

ABK Afdelingen for Bærende Konstruktioner
Department of Structural Engineering
Danmarks Tekniske Højskole · Technical University of Denmark

Forskydning i armerede tegl bjælker

Per Kastrup Nielsen

Henrik Elgaard Jensen

Claus Schmidt

M.P. Nielsen

Serie R

No 306

1993

Forskydning i armerede teglbjælker

Per Kastrup Nielsen

Henrik Elgaard Jensen

Claus Schmidt

M. P. Nielsen

Juli 1993

Forskydning i armerede teglbjælker

Copyright © by Per Kastrup Nielsen, Henrik Elgaard Jensen, Claus Schmidt, M.P. Nielsen, 1993

Tryk:

Afdelingen for Bærende Konstruktioner

Danmarks Tekniske Højskole

Lyngby

ISBN 87-7740-138-7

Resumé

I denne rapport beskrives forskydningsforsøg med teglbjælker. Trepunkts-belastede teglbjælkers forsøgsmæssige bæreevne sammenlignes med en øvre værdiløsning bestemt vha. Coulombs modificerede flydebetingelse. To forskellige stenstyrker er benyttet.

Summary

In this report shear tests on masonry beams are presented. The carrying capacity determined by three-point load tests is compared with an upper bound solution determined by means of the modified Coulomb failure criterion. Two types of bricks with different strengths have been used.

Symbolliste

a	Forskydningsspændvidde
b	Bredde
c	Kohæsion
E_0	Elasticitetsmodul
f_c	Trykstyrke
f_t^b	Bøjningstrækstyrke
f_y	Flydespænding
F	Belastning
h	Murstenslængde, bjælkehøjde
K	Belastning
L	Belastning
P	Belastning, bæreevne
t	Tykkelse
T	Flydekraft
u	Flytningsvektor
W_I	Indre arbejde
α	Vinkel mellem flytningsvektor og flydelinie
β	Hældning af flydelinie
ϵ	Tøjning
μ	Friktionskoefficient
μ_f	Anisotropiforhold (facadeflade/lejeflade)
μ_k	Anisotropiforhold (kopende/lejeflade)
μ_p^c	Trykstyrkers anisotropiforhold (studspille/liggepille)
μ_p^E	Elasticitetsmodulers anisotropiforhold (studspille/liggepille)
μ_p^e	Tøjningers anisotropiforhold (liggepille/studspille)
v	Effektivitetsfaktor
ρ	Geometrisk armeringsforhold
σ	Normalspænding, sidelast
τ	Forskydningsspænding
Φ	Armeringsgrad

Nedre indices

b	Brud
f	Facadeflade
k	Kopende
l	Lejeflade, liggefugepille
s	Studsfugepille
u	Uden sidelast

Øvre indices

E	Elasticitetsmodul
e	Tøjning

Indholdsfortegnelse

Forord	1
1. Indledning	2
2. Materialernes egenskaber	5
2.1. Mørtel	5
2.2. Stenene	7
2.3. Murværk	12
2.4. Murværkets forskydningsstyrke	17
2.5. Diskussion af materialeforsøgene	24
3. Bjælkeforsøg	25
3.1. Forsøgsprogram	25
3.1.1. Fremstilling af bjælker	26
3.1.2. Målinger	26
3.1.3. Forsøgsgangen	27
3.1.4. Behandling af forsøgmålingerne	34
3.2. Øvreværdier	36
3.2.1. Teori	36
3.2.2. Bestemmelse af øvreværdier	38
3.3. Diskussion af bjælkeforsøg	40
Referencer	42

The following information is provided for your information:

1. The following information is provided for your information:

2. The following information is provided for your information:

3. The following information is provided for your information:

4. The following information is provided for your information:

5. The following information is provided for your information:

6. The following information is provided for your information:

7. The following information is provided for your information:

8. The following information is provided for your information:

9. The following information is provided for your information:

10. The following information is provided for your information:

11. The following information is provided for your information:

12. The following information is provided for your information:

13. The following information is provided for your information:

14. The following information is provided for your information:

15. The following information is provided for your information:

16. The following information is provided for your information:

17. The following information is provided for your information:

18. The following information is provided for your information:

Forord

Dette notat indeholder de hovedresultater, som blev opnået i forbindelse med forsøg med teglbjælker udført i foråret 1990 som en del af et afgangsprøveprojekt [10] på Afdelingen for Bærende Konstruktioner (ABK), DTH.

Projektet blev udført med Professor, Dr. Techn. M. P. Nielsen som vejleder. Kalk- og Teglværkslaboratoriet og Wewers Teglværker stillede materialer og arbejdskraft til rådighed.

Lic. Techn. Henrik Elgaard Jensen stillede under hele projektet sin viden og erfaring velvilligt til rådighed.

Der rettes en tak til alle ansatte i ABK's forsøgshal, som udførte en stor del af det praktiske arbejde.

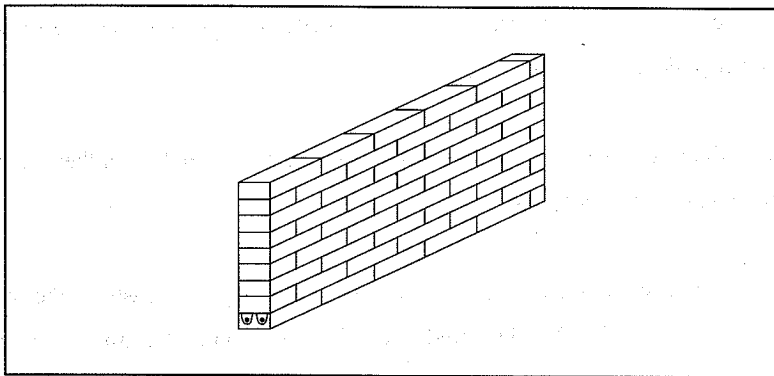
Yderligere oplysninger om forsøgsmetoder og resultater kan indhentes fra førnævnte eksamensprojekt [10].

Første udkast til denne rapport er skrevet af Civ.ing. Per Kastrup Nielsen. Rapporten er derefter bearbejdet af Civ.ing. Claus Schmidt. Øvrige forfattere har bidraget med kommentarer, forslag til rettelser mv.

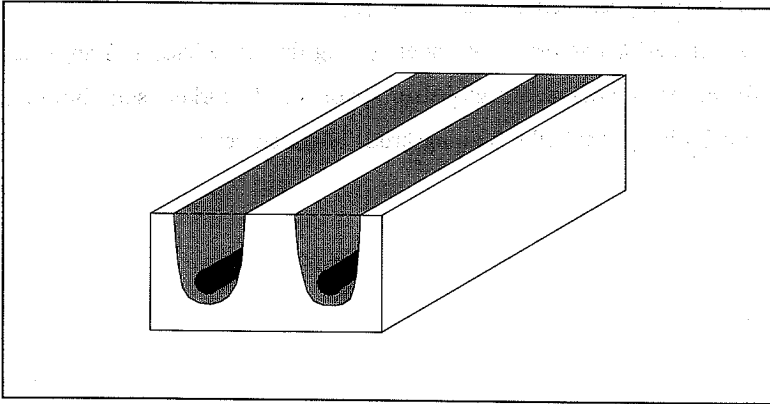
1. Indledning

I dette notat præsenteres først de ved forsøg fundne materialeparametre. Herefter præsenteres den teoretiske bæreevne efterfulgt af en beskrivelse af teglbjælkeforsøgene, og afslutningsvis sammenlignes de målte bæreevner med den teoretisk beregnede bæreevne.

Teglbjælketypen, der blev lavet forsøg med, består af en tegloverligger og 8 påmurede murstensskifter, se figur 1.1 . Tegloverliggeren består af specielt konstruerede mursten, hvori der er lavet riller/udhulinger, som to armeringsstænger indstøbes i, jvf. figur 1.2.



Figur 1.1. Snit gennem teglbjælke.



Figur 1.2. Specielt konstrueret mursten til tegloverligger.

Teglbjælker benyttes til at spænde over vinduer, døre og andre former for muråbninger. Princippet er, at armeringen i tegloverliggeren skal optage de trækspændinger, som opstår i undersiden af bjælken, når den spænder mellem to understøtninger.

Kendskabet til armerede teglbjælkers bæreevne er ikke særlig omfangsrigt. Armerede teglbjælker er således kun nævnt i Murværksnormen DS 414, afsnit 6.9 om overliggere, ved en henvisning om at "bæreevnen fremgår af den for overliggeren, med et antal påmurede skifter, udarbejdede varedeklareration". Den angivne bæreevne bygger på antagelsen om, at bjælkerne bryder på grund af bøjning, idet der regnes med en kombineret last fra egenvægt og nyttelast. Beregningsmetoden er på den sikre side og derfor brugbar i praksis. Imidlertid har tidligere forsøg vist, at brud sker ved

forskydning, her henvises til [1] og [8].

Det er derfor interessant at undersøge og derved udvide erfaringerne ved forsøg med armerede teglbjælker, hvor såvel styrken som brudformen (forskydningsbrud eller bøjningsbrud) bliver studeret.

2. Materialernes egenskaber

2.1. Mørtel

Dette afsnit beskriver de resultater, som blev fundet ved forsøg med mørtlen.

Den anvendte mørtel, var en tørmørtel med betegnelsen KC 20/80/550.

Målingerne blev udført af - og på - Kalk- og Teglværkslaboratoriet (KTL).

Der blev lavet to forsøgsserier med mørtlen, og de blev foretaget i forbindelse med de i afsnit 2.3 omtalte bøjningstrækforsøg. Den første forsøgsserie betegnes som 'vægge 1' og den anden som 'vægge 2'. Mørtlen blev undersøgt både i frisk og i hærtnende tilstand.

I denne sammenhæng betegner 'frisk mørtel', den tilstand mørtlen er i ca. et kvarter efter blandingens ophør, indtil den sidste måling er foretaget 3 timer senere. 'Den hærtnende mørtel' betegner den tilstand mørtlen er i efter 28 ± 1 dage.

Resultaterne fremgår af skema 2.1.1 og skema 2.1.2 .

2. Materialernes egenskaber

	Enhed	Vægge 1	Vægge 2
		KC 20/80/550	KC 20/80/550
Vandtilsætning	%	16.3	16.3
Densitet	kg/m ³	2140	2143
Vandholdeevne	g	5.4	5.9
1 time Vandudskillelse	g	2.9	3.8
3 timer	g	0.3	0.3
Luftindhold KTL	g	2.4	2.3
Luftindhold P-ur	g	2.2	1.8
Konsistens	-	1.75	1.79

Skema 2.1.1. Den friske mørtels egenskaber.

	Enhed	Vægge 1		Vægge 2	
		KC 20/80/550		KC 20/80/550	
	Enhed	-	Spredning %	-	Spredning %
Densitet	kg/m ³	2013	0.5	1966	0.3
Bøjnings-trækstyrke	MPa	5.2	7.1	5.0	11.3
Trykstyrke	MPa	21.3	10.3	19.7	10.9
Vandindhold	%	2.16	-	1.92	-
Karbonatiseringsgrad	%	36	-	36	-

Skema 2.1.2. Den hærdnende mørtels egenskaber.

2.2. Stenene

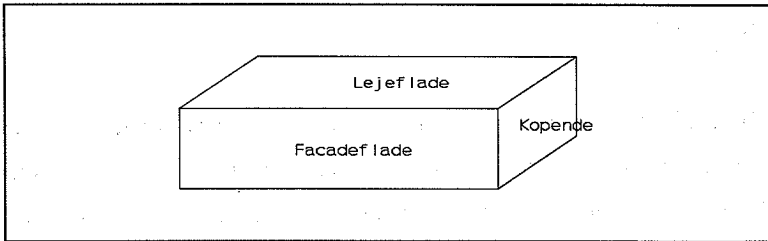
Dette afsnit beskriver de forsøgsresultater, som blev fundet ved undersøgelser af de to typer sten, som anvendtes til de i afsnit 3.2 beskrevne bjælkeforsøg. Stenene var BS-røde mursten estimeret til stenklasse 15, samt BS-gule mursten estimeret til stenklasse 30 (BS = Blødstrøgne).

Resultaterne af de af KTL udførte forsøg er vist i skema 2.2.1.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
Minut- sugning	kg/m ³	2.7	4.7	3.9	1.6
Længde	mm	228	0.5	229	0.5
Højde	mm	54	2.1	55	1.7
Bredde	mm	109	1.0	109	0.7
Densitet	kg/m ³	1670	0.9	1606	0.5
Vand- optagelse	%	25	2.9	31	1.8

Skema 2.2.1. Egenskaber for mursten.

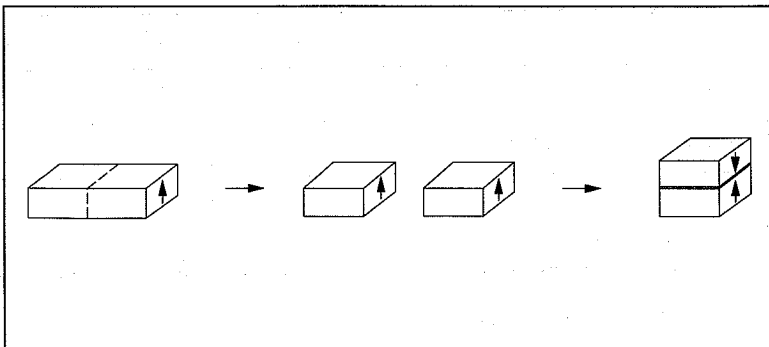
Trykstyrken af stenene blev bestemt ved forsøg på ABK, hvor alle tre flader blev prøvet, dvs. lejefladen, facadefladen og kopenden, se figur 2.2.1. Der blev udført 30 forsøg for hver stentype.



Figur 2.2.1. Definition af fladenavne.

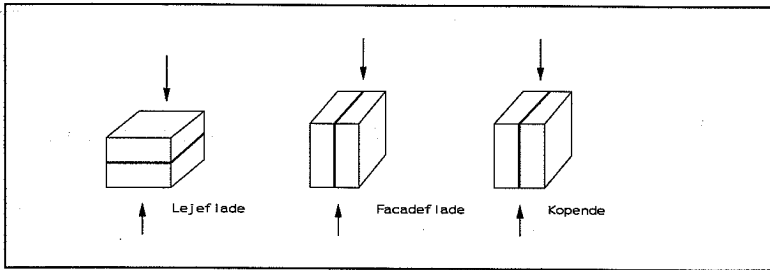
Trykstyrken af blødstrøgne mursten kan variere meget, efter hvorledes de er brændt. Som en følge heraf foreskriver DS 438.11 en særlig fremgangsmåde ved bestemmelse af trykstyrken.

Prøvelegemerne fremstilles ved at halvere en enkelt sten med en stensav under vandspuling. Den ene halve sten drejes 180° omkring murstenens længdeakse, hvorefter den mures oven på den anden halvdel **uden** yderligere drejning, se figur 2.2.2.



Figur 2.2.2. Fremstilling af prøvelegemer.

På figur 2.2.3 kan de forskellige trykretninger ses.



Figur 2.2.3. Trykretninger.

Skema 2.2.2 viser resultaterne fra trykprøverne.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
f_{cl}	MPa	14.4	6.7	27.5	13.8
f_{ck}	MPa	15.9	10.3	30.4	11.3
f_{cf}	MPa	17.1	15.4	31.7	12.8
Angivet stkl.	MPa	15	-	30	-
Fundet stkl.	MPa	14	-	27	-
μ_k	-	1.10	-	1.11	-
μ_f	-	1.19	-	1.15	-

Skema 2.2.2. Trykstyrker.

Anisotropiforholdene μ_k og μ_f i skema 2.2.2 er bestemt af

$$\mu_k = \frac{f_{ck}}{f_{cl}} \quad \mu_f = \frac{f_{cf}}{f_{cl}} \quad (2.2.1)$$

For hvert forsøg blev deformationen målt, og tøjningen bestemtes af

$$\varepsilon = \frac{\text{deformationen}}{\text{højde af prøvelegeme}} \quad (2.2.2)$$

I skema 2.2.3 er målingerne for brudtøjningen og de heraf fundne anisotropiforhold vist.

Ud fra den målte arbejdslinie er E_o bestemt. Resultaterne fremgår af skema 2.2.4.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
ε_{bl}	‰	8.8	11.9	9.5	9.2
ε_{bf}	‰	7.4	15.4	7.8	17.0
ε_{bk}	‰	7.9	11.3	8.3	15.1
μ_f^e	-	1.18	-	1.22	-
μ_k^e	-	1.11	-	1.09	-

Skema 2.2.3. Brudtøjninger og tilhørende anisotropiforhold.

		BS-RØD		BS-GUL	
	Enhed	-	Spredning %	-	Spredning %
E_{ol}	MPa	1606	11.9	2943	12.5
E_{of}	MPa	2318	15.6	4441	18.3
E_{ok}	MPa	2052	13.4	3752	13.1
μ_f^E	-	1.44	-	1.51	-
μ_k^E	-	1.28	-	1.27	-

Skema 2.2.4. E-moduler og anisotropiforhold.

Anisotropiforholdene i skema 2.2.3 og 2.2.4 er bestemt af

$$\mu_f^E = \frac{\epsilon_{bl}}{\epsilon_{bf}} \quad \mu_k^E = \frac{\epsilon_{bl}}{\epsilon_{bk}} \quad (2.2.3)$$

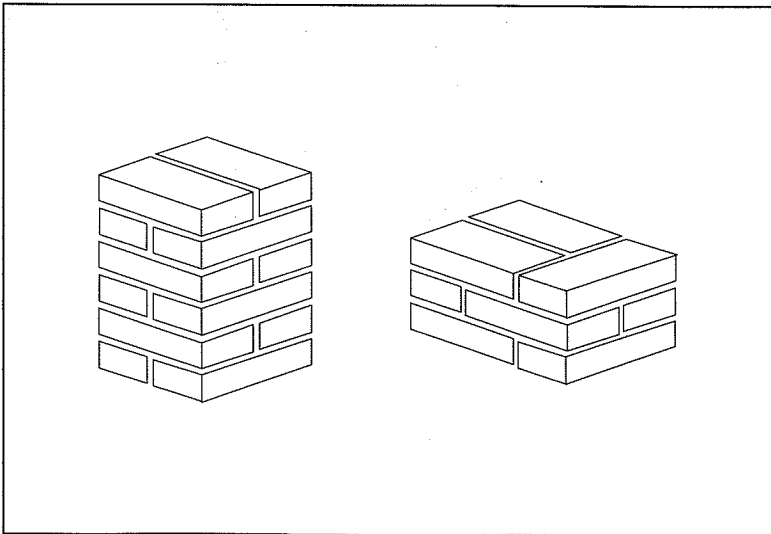
$$\mu_f^E = \frac{E_{of}}{E_{ol}} \quad \mu_k^E = \frac{E_{ok}}{E_{ol}} \quad (2.2.4)$$

2.3. Murværk

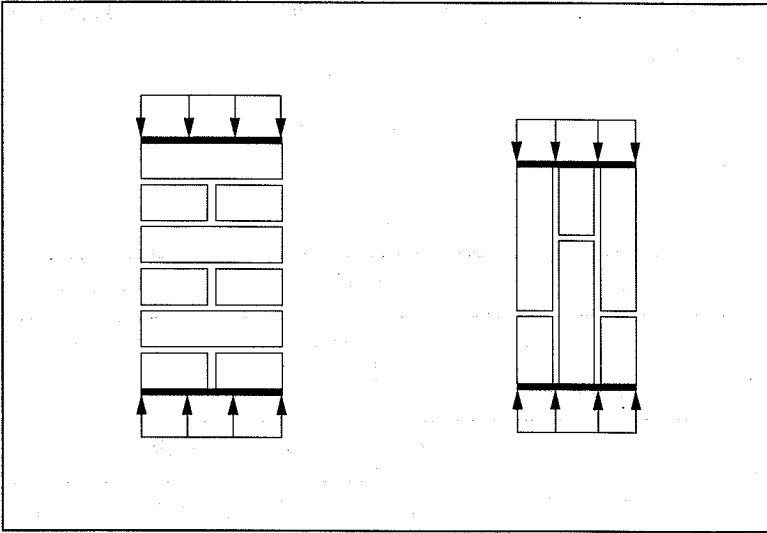
For både BS-røde og BS-gule mursten blev murværkets trykstyrke og bøjningstrækstyrke bestemt. Dette blev gjort både for ligge- og studsfuger. Ved bestemmelsen af bøjningstrækstyrken blev metoden angivet i DS 438.15 benyttet.

Trykstyrken vinkelret på liggefugernes plan blev bestemt efter den i DS 438.14 angivne forskrift, og en analog fremgangsmåde udviklet af Henrik Elgaard Jensen [5] blev anvendt ved bestemmelsen af trykstyrken vinkelret på studsfugernes plan.

Der blev fremstillet 3 prøvelegemer af hver type forsøgslegeme for hver type mursten. I figur 2.3.1 er forsøgslegemerne til trykstyrkeforsøgene vist, og figur 2.3.2 viser lastretningen på forsøgslegemerne.



Figur 2.3.1. Ligge- og studsfugepiller til trykstyrkeforsøg.



Figur 2.3.2. Lastretning på prøvelegemer ved trykstyrkeforsøg.

I skema 2.3.1 og 2.3.2 er de målte trykstyrker, tøjninger og elasticitetsmoduler vist.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
f_{cl}	MPa	10.0	2.7	15.0	14.3
f_{cs}	MPa	8.8	15.1	14.8	9.5
μ_p^c	-	0.88	-	0.99	-

Skema 2.3.1. Trykstyrke og anisotropiforhold for ligge- og studspiller.

Anisotropiforholdet for ligge- og studspillers trykstyrke i skema 2.3.1 er bestemt af

$$\mu_p^c = \frac{f_{cs}}{f_{cl}} \quad (2.3.1)$$

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
E_{ol}	MPa	1206	2.9	3119	4.1
E_{os}	MPa	1385	12.9	3391	5.7
ϵ_{bl}	‰	5.8	1.6	9.6	4.4
ϵ_{bs}	‰	4.9	14.2	6.5	7.0
μ_p^E	-	1.15	-	1.09	-
μ_p^e	-	1.19	-	1.48	-

Skema 2.3.2. E-moduler og brudtøjninger for piller.

Anisotropiforholdene i skema 2.3.2 er bestemt af

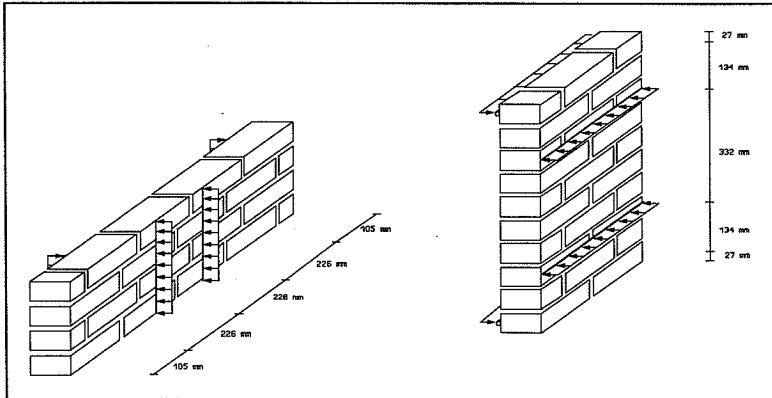
$$\mu_p^E = \frac{E_{os}}{E_{ol}}, \quad \mu_p^e = \frac{\epsilon_{bl}}{\epsilon_{bs}} \quad (2.3.2)$$

hvor ϵ_{bl} og ϵ_{bs} betegner brudtøjningerne på hhv. ligge- og studspiller.

Til bestemmelse af trækstyrken for murværket i ligge- og studsfugerne blev

de i figur 2.3.3 viste vægge brugt, hvilke svarer til de i DS 438.15 anviste typer.

Der blev fremstillet tre prøvelegemer med BS-røde sten og tre med BS-gule sten til hver type trækforsøg. Lasten blev påsat som vist i figur 2.3.3.



Figur 2.3.3. Vægge til bestemmelse af bøjningstrækstyrken i studs- og liggefugerne.

I skema 2.3.3 er forsøgsresultaterne vist.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		-	Spredning %	-	Spredning %
f_{tl}^b	MPa	0.22	15.1	0.14	15.7
f_{ts}^b	MPa	0.92	8.1	0.98	9.6

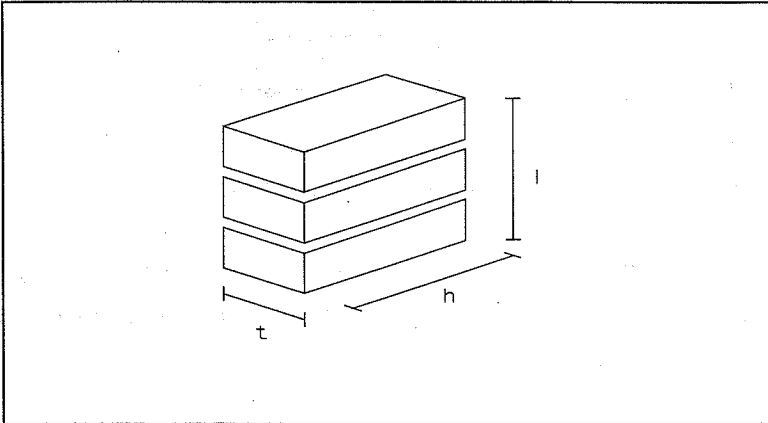
Skema 2.3.3. Bøjningstrækstyrker i ligge- og studsfiger.

Bøjningstrækstyrken er fundet af

$$\text{Bøjningstrækstyrke} = \frac{\text{Moment}}{\text{Modstandsmoment}} \quad (2.3.3)$$

2.4. Murværkets forskydningsstyrke

For både BS-røde og BS-gule mursten blev murværkets forskydningsstyrke bestemt. Dette blev gjort ved forsøg med prøvelegemer, som vist i figur 2.4.1.

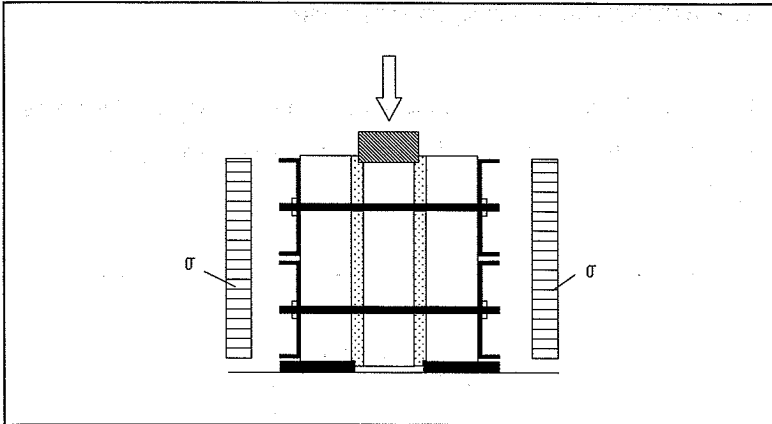


2.4.1. *Prøvelegemer til forskydningsforsøg.*

Ved forsøgene bestemtes to af materialekonstanterne i Coulombs modificerede brudkriterium, nemlig kohæsionen c , og friktionskoefficienten μ , se formel (2.4.1).

Forsøgene er næsten identiske med de af Comité Européen de Normalisation (CEN) beskrevne forsøg, [2].

Selve forsøget består i at belaste den midterste sten, mens de to yderste sten understøttes. Forsøgsopstillingen er vist i figur 2.4.2.



2.4.2. Forsøgsopstilling til bestemmelse af forskydningsstyrken.

Der blev lavet 12 forsøg uden sidelast ($\sigma=0$). I de resterende 18 forsøg blev der påsat sidelast som vist i figur 2.4.2. I skema 2.4.1 er resultaterne af forsøgsserien vist.

Sidelast (σ) MPa	0	0.13	0.52	1.00
Stenklasse				
15	6	3	3	6
30	6	-	-	6

Skema 2.4.1. Typer og antal til forskydningsstyrkeforsøg.

Sidelasten påførtes vha. 4 U-jern og 4 gevindstænger. Midt på gevindstængerne var gevindet slebet af for at give plads til en strain-gaugebro.

Sidelasten blev påført ved at spænde U-jernene mod prøvelegemet, samtidig

med at de på gevindstængerne påsatte strain-gauge blev aflæst. Idet sammenhængen mellem det målte signal fra strain-gaugene og kraften i stængerne var kendt fra en tidligere gennemført kalibrering, kunne U-jernene spændes til den ønskede sidekraft var opnået.

I skema 2.4.2 og skema 2.4.3 er forsøgsresultaterne vist.

		BS-RØD			
Start sidelast		0	0.13	0.52	1.00
Enhed		MPa			
$\tau_{b,middel}$	MPa	0.65	1.23	1.70	1.98
Std.	%	23.2	11.5	19.1	8.0
$\sigma_{b,middel}$	MPa	0	0.61	0.79	1.22
Std.	%	-	34.7	24.8	9.5

Skema 2.4.2. Murværkets forskydningsspænding $\tau_{b,middel}$ og spændingen $\sigma_{b,middel}$ i armeringsstængerne i adskillelesøjeblikket for prøvelegemer af BS-røde sten (middelstyrken).

		BS-GUL	
	Start sidelast	0	1.00
	Enhed	MPa	
$\tau_{b,middel}$	MPa	0.53	1.83
Std.	%	23.9	14.6
$\sigma_{b,middel}$	MPa	0	1.15
Std.	%		

Skema 2.4.3. Murværkets forskydningsspænding $\tau_{b,middel}$ og spændingen $\sigma_{b,middel}$ i armeringsstængerne i adskillelesøjeblikket for prøvelegemer af BS-gule sten (middelstyrken).

Denne forsøgserie havde, som tidligere nævnt, til formål at bestemme materiale-konstanterne μ og c , der indgår i Coulombs modificerede brudkriterium, som angiver sammenhængen mellem forskydningsspændingen og normalspændingen

$$|\tau| = c - \mu \sigma \quad (2.4.1)$$

Konstanterne bestemmes vha.

$$\tau = \frac{L}{2ht} \quad (2.4.2)$$

$$\sigma = -\frac{K}{ht} \quad (2.4.3)$$

hvor K og L er belastninger, og ht er arealet af en murstens lejeplade, se iøvrigt figur 2.4.1 og 2.4.2.

Da den påsatte sidelast K er nul i forsøgene uden sidelast, kan c findes umiddelbart af brudlasten, idet

$$c = \tau_b = \frac{L_{bu}}{2ht} \quad (2.4.4)$$

hvor L_{bu} er brudlasten uden sidelast.

I skema 2.4.4 vises middelværdien af den målte kohæsion uden sidelast.

	BS-RØD		BS-GUL	
	-	Spredning	-	Spredning
c	0.65 MPa	23.2 %	0.53 MPa	23.9 %

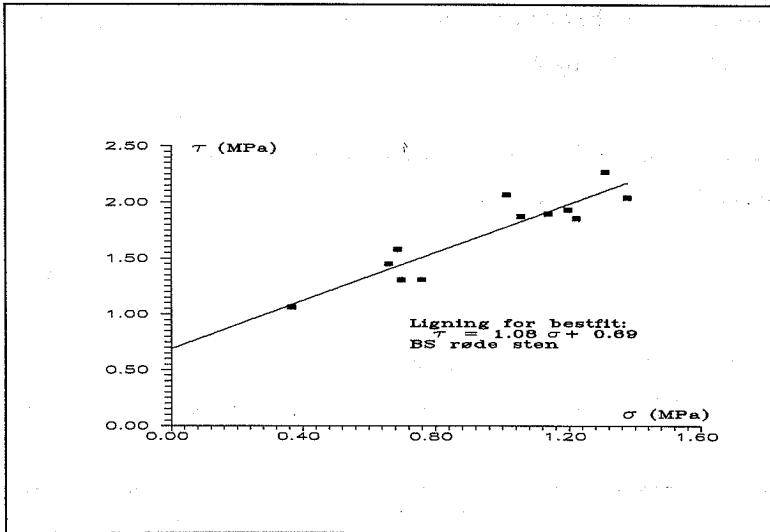
Skema 2.4.4. Målt kohæsion fra forsøg uden sidelast, dvs. $\sigma=0$.

Forsøgene med påsat sidelast giver

$$\mu = \frac{\tau_b - c}{\sigma_b} \quad (2.4.5)$$

hvor τ_b er forskydningsspændingen i brudøjeblikket og σ_b er normalspændingen i brudøjeblikket.

På figur 2.4.3 er sammenhængen mellem forskydningsspændingen og normalspændingen i adskillelsesøjeblikket vist for forsøgene med sidelast på BS-røde sten. Der er indlagt en bestfit-linie mellem målepunkterne.



Figur 2.4.3. Sammenhængen mellem forskydningspændingen og normalspændingen i adskillelseøjeblikket for $\sigma > 0$. Stentype BS-rød.

Ligningen for bestfit-linien giver umiddelbart materialekonstanterne. Det bemærkes, at bestfit-liniens skæringspunkt med τ -aksen, c , svarer ganske godt overens med den fundne værdi fra forsøgene uden sidelast, se skema 2.4.4 og skema 2.4.5. Der er derfor lavet et estimat baseret på alle forsøgsresultaterne for BS-røde sten.

For forsøgene med BS-gule sten gav resultaterne ikke umiddelbart samme sammenhæng, som ovenfor beskrevet. En bestfit-linie for forsøgene med sidelast gav ikke umiddelbart kohæsionskonstanten c . Dette kan bedst forklares ved, at forsøgsmængden ikke indeholdt tilstrækkelig σ -variation. Estimeres der en bestfit sammenhæng baseret på samtlige resultater for forsøgene med BS-gule sten, fås en sammenhæng, der svarer godt til den

for BS-røde sten fundne.

	Enhed	BS-RØD		BS-GUL	
		$\sigma > 0$	$\sigma \geq 0$	$\sigma > 0$	$\sigma \geq 0$
c	MPa	0.69	0.65	-	0.52
μ	-	1.08	1.12	-	1.14

Skema 2.4.5. Målte materialekonstanter.

Kolonnerne med $\sigma \geq 0$ skal forstås således, at både forsøg med som uden sidelast er medregnet.

2.5. Diskussion af materialeforsøgene

Følgende resultater efter forsøg med stenene skal udtrages.

Som det ses giver anisotropiforholdene, at der er den samme sammenhæng mellem f_c , E_o og ϵ_b for de to stentyper.

Endvidere skal det fremhæves, at vandoptagelsesevnen er størst for BS-gule sten, hvilket naturligvis også genfindes ved minutsugningen.

En større minutsugning betyder, at mørtlen hurtigere bliver 'suget død', hvorved vedhæftningen mellem sten og mørtel nedsættes.

En større trækstyrke for murværk kan ikke umiddelbart forventes som følge af en større trykstyrke. For trækstyrkeforsøgene er det vedhæftningen mellem sten og mørtel, der er afgørende. Dette kunne konstateres, ved at se på måden prøvelegemerne brød på. I liggefugeforsøgene brød prøvelegemerne med BS-røde sten både i skillefladen og lidt i stenen, hvorimod prøvelegemerne med BS-gule sten udelukkende brød i skillefladen. I studsfugeforsøgene brød prøvelegemerne med BS-røde sten i en lige linie gennem stenene, mens brudlinien for prøvelegemer med BS-gule sten søgte hen imod skillefladerne.

Forskydningsstyrkeforsøgene viste, at det var muligt at finde en lineær sammenhæng mellem normal- og forskydningsbrudspændingen. Den fundne kohæsion var mindre for BS-gule sten end for BS-røde sten. Dette skyldes, at minutsugningen er større for BS-gule sten.

Sammenlignes de fundne størrelser med de i murværksnormen angivne, ses det, at de fundne er markant større. Her angives det, at kohæsionen kan regnes som 0.1 MPa og friktionskoefficienten som 0.5.

3. Bjælkeforsøg

3.1. Forsøgsprogram

Dette afsnit omhandler forsøgene med armerede teglbjælker.

Der blev fremstillet 12 bjælker i alt, af de to typer sten og med to forskellige længder. Se iøvrigt skema 3.1.1.

Forskydnings- spændviddeforhold	2.7	3.1
Stenklasse		
15	3	3
30	3	3

Skema 3.1.1. Typer og antal teglbjælker.

Forskydningsspændviddeforholdet i skema 3.1.1 er bestemt af

$$Forskydningssp_{KTL} = \frac{\text{muråbning} + 1 \text{ stens længde}}{2 \cdot \text{højden}} \quad (3.1.1)$$

Dimensionerne for teglbjælken er 1/2-sten i bredden og 9 skifter i højden, hvor det nederste skifte er tegloverliggeren og længden er 14 eller 16 sten, svarende til 109 x 590 x 3348 eller 3828 mm.

Armeringen i tegloverliggeren består af to stænger af typen Tentorstål med diameteren 8 mm.

3.1.1. Fremstilling af bjælker

Der blev som nævnt i forrige afsnit fremstillet 12 bjælker. De blev alle opmuret af to faglærte murere. Det var for alle bjælkerne gældende, at tegloverliggeren blev lavet i forbindelse med selve opmuringen af bjælken. Mørtelen som blev anvendt som udfyldningsmateriale i tegloverliggeren - KC 20/80/550 - blev også anvendt til selve bjælken.

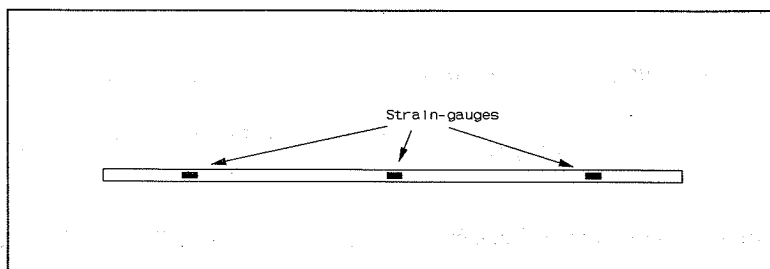
Bjælkerne blev muret frit og opretstående med fyldte fuger.

Bjælkerne blev muret med løberforbandt med en kvart stens forskydning.

3.1.2. Målinger

Der blev foretaget følgende målinger på bjælken.

På hver af de to armeringsstænger var der anbragt seks straingauges. De var fordelt parvis over tre steder, se figur 3.1.1.



Figur 3.1.1. Straingaugeplacering.

På bjælken blev den lodrette deformation målt vha. flytningsmålere. Dette blev gjort så tæt på midten som muligt samt ved understøtningerne.

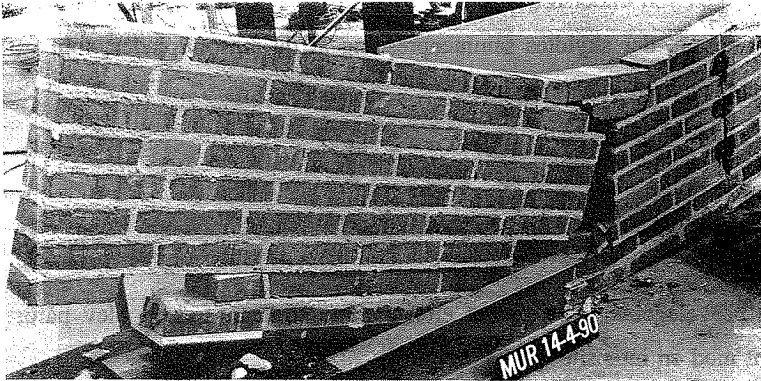
Flytningen ved understøtningerne blev målt for at kunne korrigere for den deformation, der skyldtes sammenpresning af de masonitplader, som var placeret mellem bjælke og lejer.

3.1.3. Forsøgsgangen

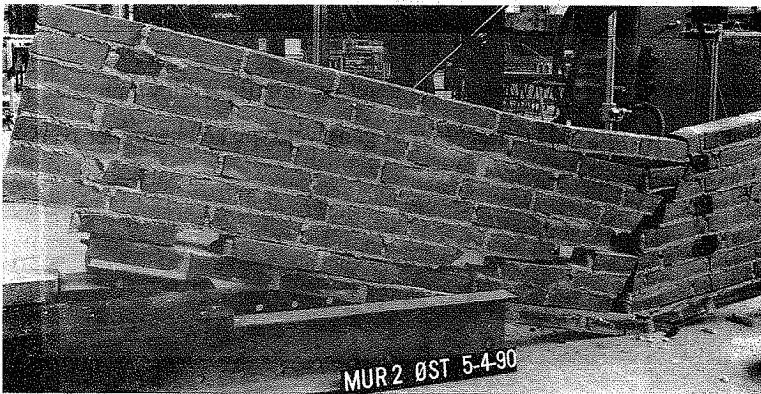
Alle prøvelegemer blev prøvet efter samme strategi. Lasten blev påført jævnt med en intensitet på 2.0 kN/min.

Under den første del af forsøget blev der vha. datalogger opsamlet data hvert minut. Når bruddet var nært forekommende, opsamledes data hvert 5. sekund.

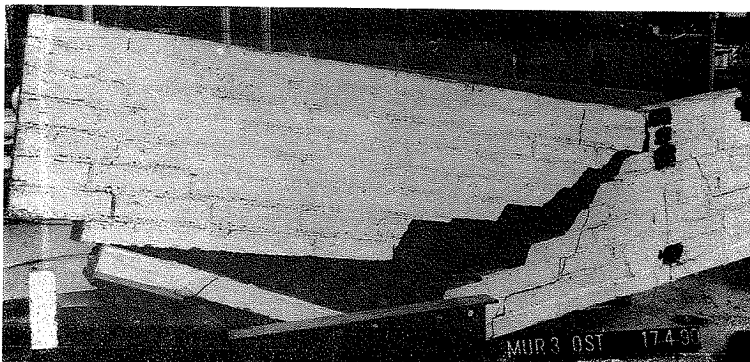
Bjælkerne blev efter prøvning fotograferet og brudfigur blev optegnet, se billederne på de følgende 6 sider (der er gengivet typiske eksempler på den optegnede brudfigur).



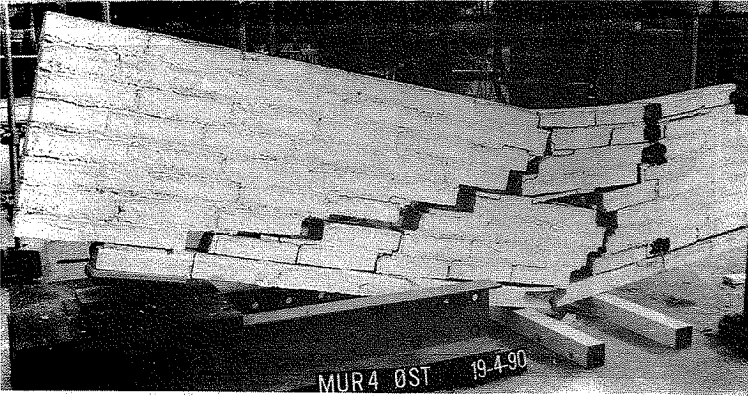
BS røde sten, forskydningsspændviddeforhold 3.1



BS røde sten, forskydningsspændviddeforhold 3.1



BS røde sten, forskydningsspændviddeforhold 3.1



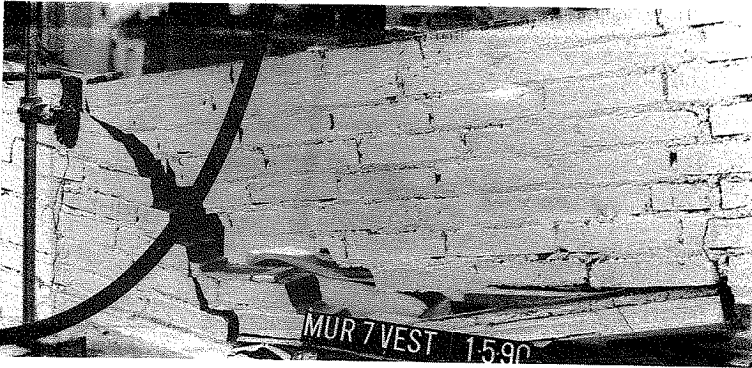
BS gule sten, forskydningspændviddeforhold 3.1



BS røde sten, forskydningspændviddeforhold 2.7



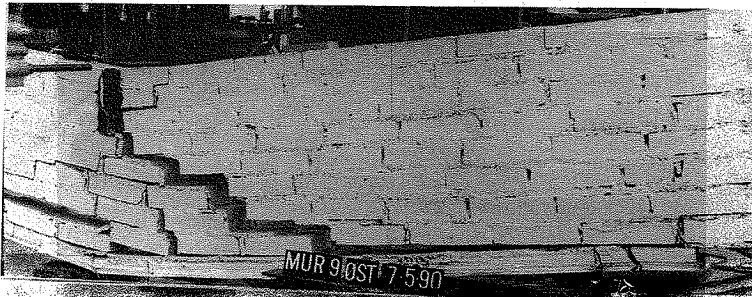
BS røde sten, forskydningspændviddeforhold 2.7



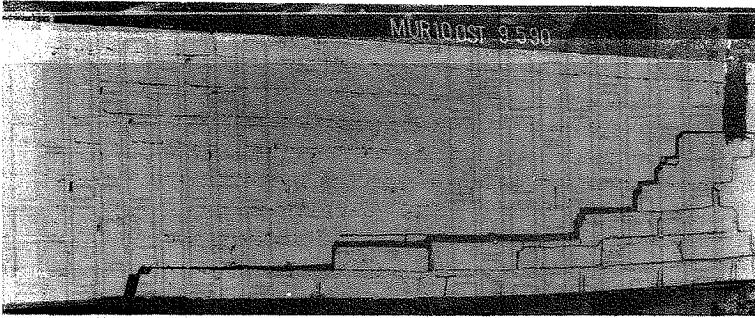
BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 2.7



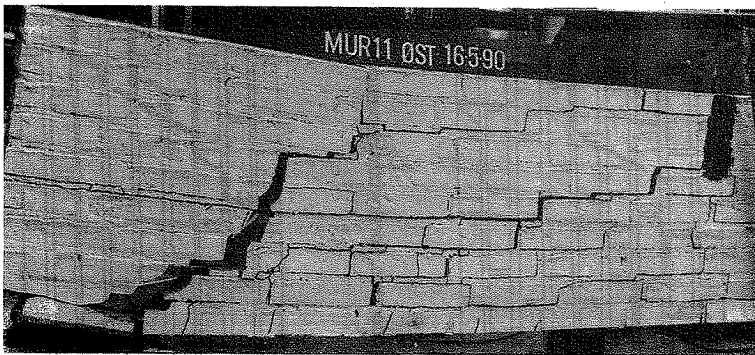
BS røde sten, forskydningsspændviddeforhold 2.7



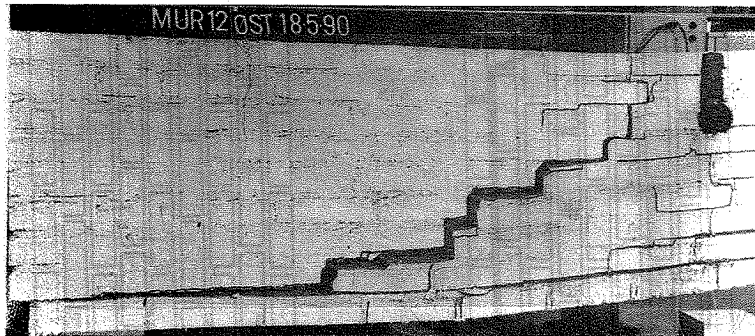
BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 3.1



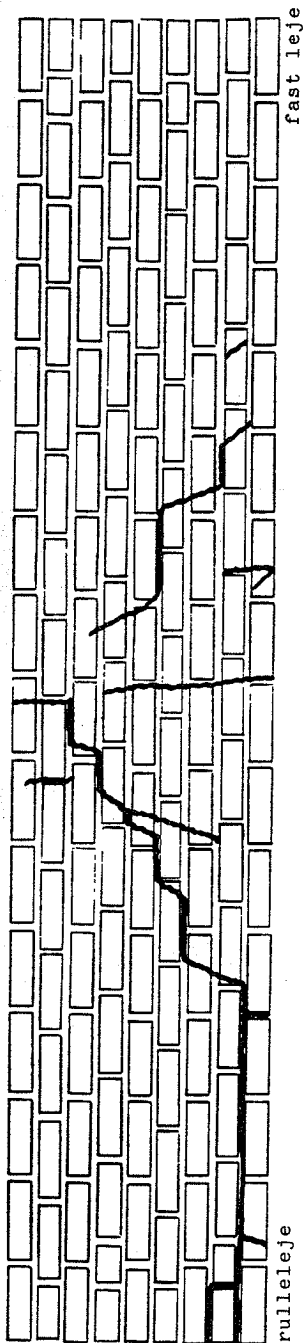
BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 3.1



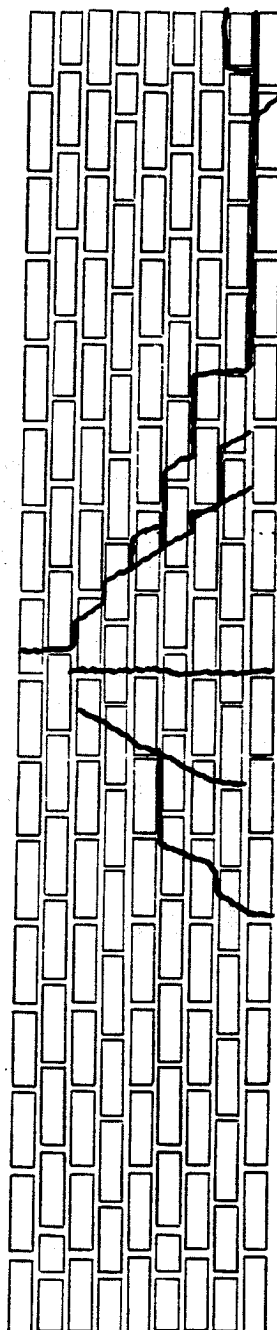
BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 2.7

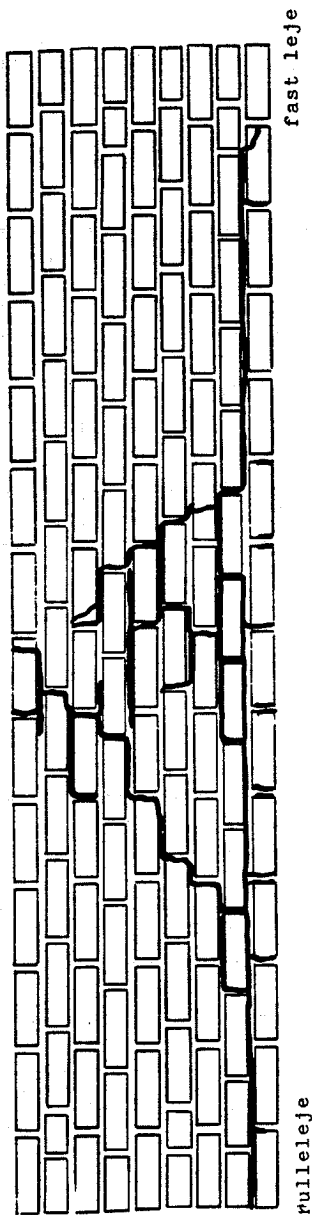


BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 2.7

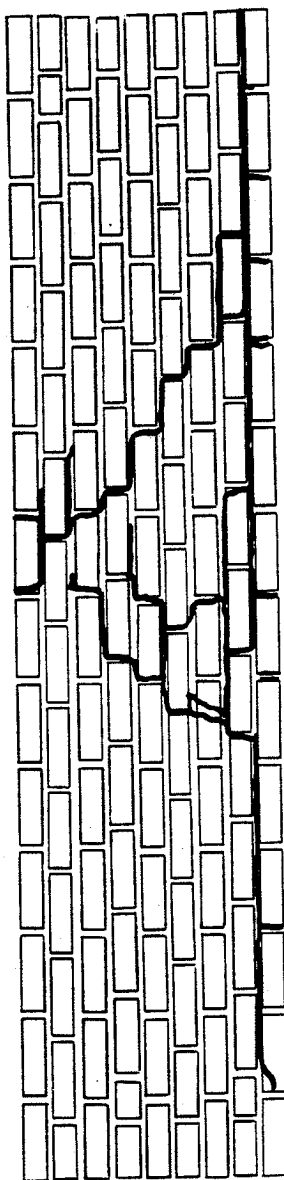


BS røde sten, forskydningspændviddeforhold 3.1





BS gule sten, forskydningsspændviddeforhold 2.7



3.1.4. Behandling af forsøgsmålingerne

I dette afsnit vil de fundne målinger fra forsøgsserien med tegl bjælker blive behandlet.

I skema 3.1.2 er de målte brudstyrker for bjælkerne angivet.

		BS-RØD		BS-GUL	
	Spændv.forh.	2.7	3.1	2.7	3.1
	Enhed	-	-	-	-
1	kN	33.2	17.7	22.7	12.7
2	kN	26.7	20.4	24.7	19.3
3	kN	16.6	24.4	20.4	20.4

Skema 3.1.2. Brudstyrker.

Målingerne for bjælkens deformation på midten lige før brud er vist i skema 3.1.3.

		BS-RØD		BS-GUL	
	Spændv.forh.	2.7	3.1	2.7	3.1
	Enhed	-	-	-	-
1	mm	12.0	2.7	4.0	3.4
2	mm	4.3	5.9	7.4	-
3	mm	3.1	11.6	3.5	9.6

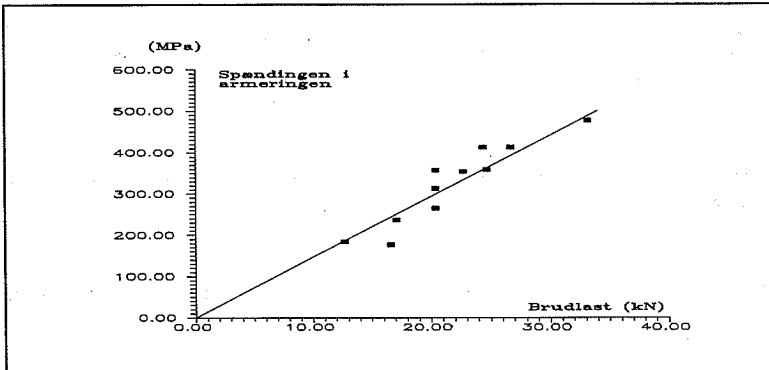
Skema 3.1.3. Nedbøjning ved bjælkemidte i brudøjeblikket.

Spændingerne i armeringsstængerne blev bestemt vha. de påsatte strain-gauges. Spændingen i armeringen på bjælkemidten i brudøjeblikket fremgår af skema 3.1.4.

		BS-RØD		BS-GUL	
Spændv.forh.		2.7	3.1	2.7	3.1
Enhed		-	-	-	-
1	MPa	477	237	354	184
2	MPa	413	358	359	-
3	MPa	177	413	265	313

Skema 3.1.4. Spændingen i armeringen på bjælkemidten i brudøjeblikket.

Sammenhængen mellem spændingen i armeringsstængerne og lasten i brudøjeblikket er afbildet i figur 3.1.2. Som det ses, er der en lineær sammenhæng. Den fuldt optrukne linie er en bestfit-linie gennem (0,0).



Figur 3.1.2. Sammenhæng mellem brudlasten og spændingen i armeringen i midtersnit-tet.

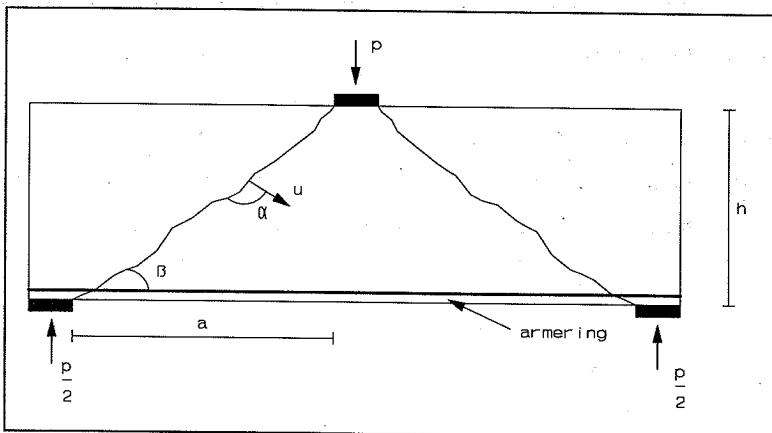
3.2. Øvreværdier

3.2.1. Teori

I dette afsnit er den teoretiske bæreevne opstillet.

Øvreværdiløsningen bestemmes vha. Coulombs modificerede flydebetingelse og den associerede flydelov. Den opstillede bæreevne er en øvreværdiløsning, hvor kun murværkets trykstyrke tages i regning.

Bæreevnen er bestemt vha. formlerne vist i [9] idet bæreevnebestemmelsen er baseret på den i figur 3.2.1 valgte brudfigur.



Figur 3.2.1. Valgt brudfigur.

Det indre arbejde for brudfiguren er, idet kun halvdelen af bjælken betragtes, givet som :

$$W' = \frac{vf_c}{2} ub(1 - \sin \alpha) \frac{h}{\sin \beta} + Tu \sin(\alpha - \frac{\pi}{2} + \beta) \quad (3.2.1)$$

Da trækstyrken af murværket er sat til nul, gælder udtrykket i hele α -intervallet, se [9] s.111.

Størrelsen $h/\sin \beta$ er flydeliniens længde, α er vinklen mellem flytningsvektoren og flydelinien, og T er flydekraften i armeringen.

Den relative bæreevne kan bestemmes til (se [9] og [11])

$$\frac{\tau}{vf_c} = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[\sqrt{4\phi(1-\phi) + \left(\frac{a}{h}\right)^2} - \frac{a}{h} \right] & \text{for } \phi \leq \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{a}{h}\right)^2} - \frac{a}{h} \right] & \text{for } \phi > \frac{1}{2} \end{cases} \quad (3.2.2)$$

idet $\tan \beta = h/a$, og hvor τ er den gennemsnitlige forskydningsspænding. Størrelsen Φ er armeringsgraden.

$$\phi = \frac{T}{vf_c bh} \quad (3.2.3)$$

Fra formel (3.2.2) fås endelig bæreevnen for $\Phi \leq 1/2$.

$$P = vf_c bh \left[\sqrt{4\phi(1-\phi) + \left(\frac{a}{h}\right)^2} - \frac{a}{h} \right] \quad (3.2.4)$$

3.2.2. Bestemmelse af øvre værdier

Indsættes bjælkernes dimensioner og styrker i øvre værdiløsningen vist i formel (3.2.4) fås de i skema 3.2.1 viste øvre værdier.

Stentype	Spændviddeforhold	Øvre værdi
		kN
BS-RØD	2.7	36.2
BS-RØD	3.1	30.9
BS-GUL	2.7	38.3
BS-GUL	3.1	32.7

Skema 3.2.1. Øvre værdier.

I skema 3.2.1 er følgende styrker brugt: $f_{c,rød} = 10 \text{ MPa}$ $f_{c,gul} = 15 \text{ MPa}$
 $f_y = 550 \text{ MPa}$

Til bestemmelse af effektivitetsfaktoren v er nedenstående empiriske formel anvendt

$$v = \frac{3.5}{\sqrt{f_c}} 0.27 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{h}} \right) (0.15\rho + 0.58) \left(1.0 + 0.17 \left(\frac{a}{h} - 2.6 \right)^2 \right)$$

som er fundet ud fra en større forsøgsserie [4].

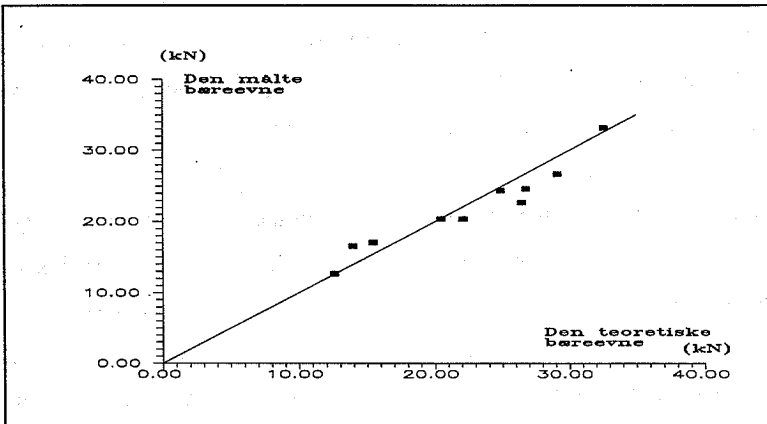
Størrelsen h er bjælkehøjden i meter, ρ er det geometriske armeringsforhold indsat i %, og a er den vandrette afstand i meter fra last til understøtning. f_c indsættes i MPa.

Indsættes rent formelt den aktuelle spænding i armeringsstængerne i brudøjeblikket ved bestemmelse af T i bæreevneudtrykket (3.2.4) i stedet for armeringsstængernes karakteristiske flydespænding, fås de i skema 3.2.2 viste øvreværdiløsninger.

		BS-RØD		BS-GUL	
		2.7	3.1	2.7	3.1
Spændv.forh.					
Enhed		-	-	-	-
1	kN	32.6	15.5	25.7	12.3
2	kN	29.1	22.2	26.0	-
3	kN	13.9	24.9	20.0	19.8

Skema 3.2.2. Øvreværdier, hvor de målte spændinger i armeringen er anvendt.

Sammenlignes grafisk de målte brudstyrker med de i skema 3.2.2 fundne øvreværdier, fås den sammenhængen vist i figur 3.2.2.



Figur 3.2.3. Sammenhæng mellem øvreværdier baseret på målte armeringsspændinger og de ved forsøg fundne brudstyrker.

3.3. Diskussion af bjælkeforsøg

Som det ses af skema 3.2.2, havde bjælker lavet af BS-røde sten (stkl. 15) en større bæreevne end bjælkerne lavet af BS-gule sten (stkl. 30). Dette kan skyldes, at bjælkerne blev opmuret med tørre sten, og mørtlen derved er blevet 'suget død'. Da minutsugningen for BS-gule sten var større end for BS-røde sten, er dette fænomen mest udtalt for bjælkerne lavet af BS-gule sten. Dette bekræftes også af brudformen.

Brudformen viser, at der er tale om forskydningsbrud (se fotografierne på siderne 31 - 36). Det ses tydeligt, at bruddet er en blanding af adskillelses- og glidningsbrud; både de skrå som de vandrette brudlinier bekræfter dette. Ved forskydningsbrud synes bæreevnen derfor at være afhængig både af trækstyrken og trykstyrken, og derfor er vedhæftningen mellem sten og mørtel af væsentlig betydning.

En anden slutning, der kan drages af BS-røde-bjælkernes større forskydningsbæreevne, er, at Murværksnormens [6] krav om anvendelse af stenstyrker højere end klasse 22 kan virke direkte selvmodsigende idet, som forsøgene har vist, klasse 15 sten kan give større forskydningsbæreevne end klasse 30 sten. Klasse 22 kravet relaterer sig til bøjning, og de fleste overliggere bryder ved forskydning, se også [8].

Figur 3.2.3 viser en interessant sammenhæng mellem den teoretiske styrke baseret på de målte spændinger i armeringsstængerne i brudøjeblikket og den målte brudlast. Der ses at være en næsten entydig sammenhæng mellem brudstyrken og den teoretiske styrke, spredningen er således kun 9%. Det skal her nævnes, at den anvendte teori er udviklet til brug ved beregning af betonbjælker.

Kendes armeringsspændingen ved brud, kan bæreevnen af bjælkerne altså bestemmes vha. Coulombs modificerede brudkriterium. For at verificere dette bør der udføres flere forsøg, hvor der varieres på armeringsforholdet. Der tænkes specielt på teglbjælker med et armeringsforhold, for hvilket der forekommer flydning i armeringen i brudøjeblikket. I denne sammenhæng skal det tilføjes, at usikkerheder på spændingsmålinger vha. straingauges kan forekomme, da flydning af armeringen ikke nødvendigvis indtræffer indenfor det område, hvor straingaugen er placeret.

For at udvikle en mere anvendelig metode til bæreevnebestemmelse vil det være nødvendigt at tage hensyn til relevante parametre som f.eks. stentyper (blødstrøgne, maskinsten, hulsten osv.), densitet, vandoptagelsesevne osv. Der er ingen tvivl om, at ovennævnte parametre vil ændre bæreevnen og derved gøre formel (3.1.4) svært anvendelig uden modifikationer.

Alene i [8] eksisterer der et stort forsøgsmateriale med tilsvarende bjælker som benyttet i denne forsøgsserie. I [8] er der brugt flere forskellige materialer, hvilket gør resultaterne særligt interessante, men der mangler dog oplysninger om spændingen i armeringen i brudøjeblikket. Spændingen i armeringen er ifølge nærværende notats forsøgsresultater vigtig for at bestemme bæreevnen. Af de her fremkomne resultater kan det indses, at hvis flydespændingen benyttes til bestemmelse af bæreevnen, fås en væsentlig større teoretisk bæreevne end den reelt målte. Dette er også gældende for forsøgsresultaterne fra [8].

En fremtidig undersøgelse bør tage hensyn til ovennævnte problemer, formentlig ved at den for betonebjælker opstillede v-formel modificeres.

Referencer

- [1] Erik Kjær, Eigil Bräuner Jensen : "Orienterende nedbøjnings-forsøg med lange, armerede teglbjælker". Kalk og Teglværkslaboratoriet, 1989.
- [2] CEN (Comité Européen de Normalisation) : "Draft-methods of test for masonry". Document CEN/TC 125/WG4 N 35, 1989.
- [3] Dansk Ingeniørforenings Norm for betonkonstruktioner, DS 411. 3. udgave 1984.
- [4] M.Roikjær, C.Pedersen, M.W.Bræstrup, M.P.Nielsen, F.Bach : "Bestemmelse af ikke forskydningsarmerede bjælkens forskydningsbæreevne". ABK, DTH. Intern rapport Nr. 162, 1979.
- [5] Henrik Elgaard Jensen : "Membranvirkning i murfelter". ABK, DTH, Eksamensprojekt, 1989.
- [6] Dansk Ingeniørforenings Norm for murværkskonstruktioner, DS 414. 3. udgave 1984.
- [7] S. Stockl, P. Hofmann, J. Mainz : "A Comparative Finite Element Evaluation of Mortar Joint Shear Tests". Uddrag fra Masonry International Vol. 3, No 3, 1990.
- [8] C. Falk, R. Knudsen : "Armerede Teglbjælkens bæreevne". Forsøgsresultater. Kalk og Teglværkslaboratoriet, 1980.

- [9] M. P. Nielsen : "Limit Analysis And Concrete Plasticity".
Prentice-Hal, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1984.
- [10] P. K. Nielsen : "Forskydning i armerede teglbjælker". ABK, DTH,
Eksamensprojekt, 1990.
- [11] M. P. Nielsen, M. W. Bræstrup, B. C. Jensen, Finn Bach : "Concrete
Plasticity". Specialpublikation udgivet af Dansk Selskab for Bygnings-
statik, Lyngby, oktober 1978.
- [12] Henrik Elgaard Jensen : "Murværk". ABK, DTH, 1992.

... ..

... ..

... ..

... ..

AFDELINGEN FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Department of Structural Engineering
Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby

SERIE R
(Tidligere: Rapporter)

- R 282. DAHL, KAARE K.B.: Uniaxial Stress-Strain Curves for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 283. DULEVSKI, DAVID ENCHO: Global Structural Analysis of Steel Box Girder Bridges. 1992.
- R 284. Resumeoversigt 1991 - Summaries of Papers 1991.
- R 285. DAHL, KAARE K.B.: The Calibration and Use of a Triaxial Cell. 1992.
- R 286. DAHL, KAARE K.B.: A Failure Criterion for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 287. DAHL, KAARE K.B.: A Constitutive Model for Normal and High Strength Concrete. 1992.
- R 288. JENSEN, HENRIK ELGAARD: State-of-the-art Rapport for Højstyrkebetons Svind og Krybning. 1992.
- R 289. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport. 1992.
- R 290. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix A. 1992.
- R 291. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix B. 1992.
- R 292. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix C. 1992.
- R 293. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; A testreport; Appendix D. 1992.
- R 294. JENSEN, HENRIK ELGAARD: Creep and Shrinkage of High-Strength Concrete; An Analysis. 1992.
- R 295. JENSEN, HENRIK ELGAARD: State-of-the-art Rapport for Revnet Betons Styrke. 1992.
- R 296. IBSØ, JAN BEHRENDT & RASMUSSEN, LARS JUEL: Vridning af armerede normal- og højstyrkebetonbjælker. 1992.
- R 297. RIBERHOLT, HILMER, JOHANNESSEN, JOHANNES MORSING & RASMUSSEN, LARS JUEL: Rammehjørner med indlimede stålstænger i limtræ. 1992.
- R 298. JENSEN, RALPH BO: Modified Finite Element Method modelling Fracture Mechanical Failure in wooden beams. 1992.
- R 299. IBSØ, JAN BEHRENDT & AGERSKOV, HENNING: Fatigue Life of Off-shore Steel Structures under dStochastic Loading. 1992.
- R 300. HANSEN, SVEND OLE: Reliability of Wind Loading on Low-Rise Buildings in a Group. 1992.
- R 301. AARRE, TINE: Tensile characteristics of FRC with special emphasis on its applicability in a continuous pavement. 1992.
- R 302. GLAVIND, METTE: Evaluation of the Compressive Behaviour of Fiber Reinforced High Strength Concrete. 1992.
- R 303. NIELSEN, LEIF OTTO: A C ++ basis for computational mechanics software. 1993
- R 304. Resumeoversigt 1992 - Summaries of Papers 1992.
- R 305. HANSEN, SØREN, STANG, HENRIK: Eksperimentelt bestemte mekaniske egenskaber for fiberbeton. 1993.
- R 306. NIELSEN, PER KASTRUP, ELGAARD JENSEN, HENRIK, SCHMIDT, CLAUS, NIELSEN, M.P.: Forskydning i armerede tegl bjælker. 1993.
- R 307. CHRISTOFFERSEN, JENS, JAGD, LARD, NIELSEN, M.P.: HOTCH-POTCH Pladeelementet - Finite element til beregning af armerede betonplader. 1993.

Abonnement 1.7.1993 - 30.6.1994 kr. 130,-

Subscription rate 1.7.1993 - 30.6.1994 D.Kr. 130.-.

Hvis De ikke allerede modtager Afdelingens resumeoversigt ved udgivelsen, kan Afdelingen tilbyde at tilsende næste års resumeoversigt, når den udgives, dersom De udfylder og returnerer nedenstående kupon.

Returneres til
Afdelingen for Bærende Konstruktioner
Danmarks tekniske Højskole
Bygning 118
2800 Lyngby

Fremtidig tilsendelse af resumeoversigter udbedes af
(bedes udfyldt med blokbogstaver):

Stilling og navn:

Adresse:

Postnr. og -distrikt:

The Department has pleasure in offering to send you a next year's list of summaries, free of charge. If you do not already receive it upon publication, kindly complete and return the coupon below.

To be returned to:
Department of Structural Engineering
Technical University of Denmark
Building 118
DK-2800 Lyngby, Denmark.

The undersigned wishes to receive the Department's
List of Summaries:
(Please complete in block letters)

Title and name

Address.....

Postal No. and district.....

Country.....

