem.



Fig. 24. Midterskifterne i en Pille af vanddrukte Molersten i Kalk-Cement-Mørtel. Efter Brud kunde Pille adskilles som vist. I Liggefugens Overside ses Lunke, og de mørke Pletter paa Undersiden af de overliggende Sten er Omraader, fra hvilke Mørtlen er sunket ned.

Ad (4): Slige Lunker fandtes i 3 Piller opmuret af vanddrukne Molersten, de to i Kalk-Cement-Mørtel, den tredje i Kalkmørtel. I alle 3 Tilfælde var Forholdene som vist i Fig. 24. Ved Pillernes Opmuring var Mørtlen tilbøjelig til at løbe ud af de lodrette Fuger, og til Trods for, at man ved lodrette, opadgaaende Strøg med Murskeen søgte at holde Fugerne fyldte, lykkedes det kun i Pillens Overflade; dybere inde blev der Lunker, som Fig. 24 viser. Fra samme Pille stammer Fig. 25, der viser et tilsvarende Sted paa Pillens Overflade, hvor man ved Forsøgets Slutning kunde stikke en Kniv ind mellem Stenen og den underliggende Stødfuge. I Undersiden af Sten, der har ligget over slige Hulheder, har der været Bøjningstrækspændinger.

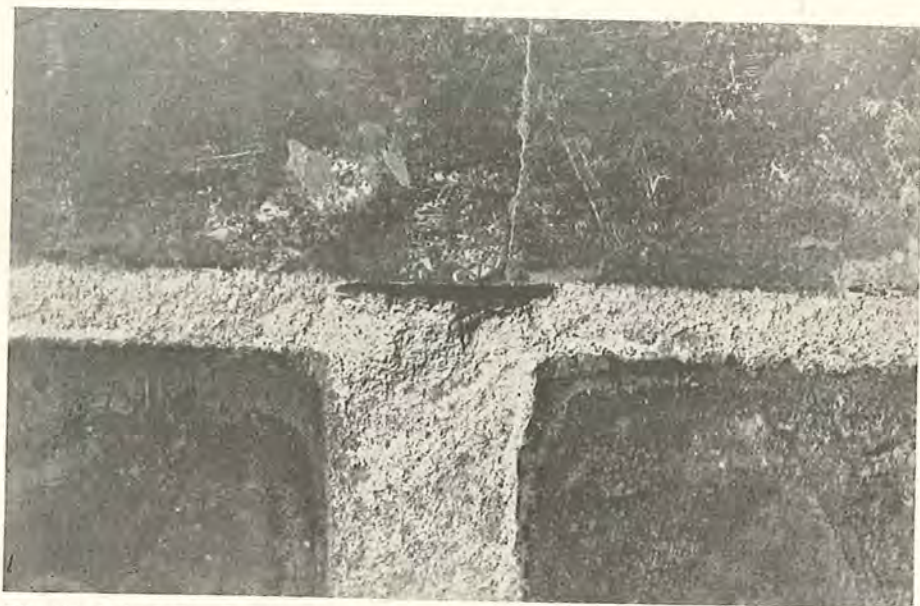


Fig. 25. Del af Overfladen af den i Fig. 24 viste Pille før Brud. Den tynde Mørtelskal foran en Lunke er knust og Hulheden bagved afsløret.

L. PILLERNES TRYKSTYRKE

a. Virkningen af Stenenes Vaadhed ved Henmuringen.

Pillernes Trykstyrke i en Alder af 9 Maaneder fremgaar af Tabel 14 og Fig. 26. I Tabellens Rubrikker er Styrken af den svageste af de to ens Piller altid stillet øverst. Dannes Middeltal for Piller af vanddrukne og af lufttørre Sten, kommer man til Værdierne i Tabel 16. Tallene viser, at Pillestyrken altid er mindre end Stenstyrken.

Pillestyrken paavirkes ikke paa ensartet Maade af Stenenes Vaadhed ved Henmuringen. Efter Fig. 26 at dømme skal Kalkmørtel og Cement-

Tabel 14. Pillernes Trykstyrke i at.

Mørtlens Art	Molerstenspiller		Flamstenspiller	
	vanddrukne	lufttørre	vanddrukne	lufttørre
Kalk-Diatomol . . .	34,5 } 36,6 38,7	35,7 } 37,4 39,0	62,3 } 62,7 63,0	59,2 } 67,9 76,6
Kalk	35,0 } 37,2 39,3	31,1 } 32,0 32,9	66,2 } 69,6 72,9	48,1 } 52,2 56,3
Kalk-Cement	42,0 } 48,3 54,6	56,9 } 59,4 61,8	72,9 } 92,5 112	119 } 123 126
Cement	67,4 } 71,7 76,0	63,0 } 66,6 70,2	154 } 172 189	112 } 147 182

mørtel helst bruges i Forbindelse med vaa-de Sten, og Kalk-Cement-Mørtel helst i Forbindelse med tørre Sten, medens Kalk-Diatomol-Mørtlen holder saa stærkt paa Vandet, at Stenenes Tørhedsgrad bliver af underordnet Betydning.

At Kalk-Cement-Mørtlen giver størst Styrke i Forbindelse med tørre Sten — ligesom den giver størst E_m (Tabel 8) — er ejendommeligt, men bekræftedes i nogen Grad ved et Kontrollforsøg med 20 maskinstrøgne gule Facadesten, der halveredes og sammenmuredes til Tærninger med enten Ce-

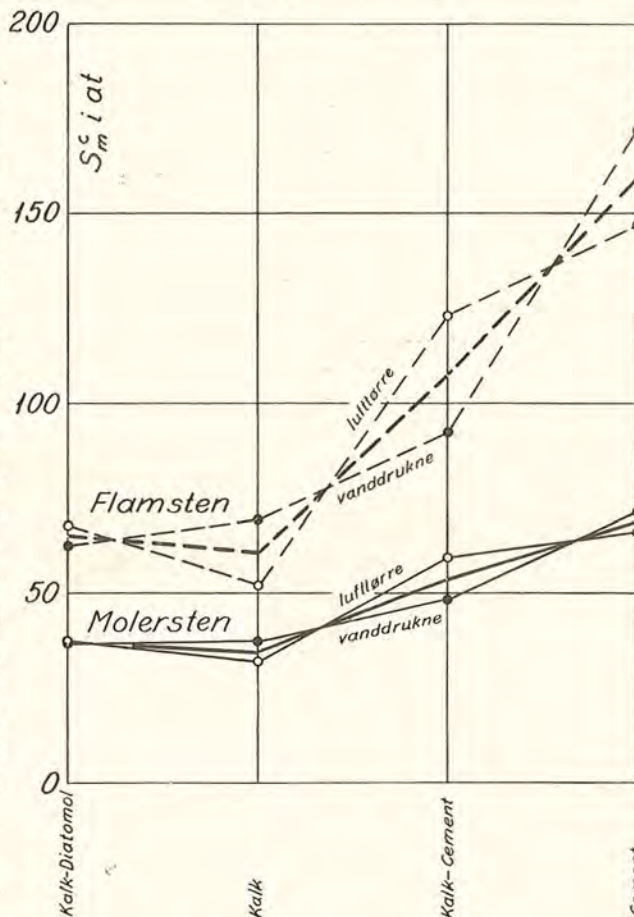


Fig. 26. Pillernes Trykstyrke.

ment- eller Kalk-Cement-Mørtel, hvorefter Trykfladerne jævnedes med Cementmørtel 1:1. Disse Tærningers Styrke er indført i Tabel 15, der viser, at Kalk-Cement-Mørtlen — i Modsætning til Cementmørtlen — ikke har givet større Styrke mellem vaade Sten end mellem tørre. De vaade Sten var dog ikke vanddrukne, de indeholdt 14 Vægtprocent Vand, medens Stenene til Pillerne indeholdt 18.

Tabel 15. Halvstenstærningers Trykstyrke efter 3 Mdr.s Luftlagring.

Mørtlens Art	Stenenes Tilstand ved Sammenmuringen	
	lufttørre	vaade
Kalk-Cement	205 ^{at}	203 ^{at}
Cement	347 *	391 *

De følgende Undersøgelser over Stenstyrkens og Mørtelstyrkens Indflydelse paa Pillestyrken er kun undtagelsesvis gennemført for vanddrukne Sten for sig og lufttørre Sten for sig; som Regel er der regnet med Pillernes Middelstyrke, som maa antages at ligge Pillernes Styrke i Praksis nærmere.

Tabel 16. Pillernes Middeltrykstyrke.

Mørtel	Molersten	Flamsten
Kalk-Diatomol.	37,0 ^{at} (100)	65,3 ^{at} (176)
Kalk	34,6* (100)	60,9* (176)
Kalk-Cement	53,8* (100)	107,7* (200)
Cement	69,1* (100)	159,5* (231)

b. Stenstyrkens Indflydelse.

Stenstyrkens Indflydelse paa Pillernes Styrke er fremstillet i Fig. 27; Stenstyrken er bestemt med sammenmurede Halvstenstærninger tørret ved 60° som beskrevet Side 10.

Figuren viser, at Murværkets Styrke vokser med Stenstyrken, men langsommere end denne. Skønt Flamstenene er henimod 4 Gange saa stærke som Molerstenene, er Pillestyrkernes Forhold kun ca. 2; det vokser fra 1,76 til 2,31, naar man gaar fra den svageste Mørtel til den stærkeste. Det maa dog bemærkes, at medens de anvendte Molerstens Trykstyrke kun varierede fra 92 til 138^{at}, varierede Flamstenenes fra 157 til 823^{at}, og da der næppe kan være Tvivl om, at en Murværkspilles Styrke i højere Grad afhænger af dens svageste Sten end af dens stærkeste, er det sandsynligt, at man ved Brug af mere ensartede Flamsten havde fundet Kurverne i Fig. 27 stejle.

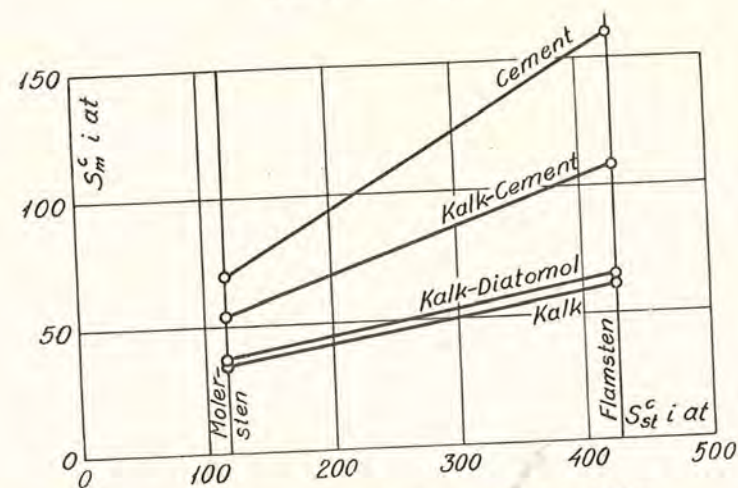


Fig. 27. Pillestyrkens Variation med Stenstyrken.

Som nævnt Side 36 fremkommer der lodrette Revner i Stenene, før Pillernes Brudlast naaes. Revnerne skyldes Stenenes vandrette Forlængelse, der er en Sum af (1) den Tværuddvidelse, som alle trykkede Prismen faar, selvom de er homogene, og selvom Lasten er jævnt fordelt over Tværsnittet, og (2) den Tværuddvidelse, som skyldes de vandrette Trækspændinger, der opstaar efterhaanden som Mørtlen presses ud, og efterhaanden som $\sigma_{\text{Kærne}} : \sigma_{\text{Rand}}$ vokser.

Det hævdes undertiden, at en Pilles Trykstyrke er bestemt af Stenenes Trækstyrke, og derfor er uafhængig af Slankheden, hvis der ikke er Fare for Udbøjning¹⁾, og at Stenene af den Grund bør bedømmes ved deres Træk- eller Bøjningsstyrke og ikke ved deres Trykstyrke. At Træk- eller Bøjningsstyrken bør bestemmes er rigtigt, eftersom en Pilles Revnelast kan sidestilles med en Metalstangs Flydelast, men Trækstyrken bestemmer ikke Brudlasten, thi Forholdet mellem denne og Revnelasten er ikke konstant (se Tabel 13).

Da Forholdet mellem Bøjnings- og Trykstyrke var ens for Molersten og Flamsten (se Side 12), kan man af de foreliggende Forsøg ikke udlede, om Stenenes Træk- eller Trykstyrke er den bedste Maalestok for Murværksstyrken.

Pillestyrkens Afhængighed af Stenstyrken er ogsaa vist paa Fig. 28. Man ser, at Forholdet mellem Pillestyrke og Stenstyrke ligger mellem 0,27 og 0,62 for Molerstenene og mellem 0,12 og 0,40 for Flamstenene. Var Stenstyrken ikke blevet bestemt med sammenmurede Halvsten, men med udborede Cylindre, vilde Molerstenenes Overlegenhed have vist sig endnu større.

¹⁾ Nils Hast: Measuring Stresses and Deformations in solid Materials, Stockholm 1943.

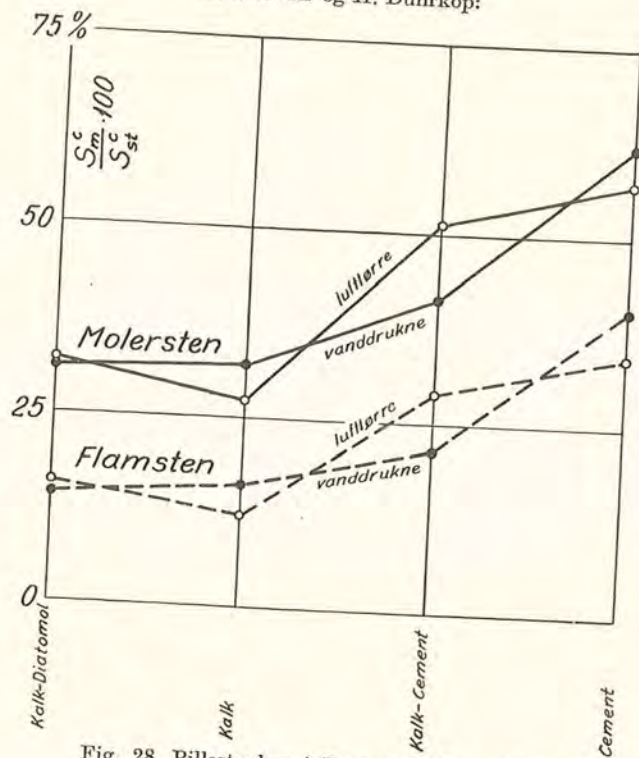


Fig. 28. Pillestyrken i Procent af Stenstyrken.

Naar Mørtlen er givet, kan Pillestyrkens Afhængighed af Stenstyrken udtrykkes ved:

$$S_m^c = K_1 \cdot \frac{S_{st}^c - 0,15 \cdot (\text{maks } S_{st}^c - \text{min } S_{st}^c)}{9,71 + \sqrt{S_{st}^c}} \left\{ \begin{array}{l} K_1 = 5,85 \text{ for Kalk-Diatomol} \\ - = 6,54 - \text{ Kalk} \\ - = 9,42 - \text{ Kalk-Cement} \\ - = 14,47 - \text{ Cement.} \end{array} \right.$$

Se iøvrigt Side 46 Stykke d.

c. Mørtelstyrkens Indflydelse.

Mørtlens Styrke bestemtes, som omtalt i Stykke C, med $2 \cdot 2 \cdot 12 \text{ cm}$ Stænger fremstillet samtidig med Pillerne og behandlet saaledes, at de kom under nogenlunde samme Forhold som Fugemørtel mellem sugende Sten.

Fig. 29 viser Pille-Trykstyrkens Afhængighed af de paa denne Maade fundne Mørteltrykstyrker.

Figuren viser, at Pillestyrken vokser med Mørtelstyrken, men meget langsommere end denne. Skønt Cementmørtlens Trykstyrke er ca. 24 Gange saa stor som Kalkmørtlens (Tabel 2), er Cementmørtel-Pillernes Styrke kun 2—2,6 Gange saa stor som Kalkmørtel-Pillernes (Tabel 16).

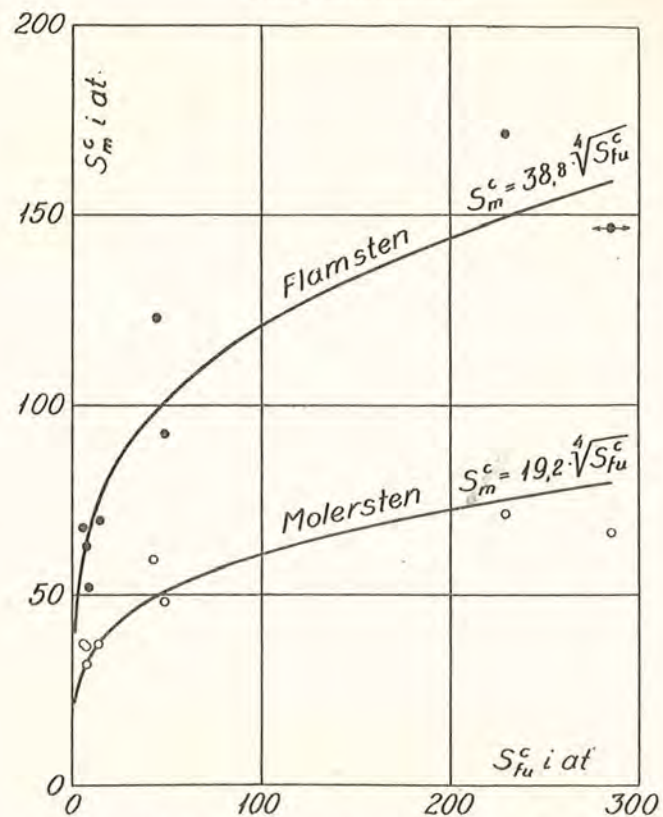


Fig. 29. Pillestyrkens Afhængighed af Fugemørtlens Trykstyrke bestemt med afsugede Mørtelstænger.

Det af *Kreüger*¹⁾, *Davey*²⁾ og andre fundne Resultat, at Murværksstyrkens Vækst med Mørtelstyrken standser, naar denne har naaet 60—70^{at}, synes at passe for de svage Molersten, men ikke for de stærke Flamsten. Hvis en saadan Grænseværdi eksisterer, maa man antage, at den vokser med Stenstyrken.

Forbindelsen mellem Pillernes Trykstyrke S_m^c og Mørtlens Trykstyrke S_{fu}^c kan, naar Piller af vanddrukne og lufttørre Sten tages under et, udtrykkes ved:

$$S_m^c = K_2 \cdot \sqrt[4]{S_{fu}^c} \left\{ \begin{array}{l} K_2 = 19,2 \text{ for Molersten} \\ - = 38,8 - \text{ Flamsten.} \end{array} \right.$$

De tilsvarende Kurver er indtegnet i Fig. 29 og viser sig at passe med god Tilnærmelse for Flamstenspillerne, medens de for Molerstenspiller med stærk Mørtel giver lidt for høje Værdier.

¹⁾ H. *Kreüger*: Om Murbruk och Tegelmurverk. Stockholm 1916.

²⁾ N. *Davey*: Strength of brickwork in relation to that of brick and mortar. International Association for Testing Materials, London Congress 1937.

Molerstenspillernes Trykstyrke udtrykkes bedre ved Ligningen:

$$S_m^c = 26,3 \cdot \sqrt[6]{S_{fu}^c}$$

Den tilsvarende Kurve er vist paa Fig. 30. I det følgende er der dog ikke regnet med denne Kurve, men med den paa Fig. 29 viste.

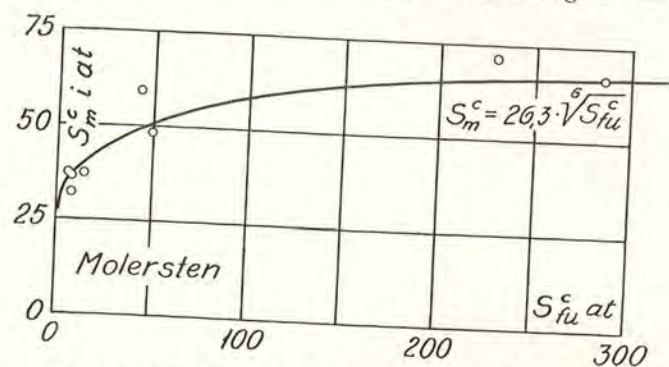


Fig. 30. Molerstenspillernes Trykstyrkes Afhængighed af Fugemørtlens Trykstyrke bestemt med afsugede Mørtelstænger.

Pillestyrken kan ogsaa udtrykkes ved Mørtlens Bøjningsstyrke, nemlig ved:

$$S_m^c = K_3 \cdot \sqrt[3]{S_{fu}^b} \quad \left\{ \begin{array}{l} K_3 = 19,2 \text{ for Molersten} \\ \quad = 37,4 \text{ - Flamsten.} \end{array} \right.$$

Denne Formel passer lige saa godt med Forsøgsresultaterne, som den i Fig. 29 fremstillede.

d. Formel for Pillernes Trykstyrke.

Pillestyrkens Afhængighed af Stenstyrke og Mørtelstyrke kan udtrykkes ved:

$$S_m^c = 3,61 \cdot \sqrt[4]{S_{fu}^c} \cdot \frac{S_{st}^c - 0,15 \cdot (\text{maks } S_{st}^c - \text{min } S_{st}^c)}{9,71 + \sqrt{S_{st}^c}}$$

Denne Formel kan bruges for saavel Molersten som Flamsten og for saavel vanddrukne som lufttørre Sten med en Usikkerhed af $\pm 20\%$.

Det maa erindres, at Forsøgene er udført med 1-Stens Piller. Saadanne er formentlig som Regel stærkere pr. cm^2 end sværere Piller som Følge af bedre Forbandt og hurtigere Hærdning, men saafremt de i Pillen indgaende Sten har en meget variabel Styrke, er det tænkeligt, at Forholdet kan blive omvendt, da Sandsynligheden for, at der kommer lutter svage Sten i samme Skifte, er mindst, naar Pillen er svær.

De fundne Pillestyrker er i Tabel 17 sammenstillet med de Styrker, man regner sig til af ovenstaaende Formel samt af *Kreügers*, *Voellmys* og *Drögslers* Formler.

Kreügers Formel¹⁾ lyder:

$$S_m = S_{st} \cdot \frac{6 + \frac{1}{10} S_{fu}}{12 + 5 \frac{h}{b}}$$

hvor h og b er Pillens Højde og mindste Sidelinie.

Konstanterne i Nævneren varierer med Stenstørrelsen og vokser, naar denne aftager; Værdierne 12 og 5 gælder for det svenske Normalformat $25 \cdot 12 \cdot 6,5 \text{ cm}$, ikke for det danske, men der er alligevel regnet med dem i Tabel 17.

S_{st} bestemtes med Tærninger af sammenmurede Halvsten; de lagredes 3 Døgn i fugtig Luft og 3 Døgn i Ovn, hvor Temperaturen holdtes paa 60° i 8 Timer pr. Døgn.

S_{fu} bestemtes med 7 cm Tærninger fremstillet af Muremørtlen og komprimeret enten ved 50 Slag i Böhmes Hammerapparat eller med Haanden, dersom Mørtlen var for vaad til at maskinstampes. Tærningerne fremstilledes og prøvedes paa samme Dage som Pillerne; de lagredes 6 Døgn i fugtig Luft og derefter i Stueluft, og de blev i indtil 3 Maaneder dypet i Vand i 4 Minutter hver 14. Dag. Saafremt $S_{fu} > 60 \text{ at}$, skal $S_{fu} = 60 \text{ at}$ indføres.

Voellmys Formel²⁾ lyder:

$$S_m = \frac{S_{st}}{2} - \frac{180}{\sqrt{S_{st}}} \cdot \left[\frac{\text{maks } S_{st}}{\text{min } S_{st}} + \left(\frac{S_{st} - S_{fu}}{100} \right)^2 \right]$$

S_{st} bestemtes med Tærninger af sammenmurede Halvsten; Lagringsmaaden er ikke opgivet.

S_{fu} bestemtes med $4 \cdot 4 \cdot 16 \text{ cm}$ Stænger fremstillet af Muremørtlen og komprimeret ved let Stampning. Stængerne fremstilledes og prøvedes paa samme Dage som Pillerne og lagredes som disse. Ved Prøvningen bestemtes først Bøjningsstyrken, og derefter bestemtes Tærningstyrken ved at belaste Brudstykkerne gennem kvadratiske Staalplader med 4 cm Sidelinie.

¹⁾ H. Kreüger: Om Murbruk och Tegelmurverk. Stockholm 1916, Side 34.

²⁾ Kort omtalt i: International Association for Testing Materials. London Congress 1937, Side 423.

Drögslers Formel¹⁾ er udregnet paa Grundlag af Forsøg med 3^m høje Murværkspiller med Tværsnit 3 Sten · 1 Sten eller 3 Sten · 1½ Sten udført ved Chalmers Provningsanstalt, Göteborg²⁾. Formlen lyder:

$$S_m = 0,736 \cdot S_{st}^b - \frac{221,5}{S_{fu}} + 28,6$$

hvor S_{st}^b er Stenenes Bøjningsstyrke. Stenstørrelse: 25 · 12 · 6,5^{cm}.

S_{st}^b bestemtes med hele Sten simpelt understøttet langs 2 Tværlinier med 20^{cm} Afstand og belastet med en Linielast midt mellem Understøtningerne.

S_{fu} bestemtes med 7^{cm} Tærninger støbt af Muremørtlen i Forme med sugende Bund og lagret 7 Døgn i fugtig Luft og derefter i Stueluft. Tærningerne afformedes efter 3 Døgn, naar de var af Kalkmørtel, og efter 1 Døgn, naar de var af Kalk-Cement-Mørtel; hvert 14. Døgn dyppedes Tærningerne i Vand i 5 Minutter. Styrken bestemtes samtidig med Pillernes.

Det fremgaar af foranstaaende, at de S_{fu} -Værdier, som de forskellige Forskere indsætter i deres Formler, bestemmes paa forskellige Maader og derfor maa være forskellige for en givet Mørtel. Ved Udregningen af Tallene i Tabel 17 har man været henvist til at indføre de Mørtelstyrker, som er fundet ved de foreliggende Forsøg (Tabel 2), hvilket maa antages at have stillet de 3 ældre Formler i et for ugunstigt Lys i Forhold til den af de foreliggende Forsøg udledte. I alt Fald viser Tabel 17, at de 3 ældre Formler giver Styrketal, der hverken stemmer indbyrdes eller med de af os fundne Pillestyrker.

Tabel 17. Virkelige og beregnede Pillestyrker i at.

	Kalk-Diatomol	Kalk	Kalk-Cement	Cement	
Molersten	Forsøgsværdi	37,0 (100)	34,6 (100)	53,8 (100)	69,1 (100)
	Egen Formel	31,2 (84)	34,9 (101)	50,2 (93)	77,1 (112)
	Kreügers Formel	29,3 (79)	31,0 (90)	46,5 (86)	51,9 (75)
	Voellmys "	13,1 (35)	14,5 (42)	24,8 (46)	-0,8 (-1)
	Drögslers "	6,1 (16)	17,7 (51)	33,4 (62)	37,3 (54)
Flamsten	Forsøgsværdi	65,3 (100)	60,9 (100)	107,7 (100)	159,5 (100)
	Egen Formel	62,9 (96)	70,4 (116)	101,2 (94)	155,5 (97)
	Kreügers Formel	109,6 (168)	115,8 (190)	172,9 (161)	194,0 (122)
	Voellmys "	13,7 (21)	16,8 (28)	41,5 (39)	142,7 (89)
	Drögslers "	35,7 (55)	47,3 (78)	63,0 (59)	66,9 (42)

¹⁾ Otto Drögslers: Ziegelbiegefestigkeit und Mauerdruckfestigkeit. Wien 1938.

²⁾ Olof Hansson: Murverksprovnngen. »Tegel» Nr. 8, Stockholm 1937.

Kreügers Formel giver for lave Værdier for Molersten og for høje for Flamsten; at der er regnet med et for stort Stenformat har henholdsvis formindsket og forøget Uoverensstemmelsen. Hvis man indfører Cementmørtlens sande Styrke og ikke 60^{at}, bliver de to Cementmørtelpillers Styrketal multipliceret med 2,65.

Baade Voellmys og Drögslers Formler giver for lave Værdier for begge Stenarter.

Medens Bestemmelserne af Mørtelstyrken er udført paa forskellige Maader, er Kreügers Bestemmelse af Stenenes Trykstyrke og Hanssons Bestemmelse af Stenenes Bøjningsstyrke udført paa omtrent samme Maade som ved de foreliggende Forsøg, saaledes at man kan foretage en omtrent korrekt Bedømmelse af, i hvilken Grad Kreügers og Drögslers Formler stemmer overens med den nye Formel i Henseende til Stenstyrkens Indflydelse paa Murværksstyrken. Kreügers Formel og den af de foreliggende Forsøg udledte fører nemlig til, at Forholdet mellem Styrkerne af Murværk af ulige stærke Sten i ens Mørtel og med ens Værdi af $h : b$ er uafhængigt af Mørtlens Styrke og kan udregnes, naar man kender Stenenes Trykstyrke, medens Drögslers Formel fører til, at Differensen mellem Styrkerne af Murværk af ulige stærke Sten i ens Mørtel er uafhængig af dennes Styrke og kan udregnes, naar man kender Stenenes Bøjningsstyrker.

De for Bedømmelsen nødvendige Tal er indført i Tabel 18; de er udregnet af de foreliggende Forsøgs Resultater samt af Resultaterne af nogle af Kreügers¹⁾ og Hanssons Forsøg, der omfattede Murværk af Sten med forskellig Styrke hennuret i ens Mørtel.

Tabellen viser følgende:

Egen Formel anvendt paa Kreügers og Hanssons Forsøg fører til henholdsvis en Undervurdering og en Overvurdering af Stenstyrkens Indflydelse paa Murværksstyrken.

Kreügers Formel fører, saavel naar den anvendes paa de foreliggende som paa Hanssons Forsøg, til en Overvurdering af Stenstyrkens Indflydelse.

Drögslers Formel undervurderer Stenstyrkens Indflydelse, naar den anvendes paa de foreliggende Forsøg med Piller i Cement- og Kalk-Cement-Mørtel, men stemmer overens med Forsøgsresultaterne for Piller i Kalk-Diatomol- og Kalkmørtel.

Ingen af de tre Formler udtrykker altsaa Stenstyrkens Indflydelse paa en Maade, der stemmer overens med andre Forskeres Forsøgsresultater.

Man kan derfor ikke med nogen rimelig Grad af Sikkerhed udregne de af een Forsker fundne Pillestyrker ved Hjælp af en anden Forskers

¹⁾ H. Kreüger: Om Murbruk och Tegelmurverk. Stockholm 1916, Side 25.

Tabel 18. Stenstyrkens Indflydelse paa den beregnede Pillestyrke, naar Mørtlen er givet. Formlernes Overensstemmelse.

Egne Forsøg: 1-Stens Piller af Molersten og Flamsten henmuret i 4 forskellige Mørtler.

	Mørtlens Art							
	Kalk-Diatomol		Kalk		Kalk-Cement		Cement	
	Murstenenes Middeltrykstyrke i at							
	116	426	116	426	116	426	116	426
<i>Pillernes relative Styrker</i>								
Forsøgsværdi	100	177	100	176	100	200	100	231
Egen Formel	100	202	100	202	100	202	100	202
Kreügers Formel	100	367	100	367	100	367	100	367
<i>Pillestyrkens Differens</i>								
Forsøgsværdiat	28,3		26,3		53,9		90,4	
Drøgslers Formelat	29,6		29,6		29,6		29,6	

Kreügers Forsøg: 1-Stens Piller af 6 forsk. Stenarter i Kalkmørtel. Alder 28 Døgn.

	Murstenenes Middeltrykstyrke i at					
	135	177	284	373	502	606
<i>Pillestyrke</i> at	28,8	47,0	62	68,8	128	118
<i>Pillernes relative Styrker</i>						
Forsøgsværdi	100	163	215	239	444	410
Kreügers Formel	100	131	210	276	372	449
Egen Formel	100	117	149	185	253	268

Drøgslers Formel kan ikke medtages, fordi S_{st}^b ikke kendes.

Hanssons Forsøg A: 1-Stens Mure af 5 forsk. Stenarter i Kalkmørtel. Alder 90 Døgn.

	Murstenenes Middeltrykstyrke i at				
	61	73	91	134	152
	Murstenenes Middelbøjningsstyrke i at				
	18,3	18,2	27,4	23,6	33,5
<i>Pillestyrke</i>					
Forsøgsværdiat	25,4	24,5	27,1	32,7	34,7
Drøgslers Formelat	22,8	22,7	29,5	26,7	34,0
<i>Pillernes relative Styrker</i>					
Forsøgsværdi	100	96	107	129	137
Drøgslers Formel	100	100	129	117	149
Kreügers Formel	100	120	150	200	223
Egen Formel	100	115	144	184	202

Hanssons Forsøg B: 1 $\frac{1}{2}$ -Stens Mure af 4 forsk. Stenarter i Kalkmørtel. Alder 90 Døgn.

	Murstenenes Middeltrykstyrke i at			
	155	193	257	323
	Murstenenes Middelbøjningsstyrke i at			
	29,6	40,8	44,4	57,9
<i>Pillestyrke</i>				
Forsøgsværdiat	32,7	37,3	42,7	47,7
Drøgslers Formelat	31,1	39,3	42,0	51,9
<i>Pillernes relative Styrker</i>				
Forsøgsværdi	100	114	131	146
Drøgslers Formel	100	126	135	167
Kreügers Formel	100	125	166	208
Egen Formel	100	121	156	190

Formel, og dette skyldes ikke blot, at Mørtelstyrken — i mindre Grad Stenstyrken — bestemmes paa uens Maade, men ogsaa, at Formlerne ikke indeholder en Række styrkebestemmende Faktorer som Sten-tykkelse og Fugetykkelse, Stenenes Trækstyrke samt Mørtlens Evne til at fordele Trykket jævnt i Brudøjeblikket; denne Evne vokser med Mørtlens Trykstyrke (Bilag 1), men utvivlsomt ogsaa med Adhæsionen mellem Sten og Mørtel, altsaa bl. a. med Stenenes Sugning.

Stenstyrken og Mørtelstyrken er ikke blot utilstrækkeligt karakteriserende, men giver endog en gal Karakteristik. Det er f. Eks. givet, at Kalkmørtlens Virkning ikke kan være den samme mellem porøse Sten og mellem Klinker, men i Formlerne udtrykkes dens Virkning ved eet og samme Tal. Og Stenstyrken er ikke den samme mellem Kalkmørtelfuger som mellem Cementmørtelfuger, men i Formlerne indgaar kun den sidste.

Dette Sæmmenspil mellem Sten og Mørtel kan ikke udtrykkes som en Funktion af Stenstyrke og Mørtelstyrke; mange andre Sten- og Mørtel-egenskaber maatte indføres i Formlen, utvivlsomt saa mange, at denne Vej vilde vise sig ufarbar, og at man maatte søge at finde en Genvej, og maaske kunde man komme Maalet nærmere ved følgende Fremgangsmaade:

Mørtelstyrken afskaffes som karakteriserende Faktor, og det samme gælder den Værdi af Stenstyrken, som man hidtil har anvendt, nemlig Styrken af en Halvstenstærning med tynd Cementfuge. I Stedet prøves Stenene i Form af 3 hele Sten lagt ovenpaa hinanden med 1^{cm} tykke Mørtelfuger, og hver Stensort prøves med 3 standardiserede Mørtler, en Kalkmørtel, en Cementmørtel og en Kalk-Cement-Mørtel. Enhver Stensort bliver altsaa karakteriseret ved 3 Styrketal, der udtrykker, hvor godt den egner sig til at indgaa i en Pille opmuret i den paagældende Mørtel, og ved Hjælp af disse Styrketal vilde man formentlig kunne opstille en brugbar Formel for Styrken af Piller opmuret af denne Stensort.

MØRTELARTENS INDFLYDELSE PAA INDMUREDE STENS SAMMENTRYKNING

Efterfølgende Forsøgsrækker er udført med Studerende ved Undervisningen i Materiallære med det Formaal at undersøge, i hvilken Grad en indmuret Stens Brudlast og dens paa Overfladen maalte Sammentrykning paavirkes af Lejefugernes Art.

Prøvelegemerne (Fig. 31) var smaa Piller opmuret af 3 Stk. 7^{cm} Tærninger. Tærningerne var af Cementmørtel 1 : 2 komprimeret i Böhmes Hammerapparat og derefter lagret 8 eller 9 Aar i fugtig Luft. Tærningerne anbragtes saaledes i Pillerne, at de paa Stamperetningen vinkelrette Flader var lodrette og parallelle. Der udførtes to Forsøgsrækker, en i 1942 og en i 1943. Forsøgene udførtes i en hydraulisk Presse, og under Belastningen maalt Midtertærningens Sammentrykning midt paa to af de ved Stampningen lodretstaaende Sideflader med to Huggenberger Tensometre forstørrende ca. 1000 Gange.

Mørtelartens Indflydelse paa Spændingsfordelingen i Pillernes Midtertærning.

1942-Forsøgene.

Prøvelegemerne var:

- 2 Piller opmuret i Cementmørtel, $P_c : P_s = 1 : 3$.
- 2 - - - Kalkcementmørtel, $P_k : P_c : P_s = 0,38 : 0,62 : 6,95$.
Kalken var Hydratkalk (Sækkealk).
- 2 - - - Kalkmørtel, $P_k : P_s = 1 : 10,7$. Kalken var Hydratkalk (Sækkealk).

Paa Sammenmuringsdagen henstilledes Prøvelegemerne i Stueluft.

Pillernes Endeflader belastedes gennem 2^{mm} tykke Blyplader, og Lasten øgedes jævnt med gennemsnitligt 1,25 t/Minut. Huggenberger Tensometrenes Maalelængde var 5^{cm}.

En af Pillerne er vist paa Fig. 31.

Ved Trykprøvningen var Mørtelfugernes Alder henholdsvis 13, 18 og 22 Døgn. De maalte Sammentrykninger er indført i Tabel 19.

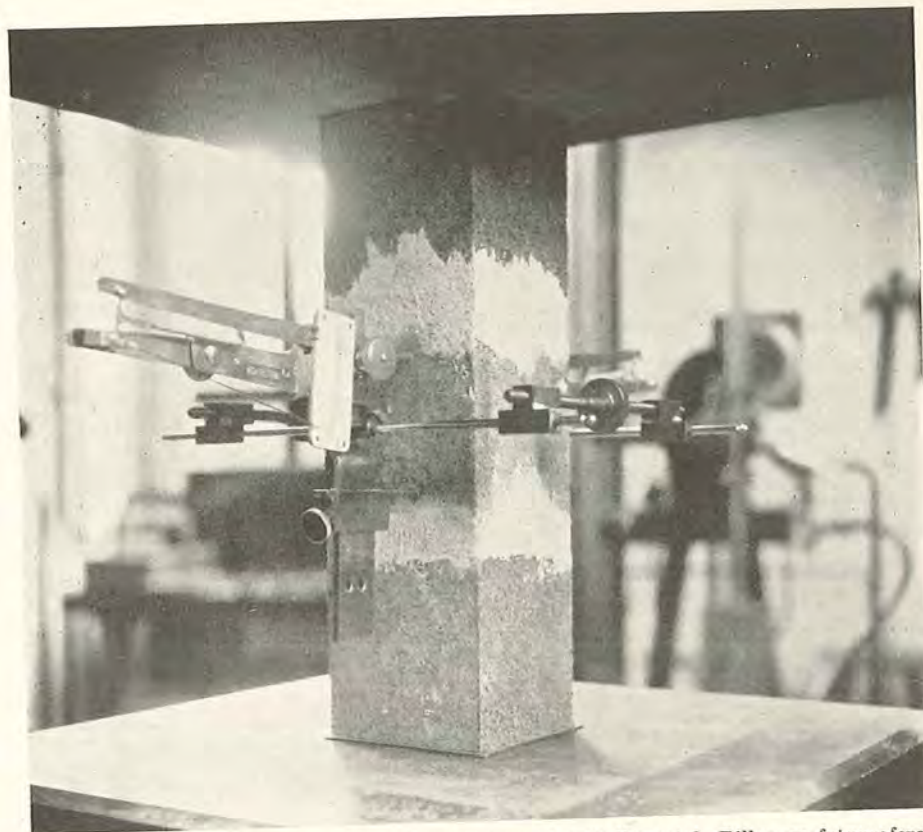


Fig. 31. Pille af 3 Cementmørteltærninger opmuret i Kalkmørtel. Pilleren er fotograferet i Pressen; under og over den er indlagt Blyplader, Midtertærningen er forsynet med Maaleapparater.

Tabel 19. Midtertærningens Sammentrykning i mm/m ved 1942-Forsøgene.

Spænding	Fugernes Art		
	Cementmørtel	Kalkcementmørtel	Kalkmørtel
20 ^{at}			0,035
40 [»]			0,057
50 [»]	0,064	0,091	
60 [»]			0,036
80 [»]			0,044
100 [»]	0,150	0,198	0,050
150 [»]	0,249	0,294	
200 [»]	0,357	0,373	
250 [»]	0,461		

Sammentrykningen indtil den Last, ved hvilken Maaleapparaterne fjærnedes, er vist i Fig. 32.

Tærningen mellem Cementmørtelfuger viser en nedad hult Sammentrykningskurve, hvis Krømning tydeligt aftager med voksende Spænding. Dette tyder paa, at i hvert Fald en Del af Krømningen hidrører fra, at Randspændingen til at begynde med har været mindre end Middelspændingen og efterhaanden har nærmet sig denne, og Forklaringen er formentlig den, at Fugemørtlens Rand under Lagringen er svundet, og dens Kærne svulmet, saa Lasten i Begyndelsen fortrinsvis er overført gennem Kærnen.

Ved 349^{at} (86% af σ_{Brud}) begyndte det at drysse fra Fugerne, fordi Mørtlen knustes i Overfladen.

Tærningen mellem Kalkmørtelfuger viser en ejendommelig Sammentrykningskurve. Paa Strækningen mellem 0 og 40^{at} ligger Kurven betydeligt lavere end Cementkurven, hvilket tyder paa, at Spændingen til at begynde med har været jævnere fordelt i disse Piller end i Pillerne med Cementmørtelfuger. Forklaringen herpaa er den, at Randzonens Mørtel er blevet stivere end Kærnezonen, fordi Hærdningen udelukkende foregaar ved Karbonatdannelse, og dette har helt eller delvis ophævet Virkningen af Randzonens Svind. Ved knapt 40^{at} ophører Overfladeværdien af ϵ_{st} at vokse, og derefter aftager den hurtigt. Omslaget skyldtes Karbonatskorpeknusning, der blev synlig ved, at Sandskorn dryssede ned fra Fugen. Kort Tid efter knustes Mørtlen i hele Tværsnittet, og den knuste Mørtel begyndte at vandre ud af Fugen. Lidt efter at Omslaget var sket, var Fugetykkelsen formindsket fra 12 til 5^{mm}; Fig. 33 viser, hvorledes den udvandrede Mørtel hobede sig op omkring Pillen.

Ved dette Forsøg med Kalkmørtelfuger er den tilsyneladende Værdi af Tærningens Elasticitetstal ved 20^{at} altsaa væsentligt mindre end ved Forsøget med Cementmørtelfuger, og det skyldes Kalkmørtlens Karbonatskorpe; i Omraadet 60—100^{at} er Værdien langt større end ved Forsøget med Cementmørtelfuger, fordi Lasten nu hovedsageligt overføres i Kærnen.

Tærningen mellem Kalkcementmørtelfuger viser en Sammentrykningskurve, hvis Form er en Mellemtung mellem de to andres. Ogsaa denne Fugemørtel er hærdnet hurtigt i Randzonen, hvorved Svindets Virkning

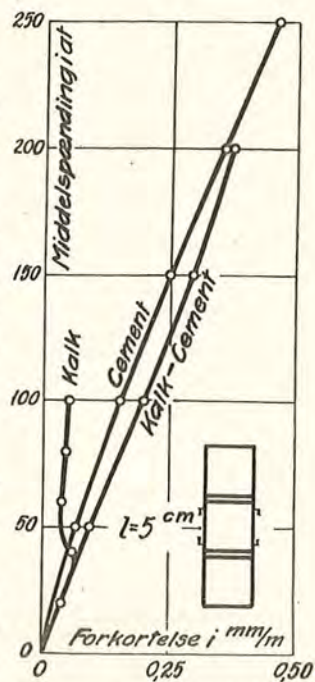


Fig. 32. Sammentrykningsmaalinger paa Cementmørteltærninger belastet gennem Fuger af Kalkmørtel, Kalkcementmørtel eller Cementmørtel.

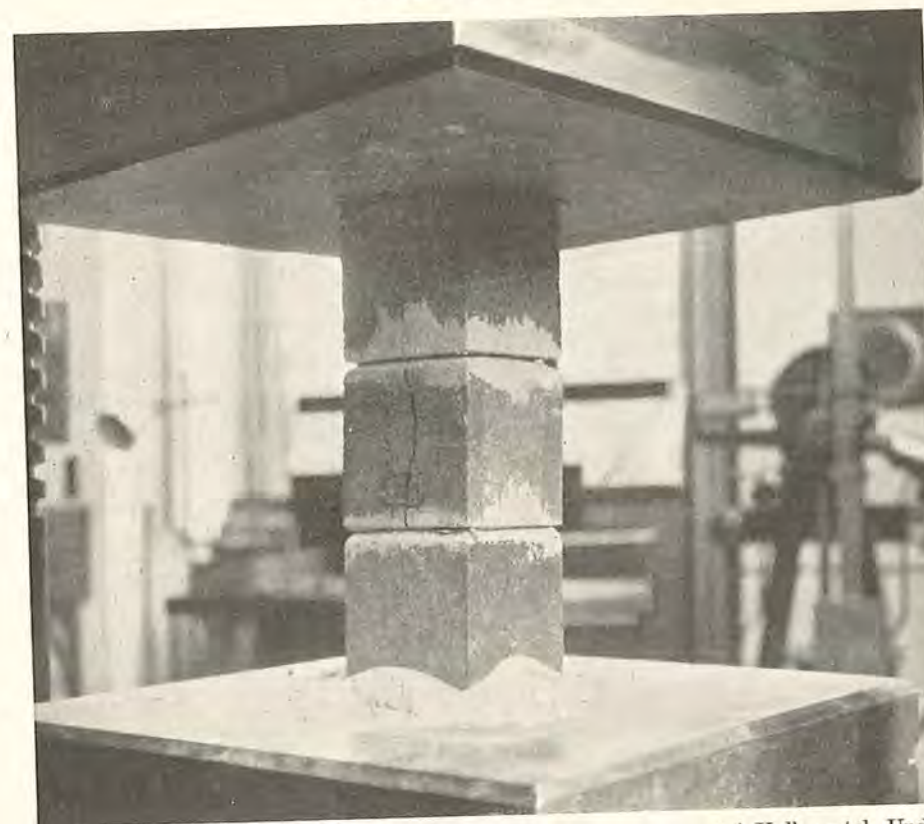


Fig. 33. Brudbelastet Pille af 3 Cementmørteltærninger opmuret i Kalkmørtel. Under Belastningen vandrede den knuste Mørtel ud af Fugerne.

er blevet formindsket eller ophævet, saa Spændingsfordelingen til at begynde med er blevet lige saa jævn som i Kalkpillerne. Men den stærkere Kalkcementmørtel begyndte først at knuses ved 140^{at}, og Kurvens Vendepunkt ligger derfor tilsvarende højere. Iøvrigt viste Fugens større Styrke sig ogsaa ved, at Mørtlen faldt ud af Fugen i sammenhængende Stykker, ikke som et Pulver.

1943-Forsøgene.

Forsøgene udførtes hovedsageligt for at faa bekræftet den ved 1942-Forsøgene for Kalkmørtelfuger fundne Arbejdslinie.

Prøvelegemerne var:

- 6 Piller opmuret i Cementmørtel, $P_c : P_s = 1 : 3$.
- 5 - - - - - Kalkmørtel, $P_k : P_s = 1 : 10,7$. Kalken var Hydratkalk (Sækkealk).
- 6 Tærninger, der belastedes ved direkte Trykoverføring.

Paa Sammenmuringsdagen henstilledes alle Prøvelegemerne i Stueluft, men efter 7, 14, 21 og 28 Døgn Hærdning dyppedes de 10 Minutter i Vand; efter 35 Døgn Hærdning trykprøvedes de.

Før Forsøget blev saavel Pillernes Endeflader som Prøvemaskinens Trykplader planslebet, og Lasten overførtes direkte uden Mellemlag af Bly og øgedes — ligesom ved 1942-Forsøgene — jævnt med gennemsnitlig 1,25 t/Minut. Pillerne med Kalkmørtelfuger dannede dog en Undtagelse, hvad Belastningsmaaden angik, idet man — naar Fugen knustes — ikke søgte at holde Lastøgningen vedlige, men blot sørgede for, at Olien tilførtes med konstant Hastighed. Maalelængden var kun 2^{cm} ligesom ved Hovedforsøgene; dersom Lasten er koncentreret i Kærnen, maa Brugen af denne lille Maalelængde medføre, at ϵ_{st} bliver større end ved Brug af 5^{cm} Maalelængde.

De fundne Sammentrykninger er indført i Tabel 20.

Tabel 20. Midtertærningens Sammentrykning i mm/m ved 1943-Forsøgene.

Spænding	Cementmørtelfuger	Kalkmørtelfuger	Direkte Belastning
20 ^{at}		0,022	
40 »		0,052	
50 »	0,077		0,070
60 »		0,092	
80 »		0,060	
100 »	0,174	0,080	0,172
150 »	0,286		0,274
200 »	0,398		0,376
250 »	0,507		0,478
300 »			0,585
350 »			0,682
400 »			0,784

Sammentrykningskurverne indtil den Last, ved hvilken de sidste Maalinger foretoges, er vist i Fig. 34.

Tærningen mellem Cementmørtelfuger viser 10—20 % større Værdier af ϵ_{st} end ved 1942-Forsøgene og en noget mindre Krumning paa Kurvens første Del. Begge Dele kan skyldes Forsøgsusikkerhed, men det er naturligt at antage, at den ugentlige Dypning i hvert Fald har været en medvirkende Aarsag, idet den har fremkaldt en overfladisk Svulmning, som har gjort Randspændingernes Forhold til Middelspændingen større end ved 1942-Forsøgene.

Ved Spændinger, der varierede fra 250 til 472^{at} (70—99 % af σ_{Brud}), begyndte det at drysse fra Fugerne, fordi der skete Knusninger i Mørtlens Overflade.

Tærningen mellem Kalkmørtelfuger viser samme ejendommelige Sammentrykningskurve som ved 1942-Forsøgene. Kurven er til at begynde med nedad hult og følger omtrent Cementkurven indtil 60^{at}, og derefter drejer den til venstre. Til at begynde med har Spændingsfordelingen altsaa omtrent været som i Tærningen mellem Cementmørtelfuger, men Forholdene ændres ved Karbonatskorpenes Knusning. Denne Knusning og den hurtigt paafølgende Knusning af den øvrige Del af Fugemørtlen indtraadte ved Spændinger mellem 60 og 76^{at}, altsaa ved en højere Spænding end ved 1942-Forsøgene, hvilket skyldes Mørtlens højere Alder og gunstigere Hærdningsforhold, der formentlig har bevirket, at Karbonatskorpen baade er blevet stærkere og tykkere. Kurveforløbet i Tiden nærmest efter Fugemørtlens Knusning var ret forskelligt for de 5 Piller, og det er derfor kun antydnet paa Fig. 34. Det afveg fra 1942-Forsøgenes, fordi man ikke søgte at vedligeholde Laststigningen, da Knusningen skete, og 1943-Forsøgenes Kurver afveg indbyrdes, dels fordi Knusningen indledtes ved forskellige Spændinger, dels fordi begge Fuger i den ene af Pillerne knustes samtidigt, medens Knusningen i de 4 andre Piller indledtes og udvikledes fuldt i den ene Fuge, før den anden knustes. I Fig. 35a og b er vist et Tilfælde af hver Art.

Under de givne Forsøgsbetingelser har Knusningen medført et Lastfald, og dette ophører først, naar Fugetykkelsen er formindsket betydeligt, og der inde ved Kærnen har dannet sig en Ø af Mørtel, som under Indflydelse af de lodrette Trykkræfter og de vandrette Friktionskræfter er blevet saa stærkt komprimeret, at den kan overføre Lasten fra Tærning til Tærning uden at knuses. Naar denne Ø er dannet i den ene Fuge

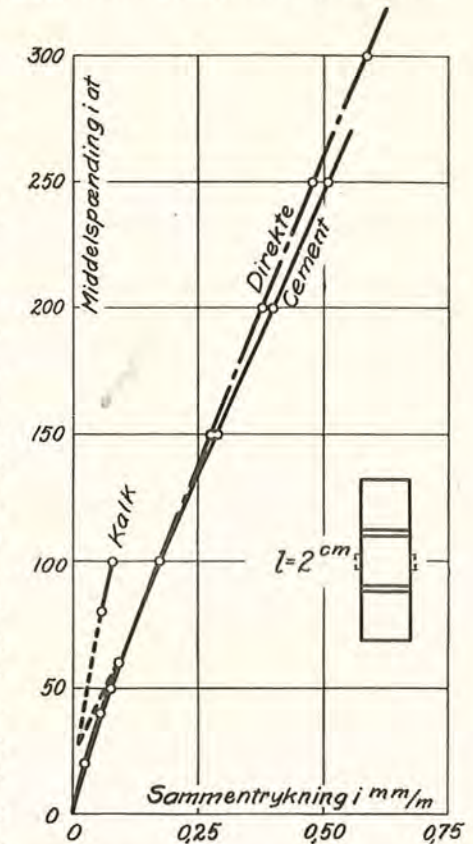


Fig. 34. Sammentrykningsmaaling paa Cementmørteltærninger belastet gennem Fuger af Kalkmørtel eller Cementmørtel eller belastet direkte.

(Fig. 35b), vil Lasten atter stige, og Overfladeværdierne af ϵ_{st} vokser da paany. Naar Spændingen ved den anden Endeflade er steget saa meget, at denne Fuge knuses, indtræder paany et Lastfald, og først naar Mørtlen i denne Fuge ogsaa er stærkt komprimeret, stiger Lasten atter. Ved denne Laststigning vokser Overfladeværdien af ϵ_{st} betydeligt langsommere end ved første Laststigning, fordi Lasten nu ved begge Endeflader er koncentreret i Kærnen. At ϵ_{st} -Værdien ved 100^{at} er langt større ved dette Forsøg end ved 1942-Forsøget skyldes den lille Maalelængde.

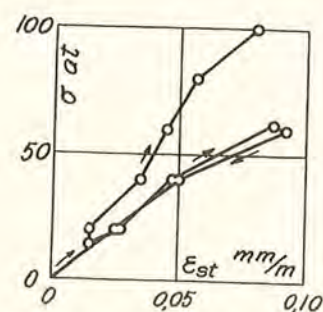


Fig. 35a. Sammentrykningsmaaling paa Cementmørteltærning belastet gennem Fuger af Kalkmørtel. Fugen over og under Tærningen knustes samtidigt.

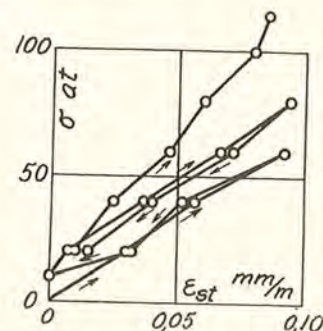


Fig. 35b. Sammentrykningsmaaling paa Cementmørteltærning belastet gennem Fuger af Kalkmørtel. Fugen under Tærningen knustes før Fugen over Tærningen.

Tærningen med direkte Lastoverføring viser en Sammentrykningskurve, der ret nøje følger den for Tærningen mellem Kalkfuger (indtil 60^{at}) og Cementfuger fundne. Dens ϵ_{st} -Værdier er alle lidt mindre end Tærningens mellem Cementfuger, men Forskellen er saa ringe — gennemsnitligt 5% — at der næppe kan drages Slutninger af den.

Sammenholdes begge Forsøgsrækker, kan følgende Slutninger drages:

(1) Lejefugens Art har stor Indflydelse paa en indmuret Stens Overfladeforkortelse. Er Lejefugen af Kalkmørtel, som knuses før Stenen, vil Knusningen bevirke, at Randspændingen aftager stærkt i Forhold til Middelspændingen, og at Overfladeforkortelserne ved en givet Laststigning bliver betydeligt mindre end før Knusningen.

(2) Forsøgsresultaterne tyder ikke paa, at Kalkmørtelfugernes Randspænding — som ved Hovedforsøgene (se Tabel 11) — til at begynde med har været større end Middelspændingen. Dette er formentlig en Følge af, at Kalkmørtlens Alder kun var 22—35 Døgn mod Hovedforsøgenes 9 Maaneder, og at Pilletværsnittet kun var 50^{cm²} mod Hovedforsøgenes ca. 525^{cm²}. Dette sidste kan ogsaa forklare, at en Knusning af Kalkmørtelfugen, som den ved Smaapillerne iagttagne, ikke forekom ved

Hovedforsøgene, thi da Smaapillernes Randzone svigtede, blev Lasten overført til en Kærnezone, som var forholdsvis lille og derfor fik en stor Spændingsforøgelse, medens den ved Hovedforsøgene blev overført til en Kærnezone, som var forholdsvis stor og derfor fik en ringe Spændingsforøgelse.

(3) Cementmørtelfuger har givet mindre Randspændinger, naar Pillerne lagredes tørt, end naar de dyppedes i Vand hver Uge, thi lagredes Pillerne tørt ligesom ved Hovedforsøgene, fik Fugernes Randzone Lejlighed til at svinde, og dyppedes Pillerne ugentligt i Vand, fik baade Fugernes og Tærningernes Randzone Lejlighed til at svulme.

Mørtelartens Indflydelse paa Tærningernes Brudspænding.

Tærningernes Brudspænding var:

	1942-Forsøgene	1943-Forsøgene
Fuger af Kalkmørtel	97 ^{at}	106 ^{at}
» » Kalkcementmørtel	238 »	
» » Cementmørtel	404 »	386 »
Direkte Belastning		1142 »

De gennem Mørtelfuger belastede Tærningers Brudspænding ses at vokse med Fugemørtlens Styrke. Disse Tærningers Brud skyldtes vandrette Trækspændinger, der opstod, fordi Tærningens lodrette Trykspændinger var større i Kærnezonen end i Randzonen (se Side 38). Da de til en givet Last svarende Trækspændinger bliver desto større, i jo højere Grad Lasten koncentrerer sig i Kærnezonen, og da Tærningernes Trækstyrke maa antages at have været ens, maa Brudspændingens Variation betyde, at Trykket paa Midtertærningen har været mest koncentreret i Piller med Kalkfuger og mindst koncentreret i Piller med Cementfuger. I Pillerne med Kalkfuger var Brudlasten saa lille, at Ydertærningerne ikke revnede.

De direkte belastede Tærninger havde en langt højere Brudspænding end de gennem Cementmørtelfuger belastede, fordi deres Tværuddvidelse var hæmmet af Friktionen langs Pressens Trykplader.

Baade ved 1942- og 1943-Forsøgene prøvedes Piller med Kalkfuger og Cementfuger, og til Trods for, at i hvert Fald Kalkfugen var stærkest ved 1943-Forsøgene, er Brudspændingerne parvis omtrent ens. Dette bekræfter, at Kalkfugerne var knust, da Tærningerne revnede, og viser, at Trykfordelingen i Fugerne i Brudøjeblikket har været omtrent ens ved de to Forsøgsrækker.

Mørtelartens Indflydelse paa Tærningernes Brudmaade.

De i Kalk opmurede Piller mistede pludseligt deres Bæreevne, idet Midtertærningen revnede langs et lodret Plan, mens Ydertærningerne forblev uskadt. I 5 af Pillerne var Revnens Plan vinkelret paa Stamperetningen, i de øvrige 2 var Planet parallelt med Stamperetningen.

De i Kalkcement opmurede Piller (1942-Forsøgene) var sejgere. Midtertærningen revnede som ovenfor, men der fandtes desuden en finere Revne i dens lodrette Midterplan parallelt med Stamperetningen; denne Revne er utvivlsomt et sekundært Brudfænomen. Ydertærningerne forblev uskadt. Mørtlen var kun pulveriseret i den aller yderste Del af Fugen, og en Foringelse af Fugetykkelsen kunde ikke paavises; efter Bruddet dannede Pillen et sammenhængende Hele.

Ved de i Cement opmurede Pillers Brud revnede saavel Midtertærningen som Ydertærningerne i lodrette Planer, men kun i 3 af de 8 Piller var Planet et Midterplan.

Ved Tærningerne med direkte Trykoverføring (1943-Forsøgene) skete Bruddet pludseligt, og Tærningerne sønderdeltes saa stærkt, at Størsteparten af Mørtlen blev til Pulver. Blandt Brudstykkerne var der for hver Tærning et eller to, der havde Kile- eller Kegleform, og hvis Grundflade var en Del af en af Tærningens Trykflader.

Sammenholdes de gjorte Iagttagelser vedrørende Brudmaaden, ses de gennem Mørtelfuger belastede Tærninger alle at have faaet lodrette Revner, medens de direkte belastede Tærninger tillige fik skraa Revner og i mere eller mindre udpræget Grad antog Timeglasform. I 11 Tilfælde revnede Midtertærningen langs et lodret Midterplan, og i 7 af disse Tilfælde var Planet vinkelret paa Stamperetningen. Tærningernes Trækstyrke synes altsaa at være noget ringere i Retning vinkelret paa Stamperetningen end parallelt dermed.

Naar kun Midtertærningen revnede — eller naar den revnede først — var Grunden den, at Midtertærningen i begge Endeflader var paavirket af et mere eller mindre koncentreret Tryk, medens Ydertærningerne var paavirket af et jævnt fordelt Tryk paa deres ene Endeflade. Er Tærningernes Tværnsnit F , og er Trykket i de to Fuger koncentreret paa Arealet f , kan man tilnærmelsesvis regne¹⁾, at Ydertærningens Brudlast forholder

sig til Midtertærningens Brudlast som $\sqrt[3]{\frac{F}{f}}$.

¹⁾ Se E. Suenson: Natursten 1942, § 79 og 81.

TRYKELASTICITETSFORSG MED MOLERSTEN

Forsøgene udførtes dels for at bestemme Molerstens Elasticitetstal, dels for at undersøge, hvor meget Elasticitetstallet nedsættes, naar Trykoverføringen sker gennem Fuger med stor Tendens til Tværudvidelse (Gummi) i Stedet for gennem Fuger med ringe Tendens til Tværudvidelse (Cementmørtel).

Prøvelegemerne var smaa Piller, hver opbygget af 3 Cylindre med ca. 5^{cm} Højde og ca. 5^{cm} Diameter (Fig. 36). Cylindrene var udboret af 12 Molersten udtaget blandt de i Stykke A omtalte. Af hver Stens midterste Del udboredes 2 Cylindre Side om Side; efter Udboringen bearbejdedes de, indtil de fik nøjagtig Cylinderform, og begge Cylindre mærkedes derefter med Stenens Nummer, samt den ene yderligere med et C , den anden med et G . Af de med C mærkede Cylindre fremstilledes 4 Piller, hvis Fuger var af Cementmørtel 1:1 og ca. 7^{mm} tykke; af de med G mærkede fremstilledes 4 Piller, hvis Fuger var cirkulære Gum miskiver 6^{mm} tykke. Pillernes Endeflader forsynedes med et Lag af Cementmørtel 1:1, ogsaa naar Fugerne var af Gummi. Pillerne prøvedes 4 Uger efter Fremstillingen; Lagringen foregik i fugtig Luft bortset fra 4' til 8' Døgn, hvor de henstod i Stueluft. G -Pillernes Midtercylinders Vandindhold ved Prøvningen og dens Rumvægt i vandfri Tilstand var:

Cylindrens Mærke	4 G	7 G	10 G	13 G
Vandindhold ved Prøvningen	9,9	10,2	10,2	11,4 Vægtprocent
Rumvægt i vandfri Tilstand	832	782	758	782 kg/m ³ .

Ved Prøvningen maalttes Midtercylindrens Forkortelser langs to diame tralt modsatte Frembringere. Maalelængden var 20^{mm}, og Maalingerne udførtes med to Huggenberger Tensometre anbragt som vist paa Fig. 36; de viste Forkortelserne ca. 1000 Gange forstørret. Forsøgene udførtes i en Amslers 5 Tons hydraulisk Presse indstillet til 500^{kg} Maksimallast; begge Trykplader var forsynet med Kugleled. Lasten øgedes trinvis med 7^{at}; Laststigningshastigheden var 1 at/Min, og Lasten holdtes konstant i 5 Minutter paa hvert Lasttrin, før der aflæstes. Pillerne med Cement-

mørtelfuger belastedes alle med 28^{at}; Pillerne med Gummifuger kunde ikke belastes saa højt, uden at der forekom Afsprængninger, som forstyrrede Maalingerne, saa Forsøgene maatte afbrydes. De fundne Forkortelser er indført i Tabel 21, i hvilken Pillerne er mærket med Numrene paa de 3 Molersten, af hvilke Cylindrene blev udboret; det midterste Tal er Midtercylindrens Nummer.

I Tabellens Middeltal er de for de to Piller mærket 3-4-5 fundne Værdier dog ikke medtaget. Forkortelserne for disse Piller Midtercylindre — begge udtaget af Sten Nr. 4 — var mindre end for de tre andre Midtercylindre, hvilket muligvis skyldtes, at Sten 4 var stærkere brændt end de øvrige — dens Rumvægt var højere — men ogsaa kan have været forårsaget af, at begge de to Midtercylindre havde Revner, der gav Anledning til ujævn Spændingsfordeling og tidlige Afsprængninger.

Tabel 21. Molerstencylindres totale Forkortelse i mm/m.

Middel-spænding	Pillens Mærke				Middel
	3-4-5	6-7-8	9-10-11	12-13-14	
Cementmørtelfuger (C-Piller)					
7	(0,24)	0,31	0,29	0,31	0,30
14	(0,56)	0,69	0,64	0,71	0,68
21	(0,88)	1,08	1,01	1,15	1,08
28	(1,22)	1,50	1,41	1,62	1,51
Gummifuger (G-Piller)					
7	(0,31)	0,37	0,33	0,38	0,36
14		0,78	0,74	0,82	0,78
21		1,07			

C-Pillerne ændredes ikke synligt under Forsøget bortset fra den foran omtalte Afsprængning i Pille 3-4-5, opstaaet i Forbindelse med den forud tilstedeværende Revne.

G-Pillernes Gummifugers Cylinderflade antog Tøndeform allerede ved Spændinger mellem 1 og 2^{at}, og Tøndeformen blev mere og mere udpræget under den nærmest følgende Spændingsøgning. Ved Spændinger mellem 7 og 14^{at} iagttoges Afsprængninger af Skaller fra Molerstenenes Cylinderflade langs Gummifugerne; Skallerne var højst paa Størrelse med en Negl, men oftest mindre, og sprang i nogle Tilfælde vandret ud, mens de i andre Tilfælde blev siddende fastholdt af Gummiet. Afsprængningen skyldtes utvivlsomt Trækspændinger fremkaldt ved Gummifugernes stærke Tendens til Tværudvidelse. Paa de Steder, hvor de største Skaller var afsprængt, ophørte Gummifugerne med at have Tøndeform

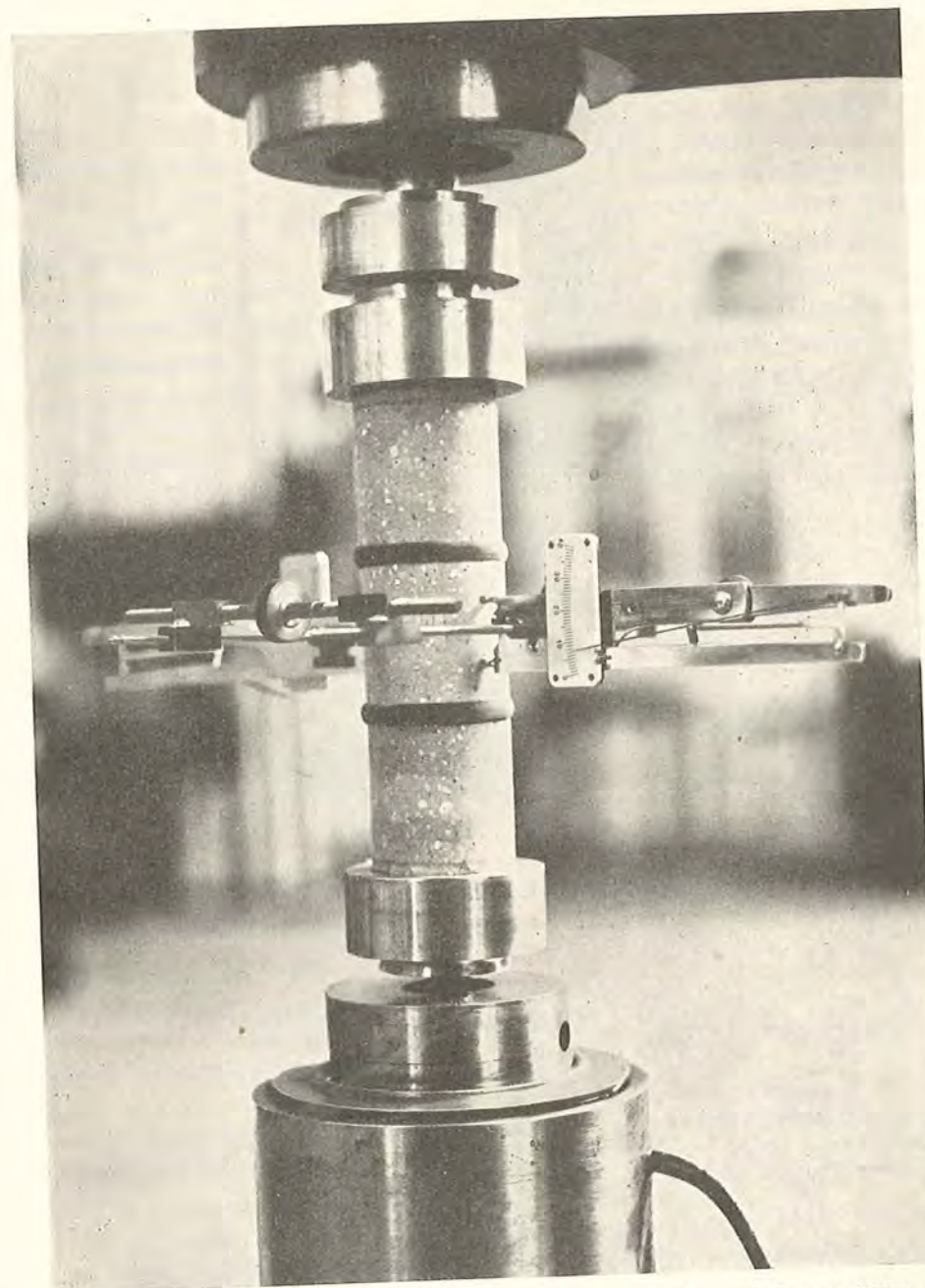


Fig. 36. Pille af 3 Molerstencylindre med mellemliggende Fuger af Gummi. Pillen er belastet, hvorved Gummifugernes cylindriske Flade har antaget Tøndeform.

og trængte længere ud, og ved *G*-Pille 6-7-8 — den eneste, der belastedes over 14^{at} — ophævedes Tøndeformen paa det nærmeste helt ved ca. 17,5^{at}. Da Pillerne aflastedes, antog Gummiskiverne atter deres oprindelige Form, og da de toges ud, fandtes deres plane Flader at være blevet blankere her og der langs Randen, og Moleracylindrenes Endeflader at være blevet mørkere paa de tilsvarende Arealer. De ændrede Partier dannede mere eller mindre regelmæssige Bræmmer, hvis Begrænsning indadtil ret nøje fulgte Moleracylindrenes Kontur og altsaa laa længst inde paa de Steder, hvor Skaller var afsprængt. Bræmmerne er utvivlsomt fremkommet ved, at Friktionen mellem Moler og Gummi blev overvundet de paagældende Steder, saa ikke alene Gummiskivernes midterste Lag, men ogsaa de Lag, der var i Berøring med Stenene, kunde bevæge sig udefter, hvorved Gummifladerne blev poleret og smittede lidt af paa Stenene. Ved denne Bevægelse blev Tøndeformen mindre fremtrædende eller ophævet, som foran omtalt.

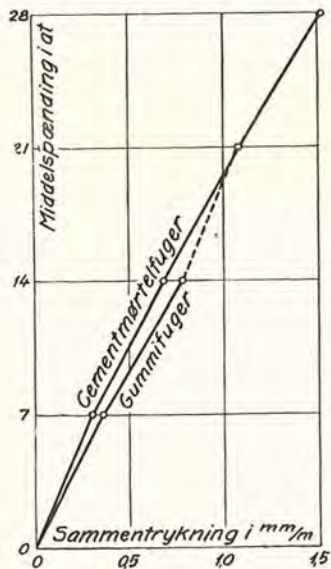


Fig. 37. Sammentrykningskurver for Molerstencylindre belastet gennem Fuger af Cementmørtel eller Gummi.

men da Middelspændingen paa dette Lasttrin var helt oppe paa 25^{at}, og da Maalingerne foretoges ved Cylindrens Ende og ikke ved dens Midte, er det forklarligt, at Virkningen er fundet større.

De fundne Elasticitetstal beregnet som Hældningen af Korder gennem Sammentrykningskurvernes Begyndelsepunkt er indført i Tabel 22.

1) Nils Hast: Measuring Stresses and Deformations in solid Materials, Stockholm 1943.

Gummifugerne ses at føre til ca. 15% lavere *E*-Værdier end Cementmørtelfugerne, naar $\sigma < 14^{\text{at}}$.

Tabel 22. Molerstens Elasticitetstal.

	0-7 ^{at}	0-14 ^{at}	0-21 ^{at}	0-28 ^{at}
Mellem Cementmørtelfuger.....	23300 ^{at} (20450 *)	20600 ^{at} (20600 *)	19450 ^{at} (20450 *)	18550 ^{at} (20500 *)
» Gummifuger	19450 * (19700 *)	17950 * (19650 *)	19650 *	

Ved en anden Forsøgsrække, hvori der kun var eet Prøvelegeme af hver Art, og hvor Prøvelegemerne var lagret i Stueluft og utvivlsomt har været meget tørre, fandtes de i Tabellen i Parentes indførte Elasticitetstal, der tyder paa, at *E* paavirkes mindre af Fugens Art, naar Stenene er tørre, og at Proportionalitetsgrænsen for tørre Molersten ligger væsentligt højere end for fugtige.

Da Stenene i Hovedforsøgets Piller indeholdt 3,86 Rumfangsprocent Vand (Tabel 5), kan man for disse regne $E = 20\ 000^{\text{at}}$.

Forsøgene viser, at Gummifugerne medfører de største Værdier af Overfladeforkortelsen ϵ_{st} , saalænge Friktionen er stor nok til at hindre Bevægelse mellem Sten og Gummi, samt at Molerstenen sønderrives som Følge af Friktionen. Naar denne ikke længere er stor nok til at hindre, at Gummi langs Randen bevæger sig udad, bliver ϵ_{st} mindre.

SAMMENFATNING

I Laboratoriet for Byggeteknik ved Danmarks tekniske Højskole er der udført Forsøg med Piller opmuret af enten Molersten eller Flamsten i 4 forskellige Mørtler. Pillerne henstod indendørs i 9 Maaneder, hvorefter deres Elasticitet og Styrke bestemtes. Ved Elasticitetsforsøget maales ikke blot Pillens totale Sammentrykning, men ogsaa Stenenes Sammentrykning blev maalt paa 4 Sten i hver Pille.

Stenenes Egenskaber.

	Molersten	Flamsten
Rumvægt i vandfri Tilstand (Side 7 og 10)	800 kg/m ³	1740 kg/m ³
Vægtfylde (- - - -)	2,20 g/cm ³	2,74 g/cm ³
Porerumfang (- - - -)	63,9 %	37,6 %

Vandsugningshastighed, Vandoptagelse og Selvmætningsevne omtales Side 9 og 10. Molerstenene fandtes hygroskopiske i Modsætning til almindelige Teglsten; i fugtig Luft optager de ca. 6,6 Rumfangsprocent Vand (Fig. 1a og 1b). En gul Teglsten — Facadesten — optog under tilsvarende Forhold kun ca. 0,2 Rumfangsprocent.

Flamstenene har grovere Porer end Molerstenene og suger derfor Mørtel-vandet hurtigere til sig.

	Molersten	Flamsten
Elasticitetstal ved Tryk (Side 9 og 65)	20 000 ^{at}	ej bestemt
Trykstyrke (Side 9-11):		
Sammenmurede Halvsten, S_{st}^c	116 ^{at}	426 ^{at}
5 ^{cm} Cylindre, vandfri	95 -	431 -
- - , efter 1 Uge i vandm. Luft	73 -	370 -
- - , - 1 - - Vand	71 -	390 -
Bøjningsstyrke (Side 10 og 11)		
Hele Sten, vandfri	15,4 ^{at}	61,5 ^{at}
- - , stuetørre, S_{st}^b	13,0 -	53,2 -
- - , efter 1 Uge i vandm. Luft	11,6 -	48,0 -
- - , - 1 - - Vand	9,5 -	55,5 -

I Henseende til Styrke var Molerstenene meget ens, Flamstenene meget uens.

For saavel Molersten som Flamsten fandtes Bøjningsstyrken at udgøre ca. 15 % af Trykstyrken, naar denne bestemtes med udborede Cylindre; Forholdet var ens for vaade og tørre Sten.

Murværksforsøgene.

Provelegemerne var 1-Stens Piller med 10 Skifter. Stenstørrelsen var 23 · 11 · 5,5^{cm}. 16 Piller blev opmuret af Molersten (Fig. 5-6), 16 af Flamsten (Fig. 7-8), og der brugtes 4 forskellige Mørtler.

Pillernes Opmuring omtales i Stykke D. Hveranden Pille opmuredes af vanddrukne Sten, hveranden af lufttørre, og Mørtlernes Vandindhold søgtes tilpasset efter Stenenes Vandindhold, saa Muringen kunde ske bekvemt. En fuldstændig Tilpasning var dog ikke altid mulig; i nogle Piller var Mørtlen for »levende«, i andre for »død«.

Mørtlernes Egenskaber omtales i Stykke C. Deres Sammensætning efter Vægt var:

	Sand	Ca (OH) ₂	Diatomol	Cement	Bindemiddel ialt
Kalk-Diatomol-Mørtel	100	10	15		25
Kalk-Mørtel	100	8,7			8,7
Kalk-Cement-Mørtel	100	6		10,5	16,5
Cement-Mørtel	100			33,3	33,3

Diatomol er pulveriseret Moler; Kalkmørtel med en passende Diatomoltilsætning holder langt stærkere paa Vandet end ren Kalkmørtel og er derfor egnet til Henmuring af stærkt sugende Sten, der ellers suger Mørtlen »død«, inden Stenen er trykket i Leje.

Mørtlernes Vandindhold udtrykt i Vægtprocent maatte gøres mindst for Cementmørtlen og størst for Kalk-Diatomol- eller for Kalkmørtlen. For hver enkelt Mørtel afpassedes Vandindholdet efter Stenenes Sugning; naar Stenene var lufttørre, krævede Flamstenene lidt vaadere Mørtler end Molerstenene som Følge af deres hurtigere Sugning. Denne Forskel forsvandt, naar Stenene var vanddrukne; de sugede da ikke — eller de sugede ens — saa Mørtlens Vandindhold kunde holdes ens og væsentlig mindre, end naar Stenene var lufttørre (Tabel 1).

Mørtlernes Styrke bestemtes ikke med 7^{cm} Tærninger, men med 2 · 2 · 12^{cm} Stænger støbt samtidigt med Pillernes Opmuring og straks efter udsat for Sugning fra Træpapir. Stængerne opbevaredes sammen med Pillerne og styrkeprøvedes samtidigt med disse. Som nævnt blev hver af de 4 Mørtler fremstillet med 3 forskellige Vandmængder, men som Følge

af Afsugningen paavirkede det ikke Styrketallene væsentlig (Fig. 3-4); Middelværdierne var:

	Bøjningsstyrke S_{fu}^b at	Trykstyrke S_{fu}^c at	$\frac{S_{fu}^b}{S_{fu}^c}$
Kalk-Diatomol-Mørtel	5,2	6,9	0,75
Kalk-Mørtel	6,5	10,8	0,60
Kalk-Cement-Mørtel	18,0	46,2	0,39
Cement-Mørtel	76,0	258	0,29

Pillernes Tilstand ved Prøvningen omtales i Stykke D, E, F.

	Molersten	Flamsten
Alder	9 Mdr.	9 Mdr.
Udseende	Fig. 5-6	Fig. 7-8
Fugetykkelse (Tabel 3)	1,03 ^{cm}	1,11 ^{cm}
Vandindhold (Tabel 6)	4,33 Rmf. %	0,92 Rmf. %
Rumvægt (Tabel 7)	997 kg/m ³	1726 kg/m ³

Flamstenene i Pillerne indeholdt langt mindre Vand end Molerstenene, og Kalkmørtlen langt mindre end nogen af de andre Mørtler (Tabel 5 og 4).

Pillernes Trykarbejdslinier (Fig. 10-14) er i Hovedsagen nedad hule, men paa det eller de første Lasttrin er de fleste opad hule. Aarsagen til Opadhulheden er delvis, at der paa de første Lasttrin optræder forholdsvis store blivende Forkortelser.

Elasticitetstallet paa Arbejdsliniens stejleste Sted var som Middeltal for Piller opmuret af vanddrukkne og lufttørre Sten (Tabel 9):

	Molersten	Flamsten	
maks E_m {	Kalk-Diatomol ..	10300 ^{at}	17900 ^{at}
	Kalk	13500 -	31300 -
	Kalk-Cement ...	19600 -	52800 -
	Cement	23500 -	69400 -

altsaa voksende med saavel Stenstyrken som Mørtelstyrken.

Elasticitetstallet fandtes som Regel større, naar Stenene ved Henmuringen var lufttørre, end naar de var vanddrukkne.

Stenenes Sammentrykning pr. Længdeenhed ϵ_{st} blev maalt paa Overfladen af 4 Sten i hver Pille (Fig. 9) og fandtes altid mindre end Pillernes, dels fordi Stenenes E i de fleste Tilfælde er større end Mørtlens, dels fordi Spændingen i Pillernes Randzone oftest er mindre end Spændingen i Kærnezonen (Fig. 20).

ϵ_{st} fandtes meget varierende, ikke alene med Stenarten, men ogsaa med Mørtelarten (Fig. 19); desuden varierede den med Stenenes Vaadhed ved Henmuringen (Fig. 15-18). Molerstenenes Sammentrykning var naturligvis langt større end Flamstenenes (Fig. 19), men at Mørtelarten paavirker Stenenes Sammentrykning er ikke umiddelbart forstaaeligt. Forklaringen er, at Mørtlernes Forskellighed i Henseende til Hærtningsmaade, Svind, Adhæsion, Plasticitet m. m. medfører, at Trykket ikke fordeler sig ligeligt over den vandrette Fuge, men hos nogle Mørtler er størst i Fugens Kærnezonen, hos andre i Randzonen, og Stenenes Sammentrykning maa da være tilsvarende uens fordelt.

Trykfordelingen i den vandrette Fuge var hyppigst af den i Fig. 20 viste Art, men ikke altid. De i Kalkmørtel henmurede Sten viste de største overfladiske Sammentrykninger (Fig. 15-19), fordi Kalkmørtel udelukkende hærdner ved Lufttilgang, altsaa fortrinsvis i Fugens Randzone, som derved bliver mere trykoverførende, end hvis Fugen er fyldt med en hydraulisk Mørtel. De øvrige Mørtlers Rækkefølge i Fig. 15-19 er Udtryk for, at Trykkraften i disse Piller i voksende Grad optages af Kærnezonen af de Side 31-35 nævnte Aarsager.

Mørtlens Indfyldelse paa Trykfordelingens Jævnhed er anskueliggjort ved Forsøg med smaa Piller (Fig. 31) opmuret af 3 Cementmørteltærninger i forskellige Mørtler. Den paa Midtertærningens Overflade maalte Sammentrykning fandtes at variere stærkt med Mørtlens Art (Fig. 32). I dette Tilfælde — ikke sugende Flader, unge Mørtler — fandtes Kalkmørtel og Kalk-Cement-Mørtel at give en jævnere Spændingsfordeling end Cementmørtel, men for Kalkmørtlens Vedkommende skete der hurtigt en Knusning i Randzonen, hvorved denne aflastedes, og Sammentrykningen af Tærningens Overflade blev derved mindre (se ogsaa Fig. 34 samt 35a-b); kort Tid efter knustes Mørtlen i hele Fugen, og den knuste Mørtel vandrede hurtigt ud af Fugen, hvis Tykkelse derved forringedes fra 12 til 5^{mm} (Fig. 33). Af disse Forsøg var det ogsaa muligt at drage Slutninger m. H. t. Trykfordelingen i Brudøjeblikket; Trykket var mere eller mindre stærkt koncentreret i Pillens Kærne, og Koncentrationen voksede i Ordenen: Cement, Kalk-Cement, Kalk (Side 59).

Andre Forsøg over Fugematerialets Indfyldelse udførtes med Smaapiller (Fig. 36) opmuret af Molerstenscylindre og med Fuger af enten Cementmørtel eller Gummi (vulkaniseret Kautsjuk). Ogsaa ved disse Forsøg fandtes Cementmørtelfuger at medføre de mindste Sammentrykninger af Stencylindrenes Overflade (Fig. 37); det Elasticitetstal, der udregnedes paa Grundlag af Overflademaalingerne, var ca. 15% mindre, naar Fugerne var af Gummi. Gummifugerne antog straks Tøndeform (Fig. 36) og bevarede denne, indtil Radialkraften blev saa stor,

at Friktionen ved Molerstenene blev overvundet. Naar Friktionen op-hævedes, blev Overfladens Sammentrykninger mindre.

Pillernes Brudmaade er vist i Fig. 21 og nærmere beskrevet i Stykke K.

Revnelasten var gennemsnitlig 78 % af Brudlasten (Tabel 13). Den lodrette Revne i Midterplanet skyldes hyppigst Spændingskoncentration i Pillens Kærne (Fig. 22-23), men ogsaa Bøjningsspændinger kan medvirke (Fig. 24-25).

Pillernes Trykstyrke fremgaar af Fig. 26-28. Stenenes Tørhedsgrad ved Hennemuringen paavirkede Styrken i uens Retning efter Mørtlens Art.

Af Middeltallene for Piller af vanddrukne og Piller af lufttørre Sten fremgaar:

Pillestyrken er ikke proportional med Stenstyrken; den vokser langsommere end denne, navnlig naar Mørtlen er svag (Fig. 27-28). Den vokser ogsaa langsommere end Mørtelstyrken, navnlig naar Stenene er svage; Væksten er proportional med den 4'-6' Rod af Mørtlens Trykstyrke. Det synes unyttigt at forøge Mørtelstyrken udover en vis Værdi, der dog ikke er ens for alle Sten, men vokser med Stenstyrken.

En Formel for Pillestyrkens Afhængighed af Mørtelstyrke og Stenstyrke er opstillet Side 45-46 (Fig. 29-30). Usikkerheden er $\pm 20\%$.

En Sammenligning med andre foreliggende Formler og en Sammenligning af disse indbyrdes viser, at man ikke med nogen rimelig Grad af Sikkerhed kan udregne de af een Forsker fundne Murværksstyrker ved Hjælp af en anden Forskers Formel (Tabel 17-18). Aarsagen er dels, at Formlerne ikke indeholder en Række styrkebestemmende Faktorer — som Stentykkelse og Fugetykkelse, Stenenes Trækstyrke, Adhæsionen mellem Sten og Mørtel samt andre Faktorer, der paavirker Spændingsfordelingen i Brudøjeblikket — dels at Mørtlens Trykstyrke, der indgaar i samtlige Formler, ikke bestemmes paa ens Maade.

Der fremsættes Forslag om helt at afskaffe Mørtelstyrken som karakteriserende Faktor og at gaa bort fra at bestemme Stenstyrken med Halvsten sammenmuret med en tynd Cementfuge. I Stedet foreslaas det at trykprøve 3 hele Sten muret ovenpaa hinanden med 1^{cm} tykke Fuger af standardiseret Mørtel, saaledes at hver Stensort prøves med Kalkmørtel, Cementmørtel og Kalk-Cement-Mørtel. Derved bliver hver Stensort karakteriseret ved 3 Styrketal, der udtrykker, hvor godt Stenen egner sig til at indgaa i en Pille opmuret i den paagældende Mørtel, og formentlig kan man ved Hjælp af disse Styrketal opstille en brugbar Formel til Bestemmelse af Styrken af Murværk af den undersøgte Stensort.

SUMMARY

In *The Laboratory for Building Research at The Danish Royal Technical College* in Copenhagen a series of tests were carried out on brickwork of Moler bricks and of ordinary bricks.

Moler bricks are made by burning a Danish argillaceous earth called »Moler«, which consists of the silicious skeletons of diatoms and clay. The Moler is found on the coasts of the north-western part of the Limfjord in Jutland and was deposited in salt water in the Eocene epoch. Diatomaceous silica deposits are also found elsewhere in Denmark and in other countries, but only on the Limfjord do they occur mixed with clay in such a state that the clay is perfectly evenly distributed among the silica shells, which is of great importance for the use of the Moler for burning into bricks.

Moler bricks are very light in relation to their strength; the density of the bricks most widely used is 800 kg/m³ and the strength 115 kg/cm². They are very fine-pored and heat-insulating, and on account of these properties they have a wide field of application, both in ordinary house building and in the construction of industrial kilns or furnaces.

The ratio between strength of bricks and strength of brickwork being unknown, tests were made on nine months old one-brick piers (Figs. 5 to 8). They did not only comprise a determination of the compressive strength, but of the modulus of elasticity too. By these measurements the deformation of the bricks was also determined (Fig. 9), as it was desirable to prove that the load in the cross section of a brick pier is unevenly distributed.

The compressive strength of the piers was found to increase with the strength of the bricks as well as with the strength of the mortar (Figs. 27 & 29), but it increased more slowly than these figures. Therefore, when the brickwork strength was calculated as a percentage of the strength of the bricks, far higher percentages were found for Moler brickwork than for ordinary brickwork (Fig. 28).

It was attempted to express the brickwork strength as a function of the strength of the bricks and of the mortar.

Under the circumstances prevailing during these tests it was found that the relationship between the compressive strength of the brickwork S_m^c and that of the bricks S_{st}^c could be expressed by the formula:

$$S_m^c = K_1 \frac{S_{st}^c - 0.15 (\max. S_{st}^c - \min. S_{st}^c)}{9.71 + \sqrt{S_{st}^c}}$$

whereas the relationship between the brickwork strength and the compressive strength S_{ju}^c or the bending strength S_{ju}^b of the mortar could be expressed by the formula:

$$S_m^c = K_2 \sqrt[4]{S_{ju}^c} = K_3 \sqrt[3]{S_{ju}^b}$$

By combining these formulae one arrives at:

$$S_m^c = 3.61 \sqrt[4]{S_{ju}^c} \frac{S_{st}^c - 0.15 (\max. S_{st}^c - \min. S_{st}^c)}{9.71 + \sqrt{S_{st}^c}}$$

The strength of the bricks S_{st}^c was determined on cubes made of two half-bricks bedded together and capped with cement mortar, whereas the mortar strengths S_{ju}^c and S_{ju}^b — in contrast with what is generally the case — were determined on bars ($2 \times 2 \times 12$ cm) made from the mortar and immediately on moulding placed between blotting paper, the sucking effect of which represented that of the bricks.

The last named formula gives figures deviating up to plus/minus 20 per cent from the experimental figures, but in practice much greater deviations will have to be reckoned with. A comparison with other available formulae and a comparison of these inter se show that it is not possible with any reasonable degree of certainty to calculate the brickwork strengths found by one investigator by the aid of the formula of another investigator (tables 17 & 18). The cause is partly that the formulae do not contain a number of strength-determining factors — such as thickness of bricks, thickness of joints, tensile strength of bricks, adhesion between bricks and mortar, and several other factors influencing the distribution of stresses at the moment of final failure — and partly that the compressive strength of the mortar, which forms part of all the formulae, is not determined in a standardized manner.

It is proposed completely to do away with the mortar strength as a characterising factor and to leave the method of determining the brick strength on two half-bricks bedded together with a thin cement joint. Instead it is suggested to test for compressive strength three full bricks built on top of each other with 1 cm thick joints of standardized mortar, so that each sort of brick is tested with lime mortar, cement mortar and lime-cement mortar. Thereby each sort of brick will be characterised by three strength figures expressing the degree of suitability of the brick to form part of a pier built with the mortar in question, and presumably it will be possible by means of these strength figures to lay down a formula which can be used for determination of the strength of brickwork.

Crushing of the piers did in no case take place suddenly; it was always foreshadowed by various visible signs of failure. The most important of these signs was a crack in one of the vertical centre planes of the pier (Fig. 21). The crack appeared when the load was about three-quarters of the crushing load. At the last stages vertical cracks appeared also in other planes.

In piers of strong bricks the vertical cracks were as a rule the first signs of failure. In piers of weak bricks the first sign of failure generally was a flaking-off along the top and bottom edges of the bricks.

The chief cause of the formation of cracks was that the pressure gradually concentrated in the core of the pier. Sometimes the formation of cracks was favoured by the mortar of the horizontal joints flowing outward and increasing the horizontal tensile strains in the bricks. In a few cases the horizontal joints were found not to be properly filled, so that bending stresses arose (Fig. 24).

The distribution of stresses at the lower load stages was also uneven, which was ascertained through the measurements on the surfaces of the bricks, curves being made for all the piers, with the measured vertical deformation as abscissa and the mean stress P/F as ordinate (Figs. 15 to 18). If the stress at the point of measurement had been equal to the mean stress P/F the curves for a given sort of brick ought to have been identical, but that was not the case; the deformation at a given load varied greatly with the sort of mortar in which the bricks were laid (Fig. 19).

The stress at the point of measurement must thus have varied very differently from the mean stress. The causes hereof are the subject of discussion.

In most cases the measured deformations were found to be too small. One of the causes for this was the drying of the piers surface, which involved shrinkage so that the stress at the point of measurement became lower than the mean stress.

In some cases the measured deformations were found to be too large. This was the case of brickwork in lime mortar, and the cause for this was that lime mortar is an air mortar, which hardens from the surface, so that the mortar of the edge zone becomes stiffer than that of the core zone, whereby the stress at the point of measurement became greater than the mean stress. However this applied only during the first stages of the test; later the reverse was the case.

The modulus of elasticity of the piers. At the first stages the deformation was as a rule greater than at those immediately following. This was presumably due to the fact that the first load caused relatively great permanent deformations. Apart from this period of adaptation, the

deformation was found to increase faster than the load. As might be expected, the modulus of elasticity of the piers was found to increase with the strength of the mortar and the strength of the bricks, and the increase with the mortar strength was most rapid for the strong bricks. Moreover, the modulus of elasticity was found, to a certain degree, to increase with the degree of dryness of the bricks when they were laid, because the density of the mortar and its adhesion to the bricks was increased by the suction of the bricks.

Data of the materials used in the experiments and of the numerical values of the test results are given in the following:

Properties of bricks.

	Moler bricks	Ordinary bricks
Density when perfectly dry	800 kg/m ³	1740 kg/m ³
Specific gravity	2.20 g/cm ³	2.74 g/cm ³
Pore volume	63.9 per cent	37.6 per cent

The Moler bricks were found to be hygroscopic, in contrast with ordinary bricks (Figs. 1a & 1b); the amount of water absorbed in moist air was 6.6 per cent by volume.

The ordinary bricks had coarser pores than the Moler bricks and so absorbed the mortar water faster.

	Moler bricks	Ordinary bricks
Modulus of elasticity by compression 20 000 kg/cm ²		Not determined
Compressive strength		
Bonded half-bricks S_{st}^c	116 -	426 kg/cm ²
5 cm cylinders ($h = d$),		
perfectly dry	95 -	431 -
after one week in moist air ...	73 -	370 -
after one week in water	71 -	390 -
Bending strength		
Full bricks		
perfectly dry	15.4 -	61.5 -
room-dry, S_{st}^b	13.0 -	53.2 -
after one week in moist air ...	11.6 -	48.0 -
after one week in water	9.5 -	55.5 -

As to strength, the Moler bricks were very much alike, whereas the ordinary bricks differed greatly; for both sorts of brick the bending

strength was found to be about 15 per cent of the compressive strength when the latter was determined on 5 cm cylinders.

Brickwork Tests.

The test specimens — 32 in all — were ten-course one-brick piers. The bricks were of Danish standard size: 23 × 11 × 5.5 cm. Sixteen piers were built of Moler bricks, sixteen of ordinary bricks. Four different mortars were used. With each mortar eight piers were built, four of water-saturated bricks and four of air-dry bricks.

The mortars water contents were adjusted to the type and dryness of the bricks. Air-dry ordinary bricks required a wetter mortar than air-dry Moler bricks; this difference was due to the faster suction of the ordinary bricks; no difference was found when the bricks were water-saturated. Lime mortar required most water, cement mortar least. The contents of cementing material in the mortars per 100 grammes of sand were as follows:

	Sand	Ca(OH) ₂	Diatomol	Cement	Cementing material, in all
Lime-Diatomol mortar	100	10	15		25
Lime mortar	100	8.7			8.7
Lime-cement mortar	100	6		10.5	16.5
Cement mortar	100			33.3	33.3

Diatomol is air-dried, pulverised and air-separated Moler; lime mortar with a suitable addition of Diatomol retains the water much better than does pure lime mortar and is therefore suited for the laying of bricks with great suction. The strengths of the mortars were determined on 2 × 2 × 12 cm bars moulded of the mortar and immediately thereafter exposed to suction from blotting paper. The bars and piers were stored together and tested simultaneously. The fact that each of the four mortars was made with three different quantities of water did not essentially influence the strengths because of the suction from the blotting paper. The mean values were the following (see also Figs. 3 & 4):

	Bending strength S_{fu}^b	Compressive strength S_{fu}^c	$\frac{S^b}{S^c}$
Lime-Diatomol mortar	5.2 kg/cm ²	6.9 kg/cm ²	0.75
Lime mortar	6.5 -	10.8 -	0.60
Lime-cement mortar ..	18.0 -	46.2 -	0.39
Cement mortar	76.0 -	258 -	0.29

The state of the piers when tested was as follows:

	Moler bricks	Ordinary bricks
Age	9 months	9 months
Appearance	Figs. 5 & 6	Figs. 7 & 8
Thickness of joints	1.03 cm	1.11 cm
Water content by volume....	4.33 per cent	0.92 per cent
Density	997 kg/m ³	1726 kg/m ³

The ordinary bricks in the piers contained far less water than the Moler bricks, and the lime mortar in the piers contained much less water than any of the other mortars.

The modulus of elasticity E_m of the brickwork, determined as the inclination of the stress-strain curves at the steepest point, were, as mean figures for piers built of water-saturated bricks and piers built of air-dry bricks:

	Moler bricks	Ordinary bricks
Lime-Diatomol mortar ...	10 300 kg/cm ²	17 900 kg/cm ²
Lime mortar	13 500 -	31 300 -
Lime-cement mortar	19 600 -	52 800 -
Cement mortar	23 500 -	69 400 -

Udgivet af
Akademiet for de Tekniske Videnskaber og Dansk Ingeniørforening

1939.

1. *A. Howard Grøn*: Raastoføkonomi og Dansk Naaletrædyrkning (Pris Kr. 1,00).
2. *H. Baggesgaard Rasmussen*: Medicinfabrikation i Danmark (Pris Kr. 1,00).
3. *A. H. M. Andreasen*: The fineness of solids and the technological importance of fineness (Pris Kr. 6,00).
4. *Jul. Hartmann*: The acoustic air-jet generator (Pris Kr. 15,00).

1940.

1. *H. P. Christensen*: Om Betydningen af et dansk Staal- og Valseværk og de tekniske og økonomiske Muligheder herfor (Pris Kr. 2,00).
2. *Søren Berg*: Studies on Particle-size Distribution (Pris Kr. 9,00).
3. *E. Suenson*: Staalsortens Indflydelse paa Jærnbetonbjælkens Styrke og Deformationer (Pris Kr. 4,00).
4. *I. A. Rimstad*: Zur Bemessung des doppelten Spundwandbauwerkes (Pris Kr. 7,50).
5. *P. O. Pedersen*: Lydtekniske Undersøgelser i Aarene 1935—40 i Den polytekniske Lærestalts Laboratorium for Telegrafi og Telefoni (Pris Kr. 6,00).

1941.

1. *K. A. Bondorff*: Gødningsproblemet for dansk Landbrug (Pris Kr. 2,00).
2. *Holger Møllgaard*: Om Folkeernæring (Pris Kr. 3,00).
3. *Kj. Prytz*: The padding condenser (Pris Kr. 6,00).

1942.

1. *Jul. Hartmann* in cooperation with *K. Agersted* and *Freimut Lazarus*: Atomization (Pris Kr. 4,00).
2. *K. Erik Jensen*: Om Spildevandsrensning særlig med Henblik paa Danmark i de senere Aar. Mit einer Zusammenfassung (Pris Kr. 3,00).
3. *Chr. Ostenfeld*: Forsøg med Pæle ved Aggersundbroen og ved Langenæstunnelen. Avec un resumé. (Pris Kr. 9,00).
4. *Walter Engel & Niels Engel*: Die praktische Anwendung des Schmelzspiegel Verfahrens zur Eisen- und Stahlerzeugung (Pris Kr. 6,00).

1943.

1. *E. Bramslev*: Die Absorptionsgeschwindigkeit des Wasserdampfes in Calciumchloridlösungen. (Pris Kr. 3,00).
2. *Anker Engelund*: Broen over Ulvsund, Dronning Alexandrines Bro. With an english summary. (Pris Kr. 6,00).
3. *Fr. Jahnsen*: Indhaling af uarmerede Telefonkabler i Cementrørledninger. With an english summary. (Pris Kr. 7,50).
4. *H. Stevenius-Nielsen*: On the modern Chemistry of the Manufacture of Superphosphate. (Pris Kr. 2,00).
5. *H. Stevenius-Nielsen*: Some Recent Developments in the Chemistry of the Manufacture of Sulphuric Acid (The Nitration Process). (Pris Kr. 3,00).

1944.

1. *E. Suenson* og *H. Dührkop*: Forsøg med Murværk af Molersten og almindelige Teglst. (Pris Kr. 4,50).
2. *Jul. Hartmann* og *L. Logstrup Jensen*: The large capacity Jet-wave commutator. I. (Pris Kr. 12,00).