

INSTITUT FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER OG MATERIALER

DTU



Eksperimentel bestemmelse af teglbjælkers forskydningsbæreevne

LARS GERMAN HAGSTEN
TIM GODMAN - HØYER
LARS ZENKE HANSEN
M.P. NIELSEN

Eksperimentel bestemmelse af teglbjælkers forskydningsbæreevne

Lars German Hagsten

Tim Gudmand-Høyer

Lars Zenke Hansen

M. P. Nielsen

**Eksperimentel bestemmelse
af teglbjælkers
forskydningsbæreevne**

Tryk: DTU-tryk

Danmarks Tekniske Universitet

Lyngby

ISBN 87-7740-255-3

ISSN 1396-2167

Bogbinder:

H. Meyer

Nærværende rapport beskriver 14 bjælkeforsøg med armeret murværk og 5 forsøg til bestemmelse af styrken af skillefladen mellem sten og mørtel.

MURO har sponsoreret projektet, dvs. leveret materialer og dækket omkostninger i forbindelse med opmuringen af prøvelegemerne. Vi retter herfor en varm tak til MURO's direktør, arkitekt maa Søren Bøgh.

Bjælkeforsøgene er udført på DTU, Institutet for Bærende Konstruktioner og Materialer, i foråret 1998. I den forbindelse vil vi gerne rette en tak til personalet i laboratoriet, specielt maskinarbejder Steen Jørgensen, laboratorieingeniør Jørgen Bjørnbak-Hansen, fotograf Christian Bramsen og driftsingeniør Finn Sundevad.

Forsøgene til bestemmelse af styrken af skillefladen mellem sten og mørtel er udført på Statens Byggeforskningsinstitut, SBI. I den forbindelse vil vi gerne takke civilingeniør, Ph.D, seniorforsker Klavs Feilberg Hansen, akademiingeniør Peter Mossing og ingeniørassistent Gunnar Holm, uden hvem disse forsøg ikke ville kunne have været gennemført.

Marts 1999.

1. Indholdsfortegnelse

1. Indholdsfortegnelse	1
2. Indledning	3
3. Forsøgsprogram	4
4. Mørtel	6
4.1 Trykstyrken	7
4.2 Bøjningstrækstyrken	7
4.3 Vandindhold	7
4.4 Friktionsvinklen	7
4.5 Målinger på den friske mørtel	8
4.5.1 Mørtelens vandbehov	8
4.5.2 Mørtelens konsistens	8
4.5.3 Mørtelens vandudskillelse	8
4.5.4 Mørtelens vandholdsevne	9
4.5.5 Mørtelens luftindhold	9
4.5.6 Mørtelens densitet	9
5. Teglsten	10
5.1 Trykstyrken	10
5.2 Friktionsvinklen	10
5.3 Stenenes bruttodensitet og minutsugning	11
5.3.1 Murstens bruttodensitet	12
5.3.2 Murstens minutsugning	12
6. Skillefladen mellem fuge og sten	13
7. Bjælker	17
7.1 Forsøgsbeskrivelse	17
7.1.1 Opmuring	17
7.1.2 Hærdebetingelser	18
7.1.3 Transport	18
7.1.4 Forsøgsoptilling	18
7.1.5 Prøvning	19
7.2 Forsøgsresultater	20
7.2.1 Brudforløb	26
7.2.2 Store h/a forhold	31
7.2.3 Mellemliggende h/a - forhold	32
7.2.4 Små h/a -forhold	32

8. Afsluttende bemærkninger	33
9. Litteraturliste	34

Appendix A Forsøgsresultater; frisk mørtel

Appendix B Forsøgsresultater; sten

Appendix C Brudbilleder og forsøgsopstilling (“skillefladeforsøg”)

Appendix D Beskrivelse og hovedresultater; bjælker

Appendix E Billeder

2. Indledning

Denne rapport omhandler et eksperimentelt arbejde, som er udført i foråret/sommeren 1998 på Institut for Bærende konstruktioner og Materialer på Danmarks Tekniske Universitet og på Statens Byggeforskningsinstitut.

Projektet er, for så vidt gælder bjælkeforsøgene, udført som et midtvejsprojekt af Tim Gudmand-Høyer og Lars Zenke Hansen med Lars German Hagsten og M. P. Nielsen som vejledere.

Nærværende rapport er skrevet af Lars German Hagsten på basis af de studerendes rapport [1998.2].

Beskrivelsen indeholder foruden forsøgsresultaterne også de overvejelser, der er gjort forud for forsøgene.

I kapitel 3 beskrives det overordnede forsøgsprogram samtidigt med, at opbygningen af en teglbjælke illustreres. I kapitlerne 4, 5 og 6 beskrives de forsøg, der er udført for at fastlægge henholdsvis mørtelens, stenedes og skillefladens grundlæggende egenskaber. I kapitel 7 er forsøgene til bestemmelse af teglbjælkernes forskydningsstyrke beskrevet. Den måde, hvorpå bruddene forløb, er beskrevet til sidst i kapitlet sammen med et forsøg på kvalitativ forklaring på, hvorfor bjælkerne bryder, som de gør.

3. Forsøgsprogram

Formålet med dette eksperimentelle arbejde er at fastlægge teglbjælkers forskydningskapacitet, samt bestemme egenskaberne for teglstenens, mørtelens og skillefladens¹ egenskaber for på basis af disse parametre at kunne verificere en teoretisk model, som er under udvikling [1998.2] og [1999.1].

Der er ialt udført forsøg med 14 bjælker, som parvis er ens. I tabel 3.1 er bjælkernes geometri og armeringsmængden angivet.

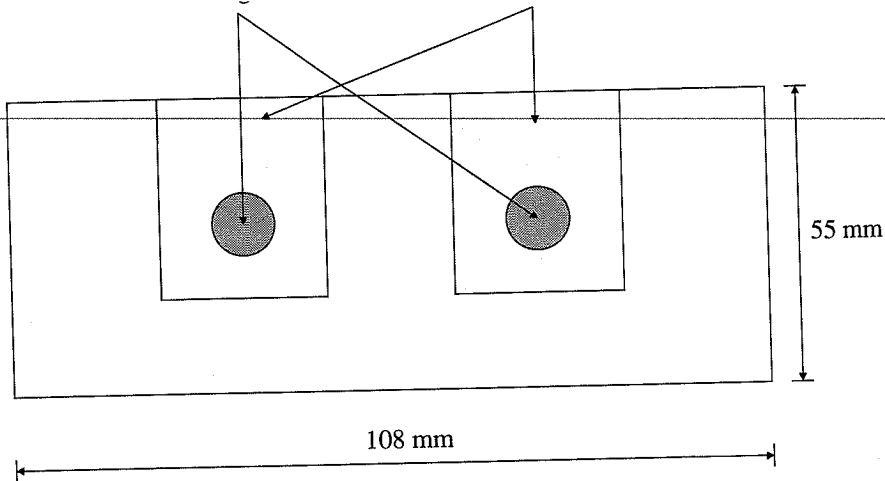
bj. nr.	bredde	længde	højde	armering	armeringsgrad
	[mm]	[mm]	[mm]		[%]
2,3	108	(12 sten) 2868	321	2 Y8	0,320
7,8	108	(12 sten) 2868	400	2 Y8	0,252
5,6	108	(12 sten) 2868	533	2 Y8	0,185
1,4	108	(12 sten) 2868	667	2 Y8	0,146
10,12	108	(9 sten) 2148	267	2 Y8	0,451
13,14	108	(9 sten) 2148	400	2 Y8	0,252
9,11	108	(15 sten) 3588	400	2 Y8	0,252

Tabel 3.1 *Hoveddata*

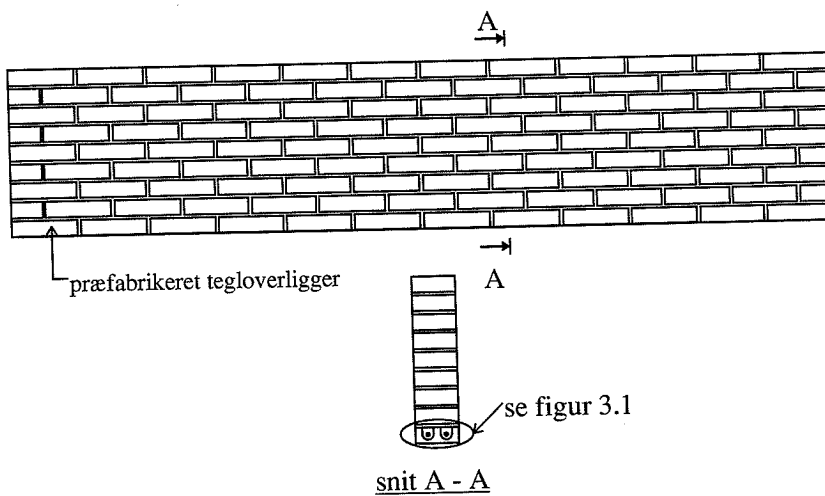
Armeringen er indstøbt i det nederste skifte i to parallelle riller, se figur 3.1. Det nederste skifte, kaldet tegloverliggeren, er fremstillet på Wewers teglværk, Pedershvile, den 11. maj 1998, og er leveret på DTU den 14. maj 1998. Opmuringen blev påbegyndt den 15. maj 1998 og blev afsluttet den 20. maj 1998. Prøvningen fandt sted 28 døgn efter opmuringen.

På figur 3.2 ses opbygningen af en teglbjælke.

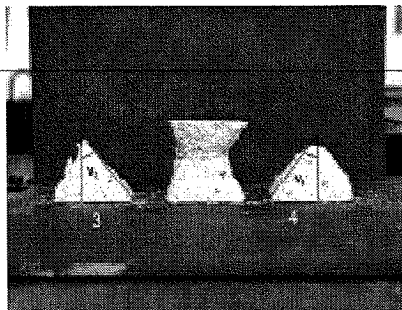
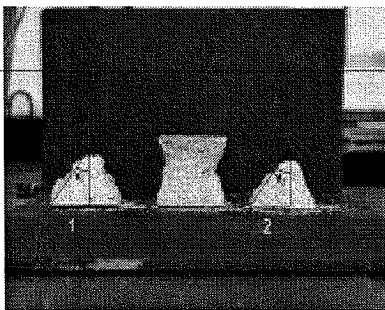
¹ Skillefladen mellem teglsten og mørtel.



Figur 3.1 Tværnit i tegloverliggeren



Figur 3.2 Teglbjælke



Figur 4.1 Billede af mørtellegemer med på tegnede brudvinkler.

4.5 Målinger på den friske mørtel

Et kvarter efter blandingens ophør udtoges af hver blanding en delportion til bestemmelse af den friske mørtels egenskaber. Resultaterne er givet i Appendix A.

4.5.1 Mørtelens vandbehov

Mørtelens vandbehov bestemtes i forbindelse med blandingen som den vandmængde, der skal tilsættes for at opnå en passende konsistens til opmuringen. Den tilsatte vandmængde udregnes i vægtprocent af tørstofmængden. Denne mængde, der fremgår af produktionsvejledningen, var 16,4 l pr. 100 kg tørstof.

4.5.2 Mørtelens konsistens

Mørtelens konsistens blev bestemt med laboratoriets faldbord. Ved bestemmelsen blev der af mørtelen udstøbt en keglestubformet "mørtel-kage" på en stiv stålplade, der løftes 9 mm og derefter falder tilbage til den oprindelige stilling ved frit fald. Keglestubbens nedre og øvre indvendige diameter er hhv. 90 og 60 mm, højden er 45 mm. Efter 12 fald - 1 pr. sek. - blev den udflydte "mørtelkage"s nedre diameter målt, og forholdet mellem den og den oprindelige diameter blev anvendt som mål for konsistensen og betegnes "faldbordstallet".

4.5.3 Mørtelens vandudskillelse

Mørtelens vandudskillelse bestemtes ved måling af den vandmængde, der blev udskilt, når mørtelen henstod i ro i bægerglas. Der blev anvendt cylindriske, 500 ml bægerglas med ca. 80 mm diameter, og de blev fyldt med mørtel til 500 ml - mærket, hvilket svarer til en mørtelhøjde på ca. 90 mm. Fyldningen blev foretaget i små portioner med en spiseske, og indesluttet

helt blev rømpet af vejs under forsigtig rystning. Da snart den næsten helt eksploderede og være undsluppet, blev bægerglasset stillet på et stabilt bord og dækket med urglas. Efter hhv. 1 og 3 timers henstand blev væskelaget på mørteloverfladen i hvert bægerglas forsigtigt hældt over i et måleglas, hvor væskemængden blev målt med 0,1 ml nøjagtighed. De målte væskemængder blev anvendt som mål for mørtelens vandudskillelse.

4.5.4 Mørtelens vandholdsevne

Mørtelens vandholdsevne blev bestemt ved at udstøbe mørtelen i en svær plastikring med 100 mm indvendig diameter og 25 mm højde. Umiddelbart før hver udstøbning blev ringen anbragt på 8 lag tørt trækpapir, hvor det øverste lag var dækket med et lag gaze. Trækpapir og gaze, som blev vejjet forud for prøvningen, blev anbragt på en glasplade. Mørtelen blev fyldt hurtigt i ringen med en spiseske og fordelt således, at mørteloverfladen var 4 - 5 mm under ringens overkant. Derefter blev der anbragt et cylindrisk lod, der vejer 2,4 kg og som kan gå ned i ringen, oven i mørtelen. Nøjagtig 2 minutter efter at loddet var blevet anbragt, blev trækpapir og gaze fjernet og atter vejjet (gazen blev rystet for at fjerne evt. mørtel). Vægtstigningen som følge af opslugning af væske fra mørtelen blev udregnet og anvendt som mål for mørtelens vandholdsevne.

4.5.5 Mørtelens luftindhold

Mørtelens luftindhold blev bestemt ved at fylde mørtel i et 500 ml måleglas til ca. halv højde. Ifyldningen skete under forsigtig rystning. Mørtelens rumfang blev aflæst, og en vand-spritblanding (60 dele vand + 40 dele denatureret sprit) blev hældt oveni mørtelen indtil 500 ml - mærket. Herefter blev måleglasset lukket med en prop, rystet og sat på et plant, stabilt underlag. Efter 15 - 20 minutters henstand blev væskestanden aflæst i ml, og niveausænkningen i hele procent af det ifyldte mørtelrumfang blev taget som et mål for mørtelens luftindhold. De anførte værdier er middeltal af to på hinanden følgende bestemmelser.

4.5.6 Mørtelens densitet

Mørtelens densitet blev bestemt ved at mørtel blev fyldt i et ca. 1 - liters målekar med 124 mm indvendig diameter og 83 mm højde. Ifyldningen skete med en spiseske, og mørtelen blev fordelt under mindst mulig bearbejdning. Karret fyldtes til overhøjde, og overskydende mørtel blev strøget af med en stållineal, hvorefter karret med mørtel blev vejjet med 0,05 g nøjagtighed.

5. Teglsten

Alle bjælker blev opmuret med røde, massive sten (Gandrup), afhentet på Wewers teglværk, Pedershvile den 15. maj 1998.

De egenskaber, der primært er af interesse er trykstyrken, friktionsvinklen og minutsugning. Derudover blev også bruttodensiteten, nettodensiteten og vandoptagelsen bestemt. Målinger kan ses i Appendix B.

5.1 Trykstyrken

Efter forudgående vandlagring i 2 timer halveredes stenene med stensav og under vandspuling. Den ene halvdel drejedes 180° om stenens længdeakse, hvorefter den murede ovenpå den anden halvdel, således at der fremkom et omtrent terningformet trykprøvelegeme. Efter sammenmuringen afrettes de med midterfugen parallelle sideflader med et lag af cementmørtel, således at de bliver plane og kan tjene som trykflader. Midterfugen fremstilles af sandfri cementmørtel af almindelig Portlandcement. Afretningslagene fremstilles af en mørtel af en dele Portlandcement og mørtelsand. Efter sammenmuringen og afretningen lagres prøvelegemerne først tre døgn i lukket rum over frit vandspejl og derefter fire døgn i tørreskab med strømmende luft ved 40°C .

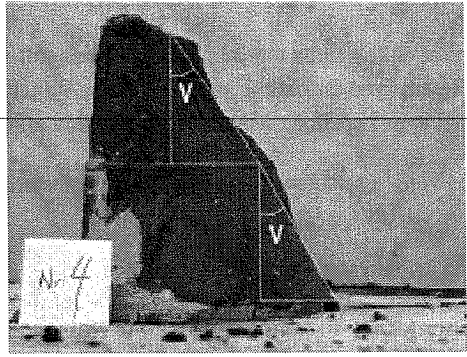
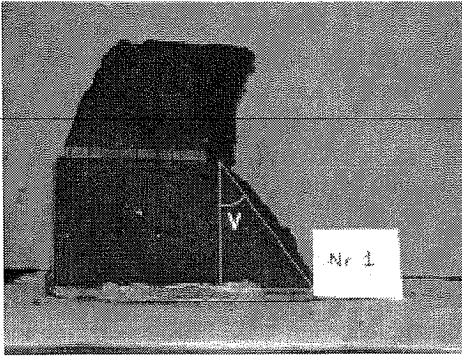
Efter lagring trykprøves tryklegemerne i en 2000 kN hydraulisk presse, hvis trykplader begge er lejret i kugleskåle. Spændingen øges med $0,7 - 0,8 \text{ MN/m}^2$ per sekund, indtil brud indtræder. Udfra trykkraften og prøvelegemernes mindste tværsnitsareal blev trykstyrken udregnet. Der blev trykprøvet 10 sten, og middelstyrken for disse sten fandtes til $f_{c, \text{st}} = 11,48 \text{ MPa}$.

5.2 Friktionsvinklen

Ligesom for mørtelen kan man få en orientering om friktionsvinklen ved at observere under hvilke vinkler, der dannes glidningsbrud.

Brudbilleder er vist i figur 5.1. V.h.a af plasticitetsteorien, se [1984.1], finder man friktionsvinkler i intervallet $22^\circ - 45^\circ$.

Prøvelegemerne var imidlertid alt for korte til, at et gennemgående glidningsbrud kunne dannes. Der blev derfor udført forsøg med prøvelegemer der var 6 (halve) sten høje. Brudfigurerne er vist i figur 5.2 for et af prøvelegemerne.

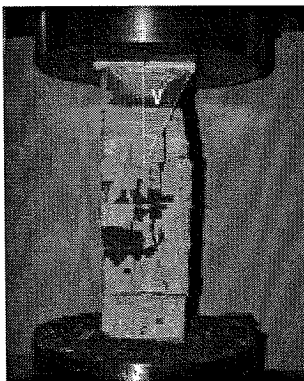


Figur 5.1 Billede af sten 1 til venstre og sten 4 til højre, med på tegnede brudvinkler.

Her dannedes imidlertid, ligesom ofte for beton, ikke et rent glidningsbrud, men en kombination af glidningsbrud og adskillelsesbrud. På figur 5.2 ser man et tydeligt glidningsbrud øverst til højre.

Målingen af vinklerne for glidningsbruddet gav en værdi af friktionsvinklen på ca. 30° . Spredningen på disse målinger er væsentlig mindre end ved forsøgene med lille højde.

Adskillelsesbruddet opstår, som ved beton, på grund af de tværudvidelser glidningsbruddene giver anledning til og på grund af lokale spændingskoncentrationer ved kraftpåføringen.



Figur 5.2 Billede af 6-sten højt forsøgslegeme med på tegnede brudvinkler

5.3 Stenenes bruttodensitet og minutsugning

Stenenes blev tørret til konstant masse i tørreskab med strømmende luft ved 110°C , og tørmassen, G_t , blev bestemt med 0,05 g nøjagtighed.

Hver enkelt stens totalrumfang blev bestemt ved måling med skydelære. Stenens længde blev bestemt ved én måling, og bredden og højden blev bestemt som middeltal af to målinger (én ved hver kopende). Måleresultaterne blev aflæst med 0,5 mm nøjagtighed.

Af veje- og måleresultaterne blev stenenes bruttodensitet udregnet i kg/m^3 .

5.3.2 Murstens minutsugning

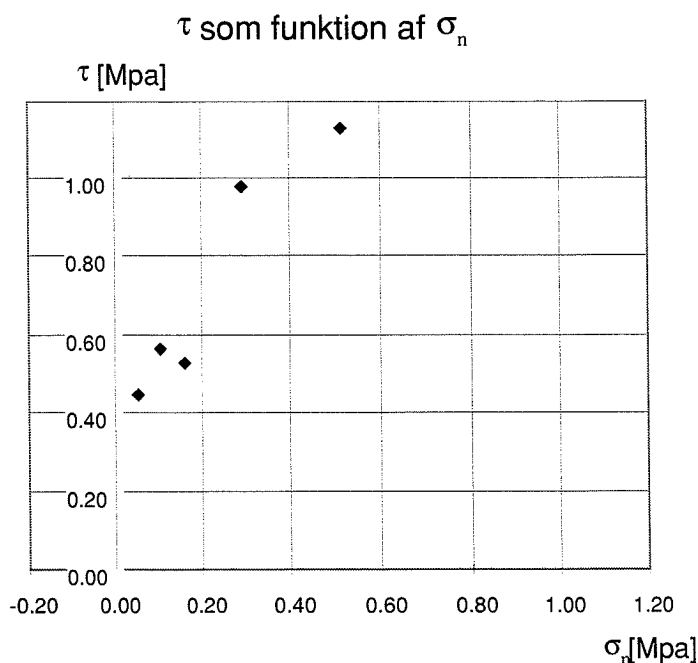
Efter tørring til konstant masse i tørreskab med strømmende luft ved 110°C og efterfølgende afkøling til stuetemperatur blev stenene vejjet og tørmassen blev bestemt med 0,05 g nøjagtighed.

Dernæst blev liggefladens areal bestemt for hver enkelt sten ved måling med skydelære. Stenens længde blev bestemt ved én måling, og bredden blev bestemt som middeltal af to målinger (én ved hver kopende). Måleresultaterne blev aflæst med 0,5 mm nøjagtighed.

Efter målingen blev én sten ad gangen anbragt i en bakke med vand, således at den ene liggeflade var 10 mm under vandspejlet, hvis niveau blev holdt konstant under prøvningen. Ét minut efter, at liggefladen var kommet i kontakt med vandet, blev stenen taget op og aftrykket med en opvredet klud, hvorefter stenen blev vejjet. Vejningen blev for hver sten afsluttet inden for et tidsrum af 1 minut fra optagningen at regne. Ud fra vejeresultaterne og liggefladens areal blev minutsugningen i $\text{kg/m}^2/\text{min}$ udregnet. Middelværdien af minutsugningen er fundet til $1,89 \text{ kg/m}^2/\text{min}$.

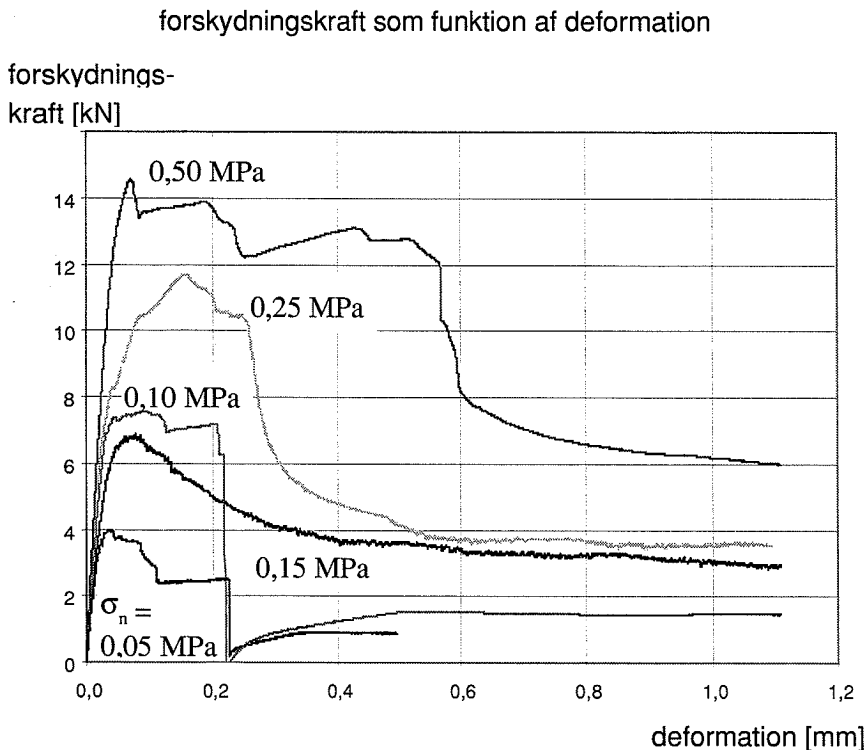
For overgangen mellem murstenene og mørtelen gælder der nogle specielle forhold. Overgangsområdet benævnes skillefladen. Dette område har en meget lille udstrækning vinkelret på stenoverfladen. Styrken af området er afhængig af såvel stenenes som mørtelens egenskaber. Et nøjagtigt kendskab til afhængigheden af de enkelte faktorer kendes ikke, men i [1982.1] er der opsummeret nogle sammenhænge mellem styrken og de enkelte faktorer.

For at fastlægge styrken af skillefladen er der på SBI udført nogle forsøg som er nærmere beskrevet i [1997.1]. Brudbilleder og billede af forsøgssopstillingen er vist i appendix C. Disse forsøg har til formål at bestemme forskydningsstyrken af skillefladen som funktion af den påtrykte normalspænding. Der er ialt udført 5 forsøg. På figur 6.1 er den maksimale forskydningsspænding vist som funktion af normalspændingen. Forskydningsspændingen er bestemt under antagelsen af, at forskydningsspændingen er konstant over tværsnittet.



Figur 6.1 Den maksimale forskydningsspænding som funktion af normalspændingen.

På figurerne 6.2, 6.3 og 6.4 er gennemsnitsvis forskydningskraften, deformationen og dilatations-
 vinklen vist som funktion af deformationen. Graferne på figur 6.4 er "udglattede" kurver, idet
 hvert punkt er gennemsnitsværdien af de 200 nærmeste punkter (hver kurve består af ca. 4000
 målepunkter).



Figur 6.2 Forskydningskraften som funktion af deformationen.

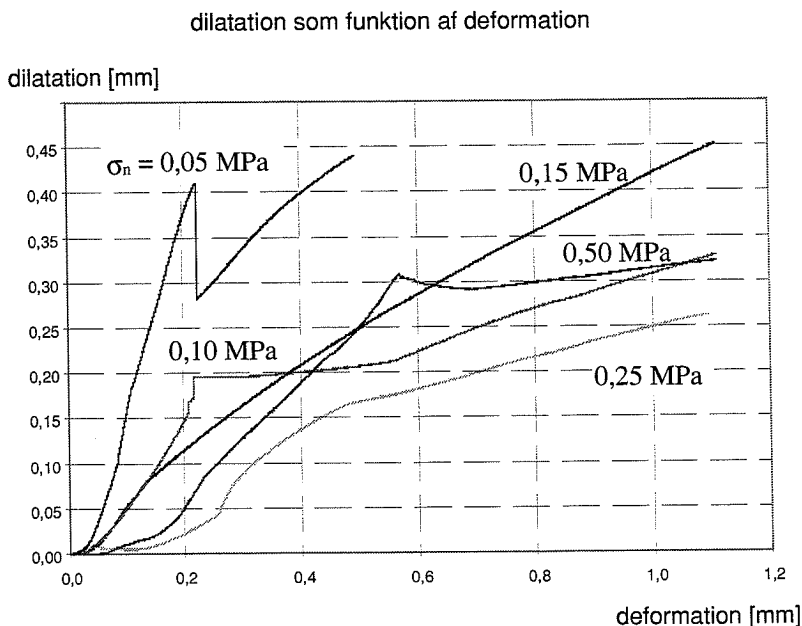
Ved forsøgene var det ikke muligt visuelt at iagttage noget brud før deformationen var ca. det
 dobbelte af deformationen ved "peak".

Det er karakteristisk for forsøgene, at bruddet sker i skillefladen mellem sten og mørtel og ik-
 ke i selve mørtelen. På grund af stenenes sugning ændres vandindholdet i den del af mørtelen
 der ligger op ad stenene. Det ændrede vandindhold har indflydelse på mørtelens styrke, som
 normalt varierer alt efter hvilken mørtel, der er tale om. Derudover medfører vandsugningen at
 nogle af de mindste partikler fra mørtelen bevæger sig ind i stenen. Da cementpartiklerne e-
 de mindste partikler i mørtelen, kan man forestille sig, at dette forhold kan have en betydning
 for styrken. Man kan ikke heraf slutte noget om den samlede styrkeændring. En transport a

vand væk fra mørtelen vil give et større vandindtag og dermed en større
cementpartikler vil derimod give en forringelse af styrken.

Ligesom mørtelen kan blive svagere, hvis nogle af cementpartiklerne bliver suget bort med vandet, kan man forestille sig, at stenen bliver stærkere, hvor der suges cementkorn op. Denne virkning er afhængig af stenens porøsitet og porestruktur, og hvor kraftig sugningen er.

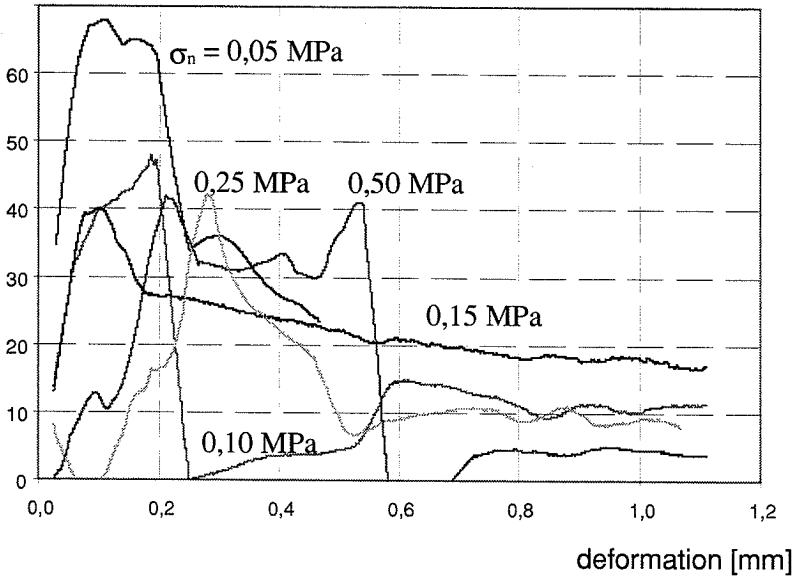
Normalt fører disse fænomener og muligvis andre ikke kendte til at skillefladen er svagere end mørtelen.



Figur 6.3 Dilatationen som funktion af deformationen.

Et andet forhold, som kan være årsag til den relativt ringere styrke i skillefladen, kan være den manglende mekaniske samvirkning mellem sten og mørtel.

dilatationsvinkel som funktion af deformation
dilatations-
vinkel
[grader]



Figur 6.4 Dilatationsvinklen som funktion af deformationen.

7. Bjælker

Hoveddata for bjælkerne er angivet i kapitel 3. Bjælkerne er opmuret med røde, massive sten, som omtalt i kapitel 5. Mørtelen var KC 50/50/700, se kapitel 4.

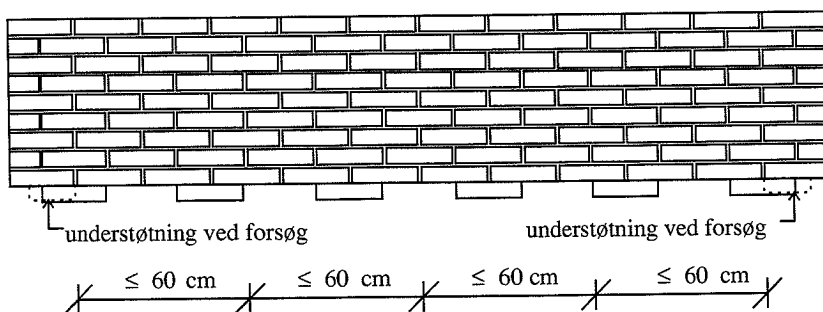
7.1 Forsøgsbeskrivelse

Armeringen er Ny-Tentorstål med en garanteret flydespænding ≥ 550 MPa. Ingen af bjælkerne brød ved armeringsbrud. I dette afsnit beskrives fremgangsmåden ved udførelsen af forsøgene.

7.1.1 Opmuring

Til opmuringen af teglbjælkerne var der af MURO stillet en professionel murer til rådighed. Formålet hermed var at få kvaliteten af teglbjælkerne til at ligge så tæt som muligt på den, man anvender i praksis. Mureren medbragte selv en 80 l tvangsblander og andre fornødne redskaber.

Selve opmuringen foregik på den måde, at der på 14 U-dragere (én til hver bjælke), der hvilede på nogle bukke, var placeret et antal mursten med en passende afstand på ikke mere end 60 cm. På disse sten blev tegl-overliggerne placeret. Disse understøttende sten havde ydermere den funktion, at de tillod at løftestroppen let kunne anbringes omkring bjælkerne.



Figur 7.1

Undervejs blev det noteret hvilken blanding, der blev brugt på de forskellige bjælker, samt hvilken mængde mørtel KC 50/50/700 og vand, der blev tilsat blandingerne. Blandingen af mørtelen stod på i ca. 10 min., som anbefalet af producenten. Dog blev mørtelen til bjælke nr.

7. standard i ca. 50 mm. Mureren påpegede at netop denne mørtel var relativt sviv at arbejde med.

Datoen for opmuringens afslutning blev noteret.

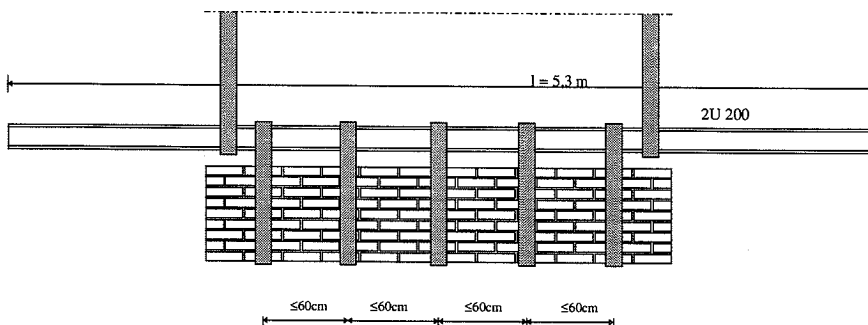
Under opmuringen blev der foretaget en række forsøg og målinger på den anvendte mørtel, som anført i kapitel 4.

7.1.2 Hærdebetingelser

Bjælkerne blev indpakket i plast. Denne tildækning blev fjernet efter 7 dage, hvorefter bjælkerne stod udækket i laboratoriet indtil prøvning.

7.1.3 Transport

Transport af bjælkerne fra opmurationsstedet til prøvemaskinen foretoges med kran der løftede i to sammenboltede U-dragere. Under disse U-dragere hang bjælken i et antal stropper, som illustreret på figur 7.2 . Stroppeerne var arrangeret på en sådan måde, at der ikke var længere imellem dem end 60 cm. I appendix E er vist et billede fra denne transport.



Figur 7.2 *Transport af bjælke*

7.1.4 Forsøgsopstilling

Bjælkerne belastedes med to symmetrisk anbragte enkeltkræfter. Belastningens størrelse er i det følgende angivet ved forskydningskraften i de to delfag med konstant forskydningskraft.

Belastningen af bjælken var arrangeret ved hjælp af et åg, der påførte en kraft på to lejer. Åget kunne i begge ender rotere omkring akser vinkelret på bjælkens plan. Den ene af understøtningerne var fastholdt mod bevægelse i bjælkens længderetning, medens den anden understøtning var bevægelig i bjælkens længderetning. Åget var et HE140B, med en længde på 1100 mm, hvorpå der var svejset fire rundjern, to på hver side, placeret symmetrisk omkring

den lodrette maskin og med en kugleleje som understøttelse. Der var at "låse" om trykhovedet på prøvemaskinen og forhindre vandret flytning af åg i forhold til trykhoved. Prøvemaskinens trykhoved var ligeledes bevægeligt. Lejerne, der overførte kraften til bjælken, havde en trykflade på 100 x 200 mm, hvilket gjorde, at de ragede ud over bjælkens sider.

Bjælken hvilede på bevægelige understøtninger, hvis trykflade var 150 x 200 mm. I disse var der placeret lastceller, to i højre side og en i venstre, som var forbundet til en datalocker, der kan opsamle data, så lastforløbet kan følges. Lastcellerne var af typen Interface 1221-AP (højre) og Interface 1231-AF (venstre). Begge understøtninger var opbygget med kugleleje og var bevægelige i bjælkens længderetning. I appendix E er vist et billede af forsøgsopstillingen.

Over understøtninger og under tryklejerne var der placeret blød masonit for at udjævne trykfladen, så der opnås et jævnt trykfelt.

For at kunne følge deformationerne i bjælken var der påsat 5 deformationsmålere af typen Novo Teknik typenr. TR500502, der kunne måle en max flytning på 50 mm. Disse var fastgjort v.h.a. elektromagneter på en bjælke på langs af denne. Deformationerne observeredes over understøtningerne, ved belastningerne og på midten af bjælken. Dataene opsamledes i den førnævnte datalocker, hvorved også deformationsforløbet kunne fastlægges.

Bjælkerne prøvedes i en Instron 8508 hydraulisk presse. Denne maskines trykkapacitet er langt større end der var brug for, men maskinen har den fordel, at den kan deformationsstyres. Dette giver mulighed for at følge et eventuelt plastisk forløb og et forløb med softening.

Fire af bjælkerne blev sideunderstøttet for at sikre mod kipning. Det drejede sig om de højeste bjælker: 1 og 4 samt de længste bjælker 9 og 11. Denne sideunderstøtning blev placeret så den ikke, i udgangssituationen, var i direkte kontakt med bjælkerne (der var en afstand på nogle få mm mellem bjælken og sideunderstøtningen). Denne tilstand blev bibeholdt under forsøget for bjælkerne 1, 4 og 11, medens bjælke 9 via en sideværts bevægelse kom i kontakt med sideunderstøtningen. Efter at denne kontakt blev observeret, blev sideunderstøtningen rykket tilbage, hvilket var årsag til en pludselig deformation af bjælken. Dette ryk kan ses af at last-udbøjningskurven og menes at være årsag til, at kapaciteten af bjælke 9 er væsentlig mindre end kapaciteten af bjælke 11.

7.1.5 Prøvning

Selve prøvningen blev deformationsstyret, dvs. stemplets position blev styret som funktion af tiden. Deformationshastigheden blev valgt således, at vi efter 30 min (1800 sek.) havde en vandring på 36 mm, svarende til 1,2 mm/min.

Ved forsøgene blev der jævnlige taget billeder. Der blev taget et billede ved forsøgets start. Dermed kan de enkelte billeder sammenkædes med deformationerne og kræfterne udfra kameratiden.

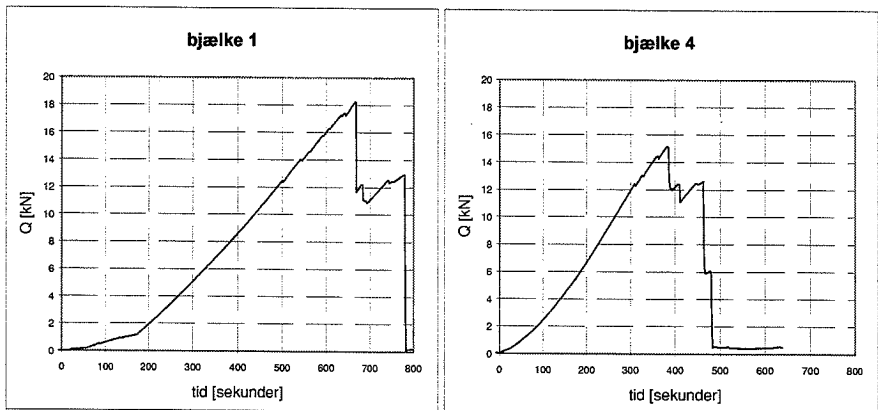
Opstillingen af data foretog i det nærtligste tempo, målingerne kunne opsamles. Dette var typisk en måling pr. 1,7 sek.

Ud over fotografering, deformations - og kraftmåling foretoges også en videofilmning af den venstre del af bjælken.

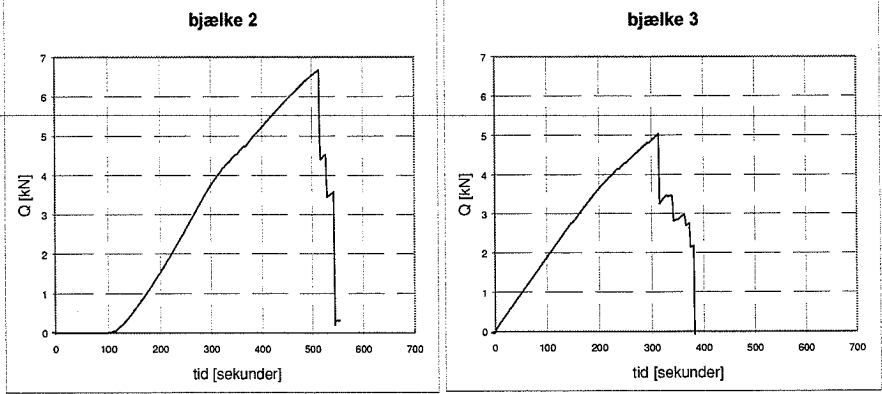
7.2 Forsøgsresultater

På figurerne 7.3 – 7.9 ses forskydningskraften som funktion af tiden. På figurerne 7.10 - 7.15 er deformationerne af bjælkemidten vist som funktion af tiden. Der blev ikke målt deformationer af bjælke 12. Ved deformationsmålingerne af bjælke 14 skete en fejl, således at disse ikke rapporteres.

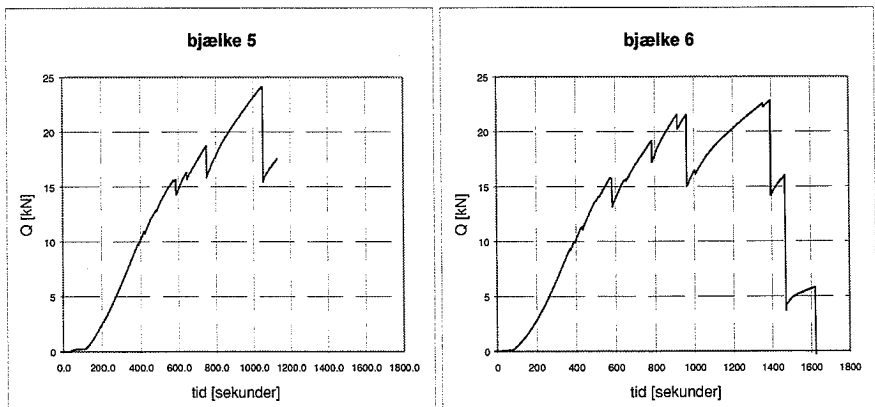
Appendix C indeholder en beskrivelse af og hovedresultaterne for hver af de 14 bjælker.



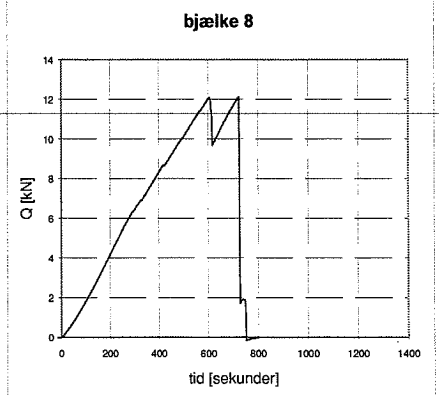
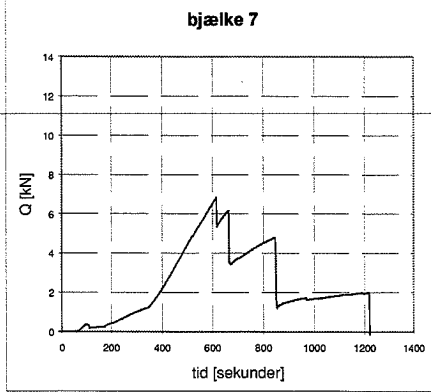
Figur 7.3 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 1 og 4.



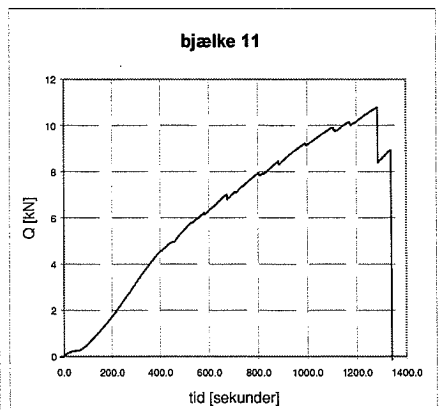
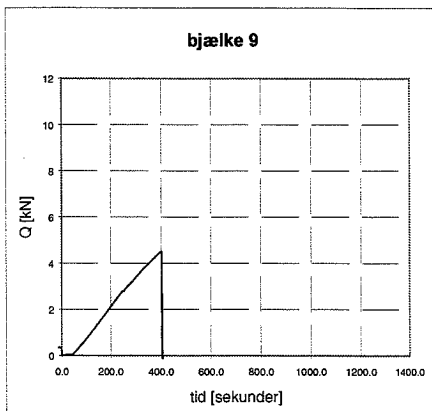
Figur 7.4 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 2 og 3.



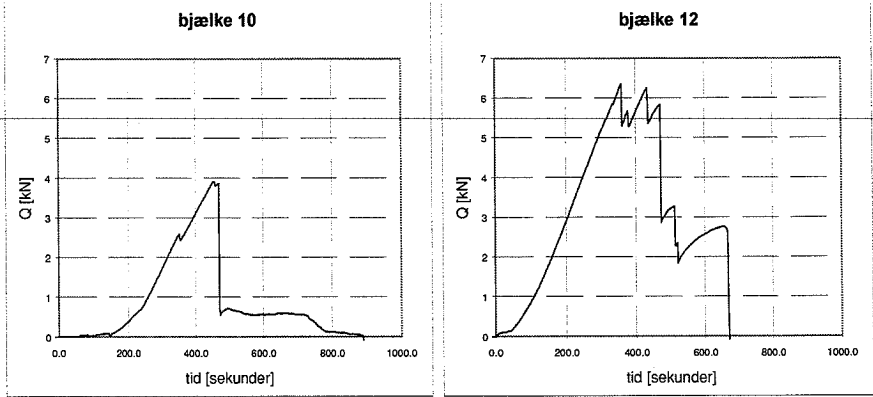
Figur 7.5 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 5 og 6.



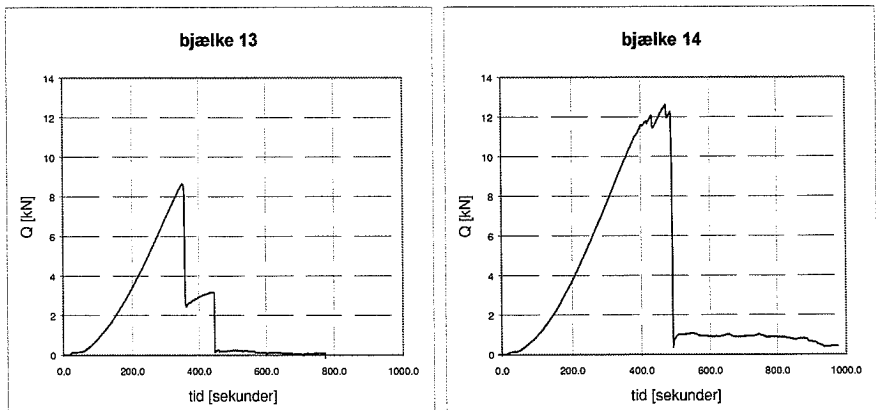
Figur 7.6 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 7 og 8.



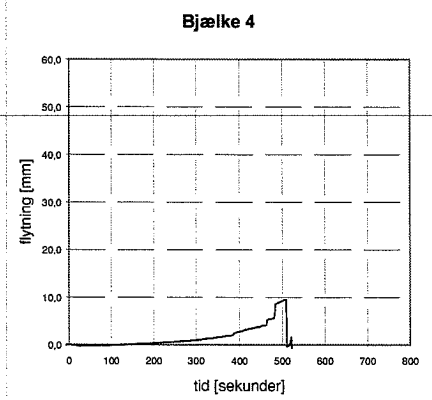
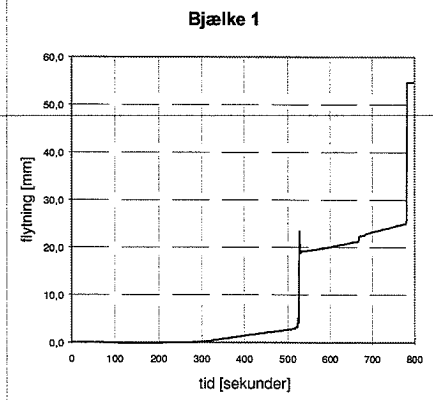
Figur 7.7 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 9 og 11.



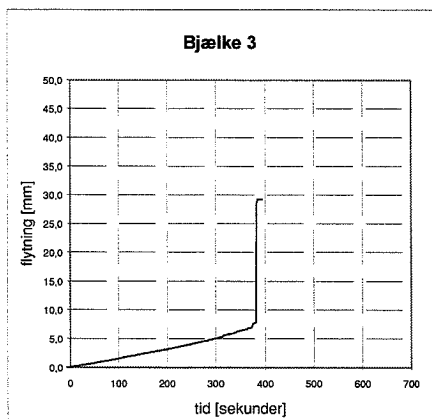
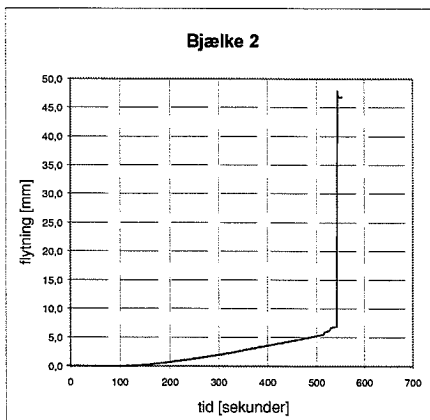
Figur 7.8 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 10 og 12.



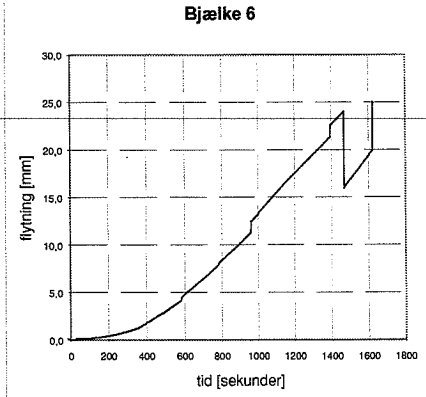
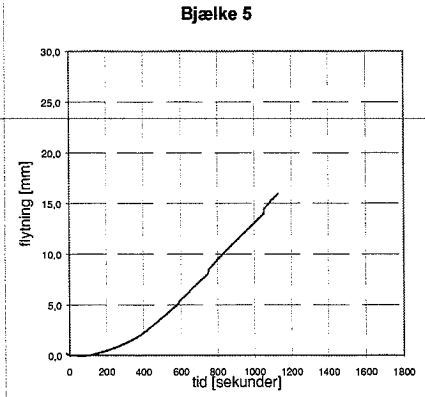
Figur 7.9 Forskydningskraft som funktion af tiden. Bjælke 13 og 14.



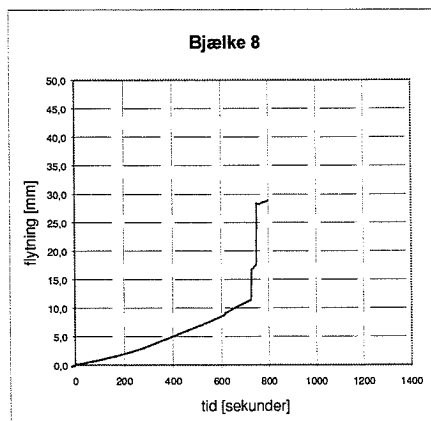
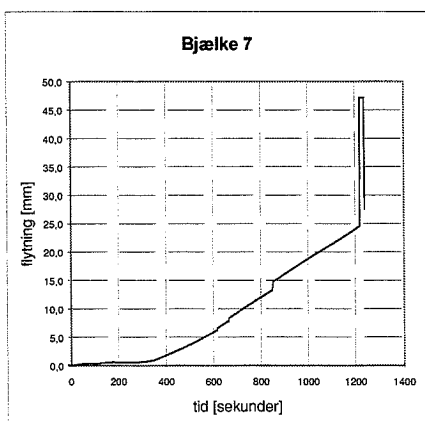
Figur 7.10 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 1 og 4.



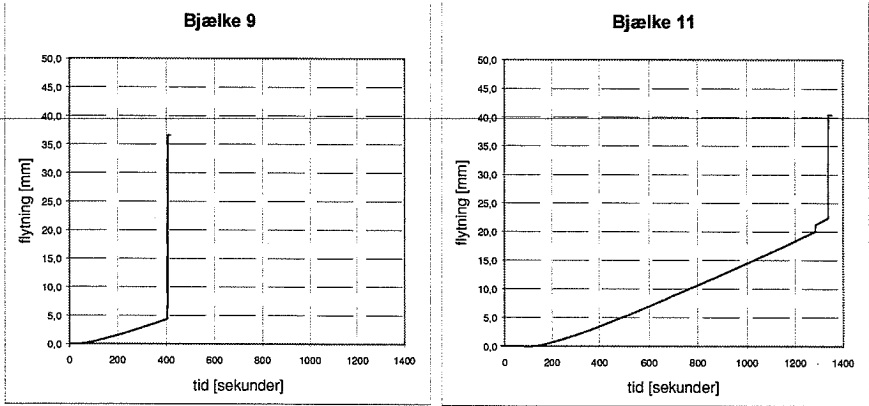
Figur 7.11 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 2 og 3.



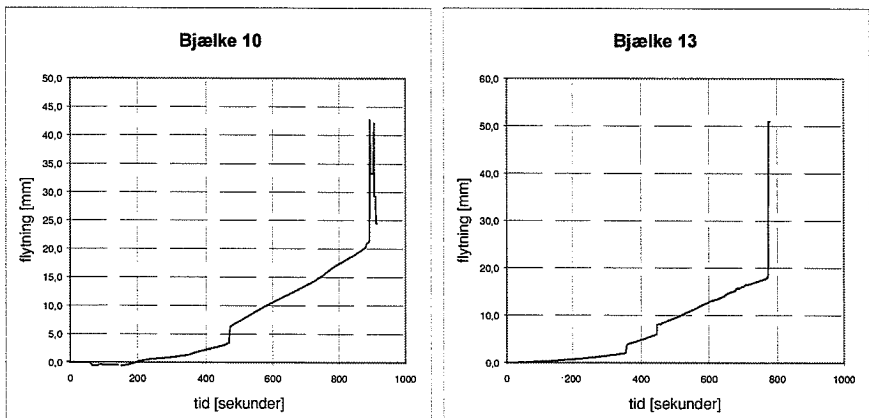
Figur 7.12 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 5 og 6.



Figur 7.13 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 7 og 8.



Figur 7.14 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 9 og 11.



Figur 7.15 Deformation af bjælkemidten som funktion af tiden. Bjælke 10 og 13.

7.2.1 Brudforløb

I dette afsnit beskrives, hvordan bruddene i bjælkerne forløb. De brudlinier, der er skitseret i det følgende, skal forstås som gennemsnitsbrudlinier. Bruddene forløber omkring disse linier oftest i "trapper", der følger skillefladerne. De vandrette brud gik primært i den nederste skilleflade, undtagen i den nederste fuge, hvor bruddet gik i den øverste skilleflade. Ved kritisk brud menes det brud, der indtræffer ved den højeste last. Som nævnt i kapitel 6 er brudlinierne ikke altid synlige. Brudlinierne markeret med "E" antages at have været dannet ved den maksimale last. Det kan ligeledes ikke udelukkes, at enkelte brudlinier ikke på noget tidspunkt har

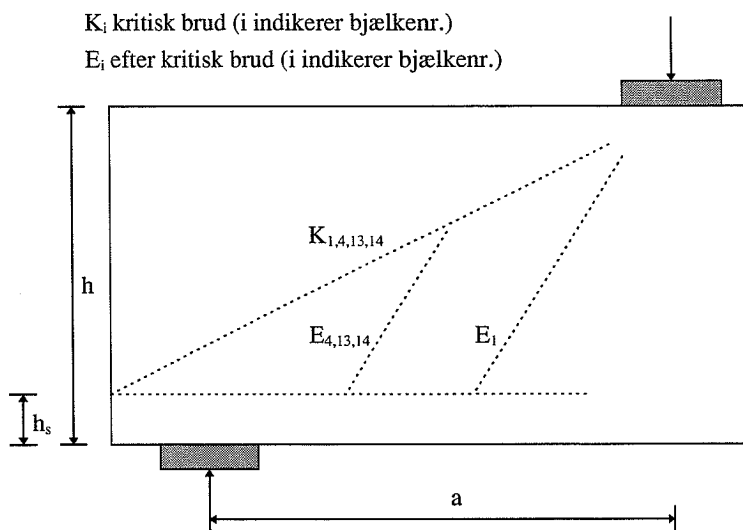
været synlige. I appendix E er vist et billede af bruddet ved henkastvis reposition og ved liggefladen over tegloverliggeren.

I Appendix C findes billeder af de enkelte bjælker, som er taget umiddelbart efter den maksimale last.

For at kunne sammenligne bjælkerne anvendes h/a - forholdet til klassificering af bjælkerne.

Bjælker med et h/a - forhold omkring eller større end 0,567 siges at have et højt h/a - forhold.

Bjælkerne 1 og 4 havde et h/a - forhold på 0,781, og bjælkerne 13 og 14 havde et h/a - forhold på 0,651. Alle disse bjælker fik en kritisk, skrå, brudlinje, der ender uden for understøtningen. Som vist på figur 7.16 svarer dette til, at der brydes et hjørne af. Det bemærkes, at de fire bjælker tillige har en skrå brudlinje, der blev observeret efter kritisk brud, som ligger inden for understøtningen. Sidstnævnte brudlinier kan, som ovenfor nævnt, have være dannet inden kritisk brud uden at have været synlige.



Figur 7.16 Brudforløbet i bjælkerne 1, 4, 13 og 14

Efter det kritiske brud brød bjælkerne 4, 13 og 14 endeligt ved et skråt og et vandret brud som vist på figur 7.16 . Bjælke 1 brød lidt anderledes, som vist på figuren. Den last, der skal til at frembringe de efterfølgende brud, er i begge tilfælde betydeligt lavere end den højeste last.

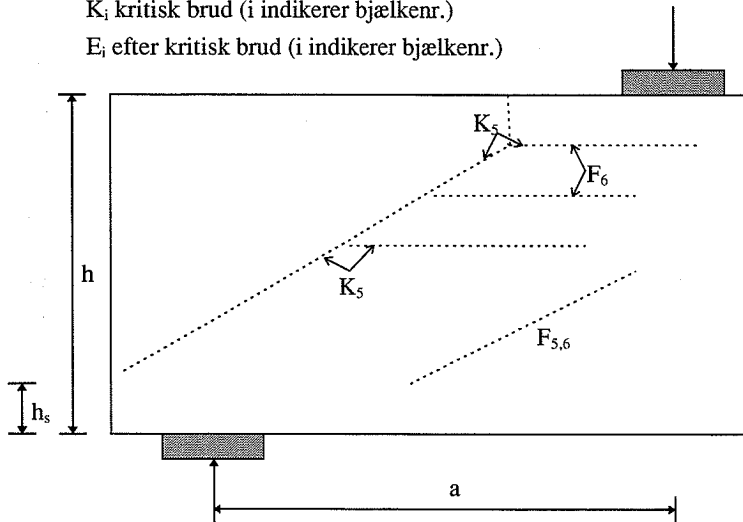
Bjælke 5 og 6 havde et h/a - forhold på 0,624, hvilket også er et højt forhold, men dog mindre end bjælkerne 1, 4, 13 og 14. Ved disse bjælker observeredes, at det første brud kom inden for understøtningerne som vist på figur 5.2. Dette brud var ikke det kritiske. Det kritiske brud

forløb vandret et stykke i en af de øverste skifter og dernæst skrå ned uden for understøtningen.

F_i før kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)

K_i kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)

E_i efter kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)

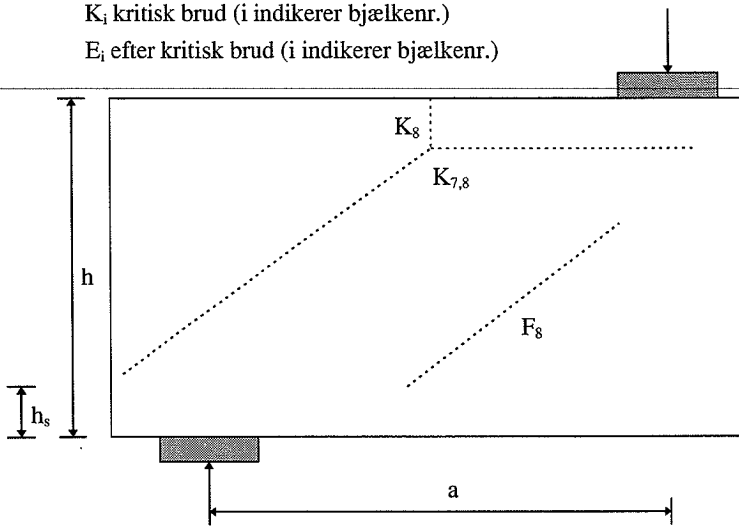


Figur 7.17 Brudforløbet i bjælkerne 5 og 6.

Ved bjælke 6 observeredes, at bjælken brød vandret og skråt et par gange. Det viste sig, at det ikke var ved det første brud, bjælken nåede den højeste last, men at højeste last først fremkom efter at bjælken havde brudt vandret i to fuger i bjælkens top. Det bør dog bemærkes, at forskellen på belastningen ved bruddet i første skifte (ca. 22kN) og tredje (ca. 23kN) ikke var mere end 1 kN.

Bjælke 7 og 8 havde begge et h/a - forhold på 0,468 , men brød på to forskellige måder. Bjælke 7 brød på samme måde som 5 og 6, men dog uden at bryde i en skrå linie indenfor understøtningen. Bjælke 8 brød først i en skrå linie inden for understøtningerne og derefter i en lodret linie udgående fra den skrå brudlinie, se figur 7..

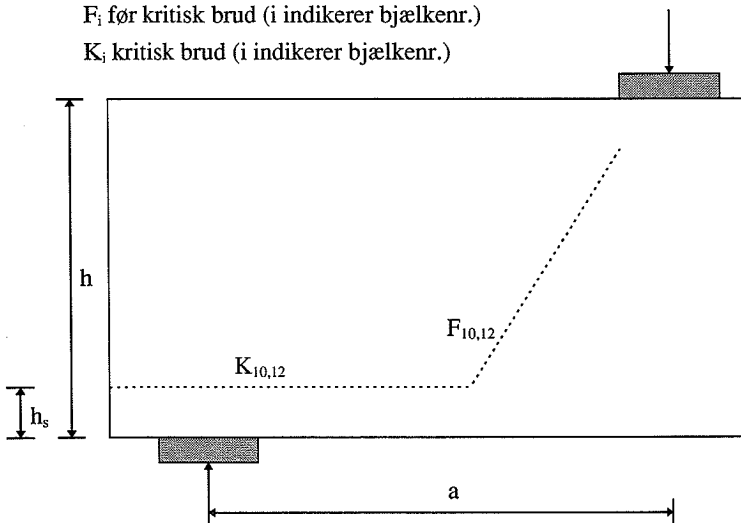
F_i før kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)
 K_i kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)
 E_i efter kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)



Figur 7.18 Brudforløbet i bjælkerne 7 og 8.

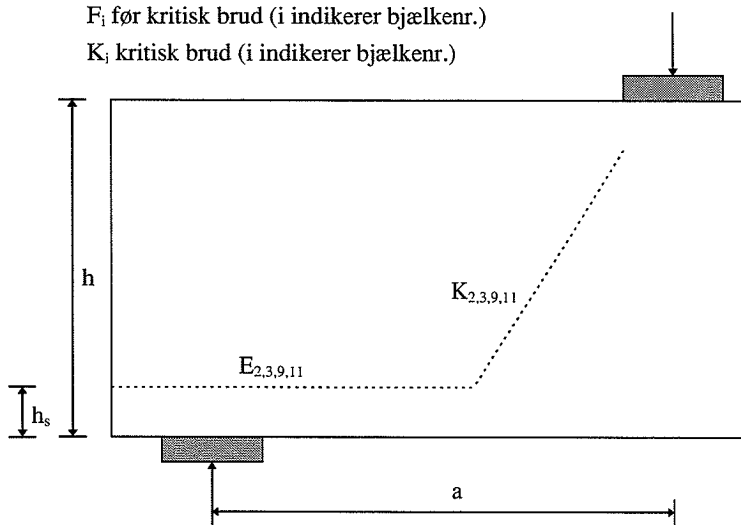
Bjælke 10 og 12 havde et h/a - forhold på 0,435. Disse to bjælker brød på samme måde, først i en skrå linie udgående fra understøtningen og forløbende opefter og derefter i en kritisk brudlinie i nederste fuge, se figur 7..

F_i før kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)
 K_i kritisk brud (i indikerer bjælkenr.)



Figur 7.19 Brudforløbet i bjælkerne 10 og 12.

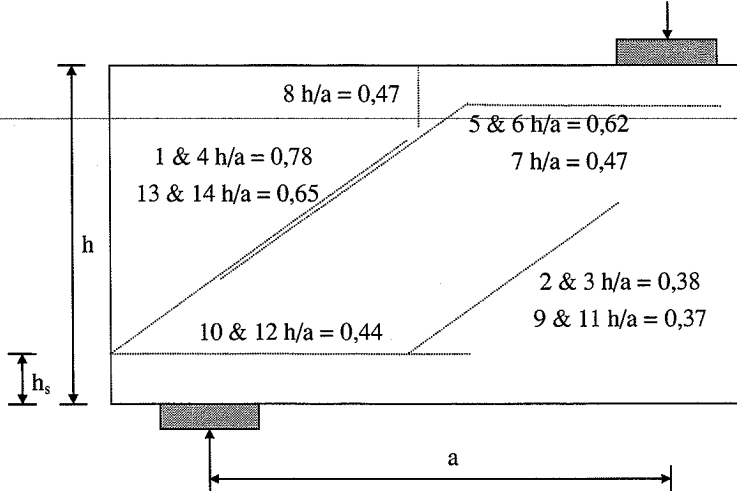
Bjælke 2 og 3 havde et h/a - forhold på 0,576, og bjælke 9 og 11 et forhold på 0,500. Disse 4 bjælker brød stort set på samme måde som 10 og 12. Det første skrå brud var det kritiske. Bjælke 2 og 3 fik foruden en vandret revne i nederste fuge også en lodret revne i de øverste skifter.



Figur 7.20 Brudforløbet i bjælkerne 2, 3, 9 og 11.

På figur 7. er alle brudforløb (kritiske, dvs. mærket “K”) sammenfattet på én skitse. Som tidligere nævnt kan brudlinier, som er blevet synlige efter maksimal last (mærket “E”) godt have været dannet før den kritiske last.

Det ses at det kritiske brud primært er afhængigt af h/a - forholdet. I det følgende forsøges det at give en forklaring på de forskellige brudformer.



Figur 7.21 *Sammenfatning af alle brud.*

7.2.2 Store h/a forhold.

For de store h/a - forhold gælder det, at alle har et kritisk skråt brud hvis ene ende er uden for understøtningen. Dette skyldes, at bruddet vil gå igennem det svageste led, der er skillefladen. Da “trappebrud” ikke kan lade sig gøre inden for understøtningerne, kommer bruddet udenfor. Bruddet er således en trappelinie, der kommer så tæt på understøtningen som geometrisk muligt.

Bjælke 5 og 6 har et lidt mindre h/a - forhold end de andre bjælker med store h/a forhold. Ser man på brudbillederne af de to bjælker, kan det se ud som om de har forskellige brudmåder. Dette er dog næppe tilfældet.

Hvis bjælke 5 var blevet deformeret yderligere ville den efter al sandsynlighed have fået samme brudforløb som bjælke 6. Dette stemmer med de målte last/udbøjningskurver, se figur 7., der sandsynliggør at bæreevnen for bjælke 5 ikke blev nået.

Bruddene for store h/a forhold er karakteristisk ved at skifterne efterhånden bliver inaktive ved dannelsen af vandrette glidningsbrud, dvs. bjælkerne reducerer den effektive højde fra oven og nedefter. Det er bemærkelsesværdigt, at denne reduktion af højden ikke reducerer bæreevnen væsentligt, ja sommetider forøger den. Det kan eventuelt hænge sammen med at styrken i fugerne/skillefladerne vokser svagt nedefter, hvilket må være en effekt af opmuringen.

Bjælkerne 7 og 8 har et mellemliggende h/a - forhold. Disse bjælker brød på to forskellige måder. Den ene bjælke (7) fik et brudforløb med brudlinier, der løber uden for belastningspunkterne (som 5 og 6), mens den anden (8) fik et brudforløb med brudlinier, der ligger inden for belastningspunkterne. Disse to bjælker havde et h/a - forhold på 0,468, der er tæt på 0,567, som er skillelinien for, hvornår et trappebrud inden for belastnings/understøtnings punkterne er muligt.

Grænseforholdet på 0,567 skal tages med forbehold, idet grænsen er lidt afhængigt af, om belastningen står midt på en sten eller eventuelt på en fuge.

Bjælke 7 fik samme type brud som bjælke 5 og 6, dog med den forskel, at der ikke før endeligt brud forekom et skråt brud inden for understøtningen. Denne bjælkes brud kan derfor forklæres på same måde som bruddet for bjælke 6.

Årsagen, til at bjælke 7 og 8 ikke kan bære så meget som bjælke 6 (efter at de to øverste skifter er skudt af), må skyldes forskellen i "belastningsbredden". Hvor der ved bjælke 7 og 8 kun er en bredde svarende til selve belastningspladen til rådighed, er der i bjælke 6 mulighed for at fordele trykket gennem de to øverste skifter.

Bjælke 8 brød skråt ned fra belastningspunktet og derefter vandret i nederste fuge.

7.2.4 Små h/a -forhold

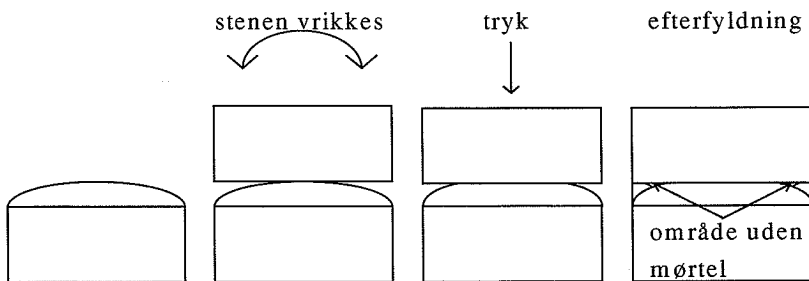
Bjælkerne 2, 3, 9, 11, 10 og 12 brød alle grundlæggende ens, dvs. på samme måde som bjælke 8. De brød alle i to omgange, første gang i et skråt brud (i trappelinie), anden gang i et vandret brud i en skilleflade. Ved bjælke 10 og 12 ($h/a=0,435$) var det det vandrette brud, der krævede den største belastning, og derfor blev det det kritiske. Ved 2, 3 ($h/a=0,376$), 9 og 11 ($h/a=0,366$) var det det skrå brud, der krævede størst belastning, hvilket gjorde dette til det kritiske brud. Dette betyder, at skellet mellem hvornår det er det skrå brud, der er mest krævede, og hvornår det er det vandrette brud, der er mest krævede, tilsyneladende ligger i h/a - intervallet 0,376 til 0,435. Men som tidligere nævnt kan brud, der ikke er synlige ved brud godt have været dannet ved maksimal last. Ved bjælke 12 kan man se, at begge brud sker ved næsten samme belastning.

Vi slutter med nogle bemærkninger vedrørende indflydelsen af den håndværksmæssige udførelse på murværks styrke.

Når mureren lægger mørtelen, rammer mørtelklatten midt på stenen, og herefter trykkes en ny sten ned i mørtelklatten. På dette tidspunkt er fugen som regel ikke helt fyldt ud. Det bliver den først senere, når mureren laver fugerne "pæne". Dette betyder, at mørtelen bliver lagt på af flere omgange, og at den ikke er lige godt presset sammen over det hele. Dette kan have en styrkereducerende virkning.

I det foreliggende tilfælde blev fugerne fyldt op på begge sider af bjælkerne, men i de tilfælde hvor fugerne kun er fyldt op på den ene side, må man sikkert regne med en endnu større styrkereduktion.

Når mureren lægger den næste sten, "vrikker" han den på plads, som vist på figur 8.1. Dette kan medføre, at der er et slip mellem sten og mørtel. Det kan være svært at vurdere, om dette slip fyldes ud, når mureren fylder fugen op. Dette må afhænge meget af, hvor lang tid der går, inden der fyldes efter, og hvor våd den mørtel, der fyldes efter med, er. Også dette forhold kan have en styrkereducerende virkning.



Figur 8.1 Effekten af at stenen "vrikkes" på plads.

- [1982.1] Goodwin J. F. & H. W. H. West: "A Review of the Literature on Brick/Mortar Bond". Proceedings of the British Ceramic Society. Load-Bearing Brickwork (7). 1982.
- [1984.1] Nielsen M. P.: "Limit Analysis and Concrete Plasticity". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1984.
- [1997.1] Hansen, Klavs Feilberg, Esa Nykänen & Finn R. Gotfredsen: "Shear behavior of bed joints at different levels of precompressions". Statens Byggeforskningsinstitut. 1997.
- [1998.2] Gudmand-Høyer, T. & L. Z. Hansen: "Forskydningskapacitet af simpelt understøttede teglbjælker" Midtvejsprojekt. BKM, DTU. 1998.
- [1999.1] Hagsten, L. G. "Plastcitetsteori for murværk. Del 4 - teglbjælkens forskydningskapacitet". BKM, DTU. Udkommer 1999.

I nedenstående skema angives de målinger/beregninger, der er udført på den friske mørtel.

Målte data til bestemmelse af vandbehov, vandudskillelse og konsistens:

Blanding	Bjælker	$M_{t,før}$	$M_{t,efter}$	$M_{v,før}$	$M_{v,efter}$	$V_{vand,1}$	$V_{vand,3}$	D_{flyd}
nr	nr	[kg]	[kg]	[kg]	[kg]	[ml]	[ml]	[mm]
1	1	80	0	12,8	0	1	0,3	135
2	1&2	80	0	13,4	0	0	0	149
3	3	x	x	x	x	x	x	x
4	3&4	80	0	12,8	0	1	0,1	152,1
5	5	x	x	x	x	x	x	x
6	6	x	x	x	x	x	x	x
7	7	80	0	12,8	0	0,3	0,1	141
8	8&9	x	x	x	x	x	x	x
9	9&10	x	x	x	x	x	x	x
10	11	80	0	12,8	0	1	0,2	148
11	0	x	x	x	x	x	x	x
12	0	x	x	x	x	x	x	x

$M_{t,før}$: vægt af tørstoffet før blanding af mørtel (vandbehov)

$M_{t,efter}$: vægt af tørstoffet efter blanding af mørtel (vandbehov)

$M_{v,før}$: vægt af vand+ spand før blanding af mørtel (vandbehov)

$M_{v,efter}$: vægt af vand+ spand efter blanding af mørtel (vandbehov)

$V_{vand,1}$: vandudskillelsen efter 1 time (vandudskillelse)

$V_{vand,3}$: vandudskillelsen efter 3 time (vandudskillelse)

D_{flyd} : Den udflydte mørtelkages nedre diameter (konsistens)

Table data for determination of water content, air content and density.

Blanding	M _{før}	M _{efter}	V _{mørtel}	V _{sænk}	M _{kar}	M _{tot}	V _{kar}	M _{pet}
nr	[g]	[g]	[ml]	[ml]	[g]	[g]	[mm ³]	[g]
1	19,9	23,4	300	11	495,9	6368,1	2760000	47,19
2	19,3	23	280	10	495,9	6253	2760000	46,94
3	x	x	x	x	x	x	x	43,94
4	20,1	23,7	295	12	495,9	6350,9	2760000	46,1
5	x	x	x	x	x	x	x	49,81
6	x	x	x	x	x	x	x	50,79
7	17,6	21,3	305	7	495,9	6268,5	2760000	50,46
8	x	x	x	x	x	x	x	47,61
9	x	x	x	x	x	x	x	45,51
10	17,5	23,2	310	9	495,9	6349,9	2760000	46,39
11	x	x	x	x	x	x	x	41,88
12	x	x	x	x	x	x	x	46,43

M_{før}: vægt af 8 lag trækpapir og gaze, før forsøgets start.

M_{efter}: vægt af 8 lag trækpapir og gaze, efter forsøgets afslutning.

V_{mørtel}: mørtelens volumen ved forsøgets start.

V_{sænk}: mørtelens volumen ved forsøgets afslutning.

M_{kar}: målekarets vægt

M_{tot}: vægt af målekaret med mørtel

V_{kar}: målekarets volumen

M_{pet}: vægt af petriskål

Blanding	M _{för}	M _{efter}
nr	[g]	[g]
1	496,29	493,02
2	727,12	721,34
3	710,62	704,71
4	707,83	701,49
5	732,19	726,22
6	722,46	716,09
7	746,67	740,55
8	725,92	720,41
9	715,71	710,15
10	734,13	728,14
11	281,75	279,79
12	703,58	698,04

Tabell 3: Data til bestemmelse af bøjningsbrud- og trykstyrke.

Blanding	Prøvelegeme	F_{brud}	$f_{t,b}$	$f_{t,b}$ for bl.	P_{brud}	$f_{c,m}$	$f_{c,m}$ for bl.
nr.	nr.	[N]	[MPa]	[MPa]	[N]	[MPa]	
1	1	0					
	2	800	1,88	1,88	8500	5,31	5,31
	3						
2	1	975	2,29		8550	5,34	
	2	900	2,11	2,21	7600	4,75	5,08
	3	950	2,23		8250	5,16	
3	1	1000	2,34		8950	5,59	
	2	1000	2,34	2,34	11000	6,88	6,13
	3	990	2,32		9450	5,91	
4	1	980	2,30		10950	6,84	
	2	1100	2,58	2,52	10200	6,38	6,57
	3	1150	2,70		10400	6,50	
5	1	910	2,13		10650	6,66	
	2	850	1,99	1,97	9300	5,81	6,26
	3	760	1,78		10100	6,31	
6	1	1100	2,58		9850	6,16	
	2	1100	2,58	2,51	12000	7,50	6,91
	3	1010	2,37		11300	7,06	
7	1	1025	2,40		11050	6,91	
	2	800	1,88	2,25	11050	6,91	7,06
	3	1050	2,46		11800	7,38	
8	1	1000	2,34		11200	7,00	
	2	950	2,23	2,30	11550	7,22	7,03
	3	1000	2,34		11000	6,88	
9	1				11000	6,88	
	2	975	2,29	2,20	7800	4,88	6,25
	3	900	2,11		11200	7,00	
10	1	975	2,29		10850	6,78	
	2	1175	2,75	2,62	11200	7,00	6,80
	3	1200	2,81		10600	6,63	
11	1	1100	2,58				
	2			2,58	11800	7,38	7,38
	3						
12	1	1050	2,46		9750	6,09	
	2	1080	2,53	2,43	10000	6,25	5,99
	3	975	2,29		9000	5,63	

F_{brud} : kraft som fremkalder bøjningsbrud

$f_{t,b}$: bøjningstrækstyrke

P_{brud} : kraft som fremkalder trykbrud

$f_{c,m}$: trykstyrke

Blanding	Vandm.	V _{vand,1}	V _{vand,3}	Konc.	Vandh	Luftindh.	f _{t,b}	f _{c,k}	Vandindh.
nr	[%vægt]	[ml]	[ml]			[%vol]	[MPa]	[MPa]	[%vægt]
1	16,00	1,00	0,30	1,50	3,50	3,67	1,88	5,31	0,73
2	16,75	0,00	0,00	1,66	3,70	3,57	2,21	4,75	0,86
3	x	x	x	x	x	x	2,34	6,88	0,89
4	16,00	1,00	0,10	1,69	3,60	4,07	2,52	6,38	0,97
5	x	x	x	x	x	x	1,97	5,81	0,88
6	x	x	x	x	x	x	2,51	7,50	0,96
7	16,00	0,30	0,10	1,57	3,70	2,30	2,25	6,91	0,89
8	x	x	x	x	x	x	2,30	7,22	0,82
9	x	x	x	x	x	x	2,20	4,88	0,84
10	16,00	1,00	0,20	1,64	5,70	2,90	2,62	7,00	0,88
11	x	x	x	x	x	x	2,58	7,38	0,82
12	x	x	x	x	x	x	2,43	6,25	0,85

Appendix B Forsøgsresultater; sten

På de sten, der blev anvendt i murværksbjælkerne, er følgende parametre blevet løstemt.

sten	h_1	h_2	b_1	b_2	l	$m_{\text{før}}$	m_{efter}	målt på
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[g]	[g]	
4a	53,90	55,30	108,60	108,00	229,00	2516,80	2562,60	underside
4b	54,00	54,50	108,30	108,50	229,00	2504,20	2550,80	underside
4c	53,90	55,40	108,40	107,60	229,40	2506,90	2551,30	underside
4d	54,50	54,40	108,30	108,00	229,20	2494,50	2539,80	underside
4e	54,30	54,30	108,30	108,00	229,20	2504,40	2549,50	underside
4f	55,30	53,70	108,00	108,50	229,50	2502,30	2548,80	overside
4g	56,00	54,50	107,80	108,10	228,80	2522,40	2569,30	overside
4h	54,00	54,40	108,50	108,10	229,70	2500,30	2550,30	overside
4i	54,40	54,00	108,30	107,90	229,50	2504,40	2554,40	overside
4j	55,40	54,40	108,00	108,20	228,70	2527,00	2574,10	overside
Middel	54,57	54,49	108,25	108,09	229,20	2508,32	2555,09	

h_1, h_2 : stenens højde målt i hver ende af stenen

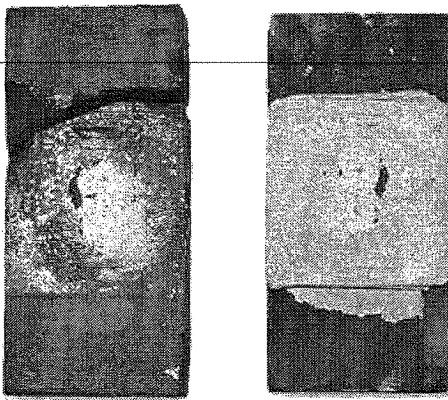
b_1, b_2 : stenens bredde målt i hver ende af stenen

l : stenenes længde

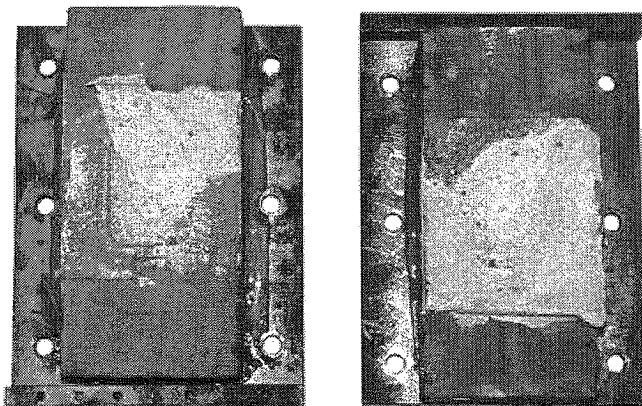
$m_{\text{før}}$: stenens vægt før forsøget (minutsugningen)

m_{efter} : stenens vægt efter forsøget (minutsugningen)

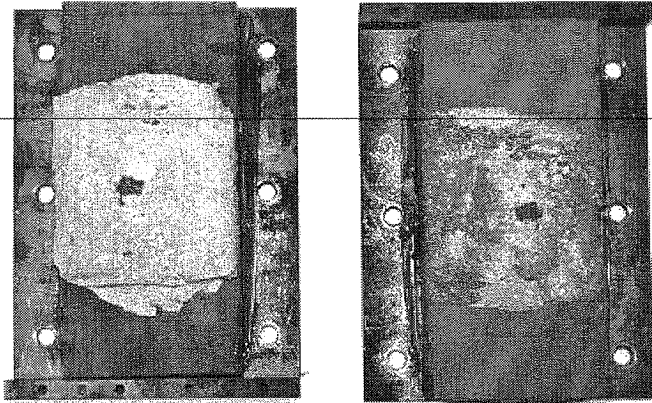
Stenes minutsugning og bruttodensitet			
sten	Minutsugning	Middel	Bruttodensitet
			[kg/m ³]
4a	1,85	1,83	1895,50
4b	1,88		1886,77
4c	1,79		1887,14
4d	1,83		1878,64
4e	1,82		1885,81
4f	1,87	1,94	1885,29
4g	1,90		1900,46
4h	2,01		1886,40
4i	2,02		1889,44
4j	1,91		1904,01
Middel		1,885	1889,95



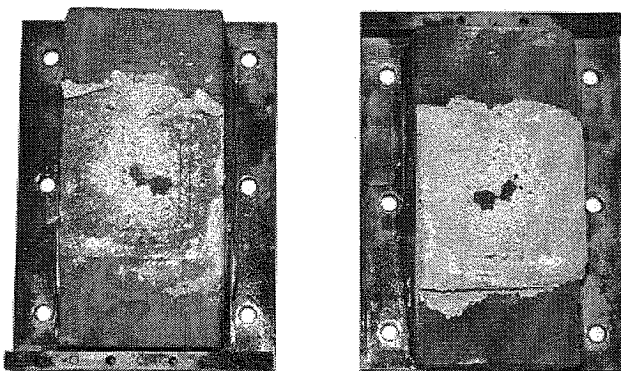
Figur C.1 Skillefladeforsøg. $s_n = 0,05 \text{ MPa}$. (Bruddet i stenen til venstre er sket efter forsøgets afslutning.)



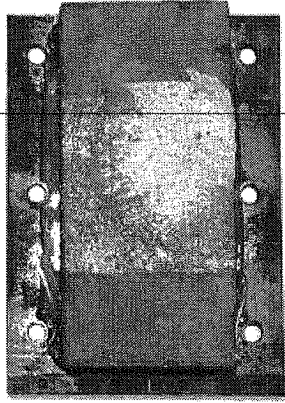
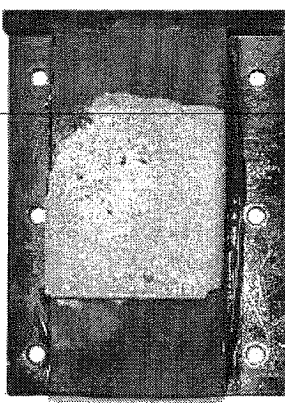
Figur C. 2 Skillefladeforsøg. $s_n = 0,10 \text{ MPa}$



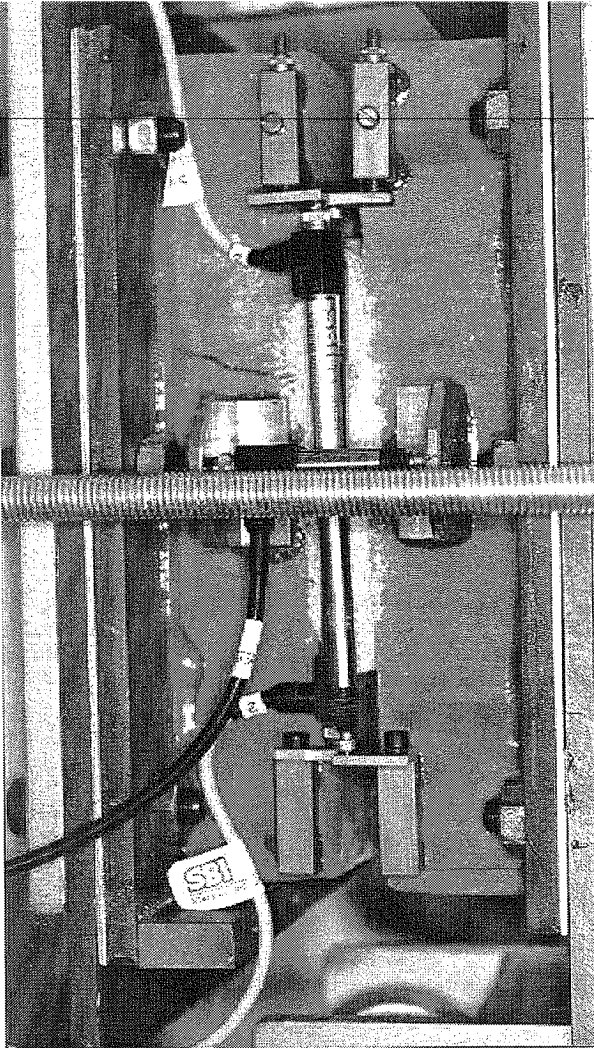
Figur C.3 Skillefladeforsøg. $s_n = 0,15 \text{ MPa}$



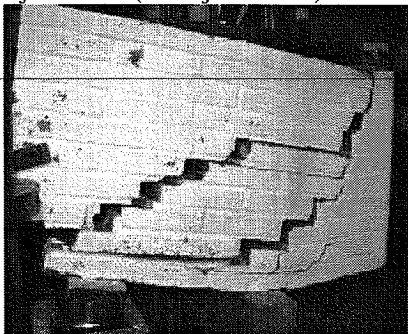
Figur C.4 Skillefladeforsøg. $s_n = 0,25 \text{ MPa}$



Figur C.5 Skillefladeforsøg. $s_n = 0,50 \text{ MPa}$



Figur C.6 *Forsøgsopstilling*



Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 667 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 10

Armering 2 stk. Y8

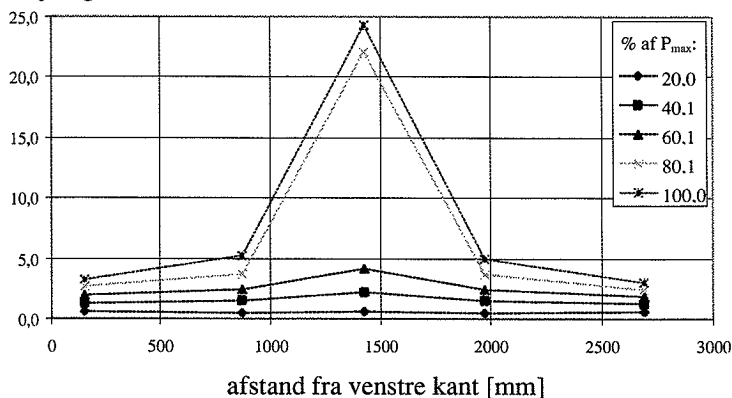
Blandingsnummer "1" til og med 7. skifte, derefter "2"

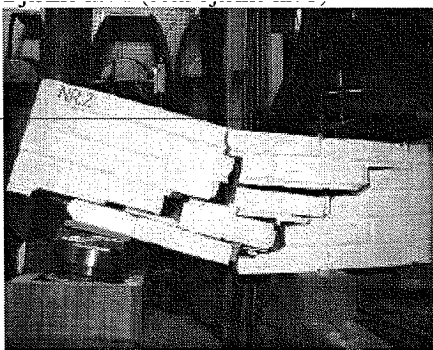
Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 5,31$ MPa (1. blanding) $f_{c,m} = 5,08$ MPa (2. blanding)Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48$ MPaMinutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 18,48 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 1

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 321 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 5

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 2

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 5,08 \text{ MPa}$

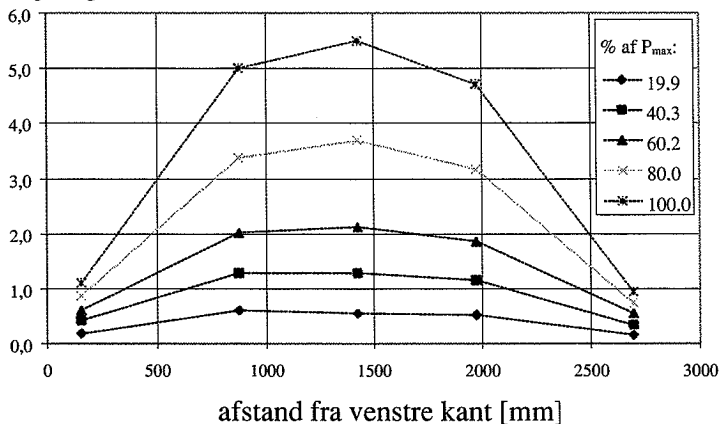
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 6,68 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 2

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (højre side)

Højde: 321 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 5

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 4

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,57 \text{ MPa}$

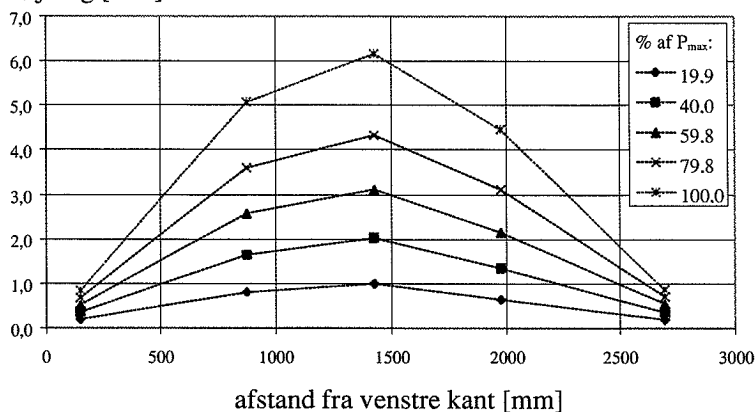
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

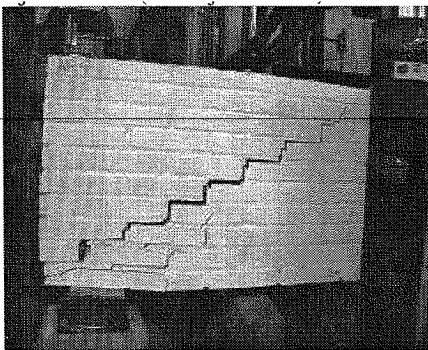
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 6,84 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 3

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 667 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 10

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer "3" til og med 7. skifte, derefter "4"

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,13 \text{ MPa}$ (3. blanding)

$f_{c,m} = 6,57 \text{ MPa}$ (4. blanding)

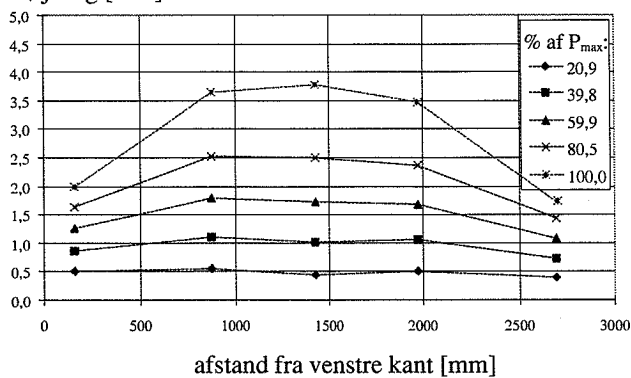
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

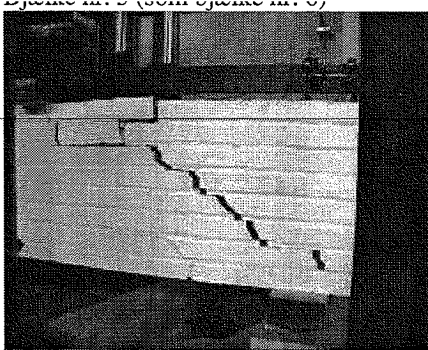
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 15,02 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 4

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (højre side)

Højde: 533 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 8

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 5

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,26 \text{ MPa}$

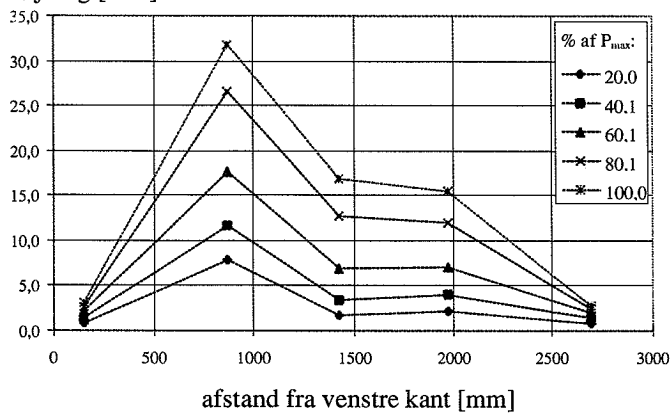
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

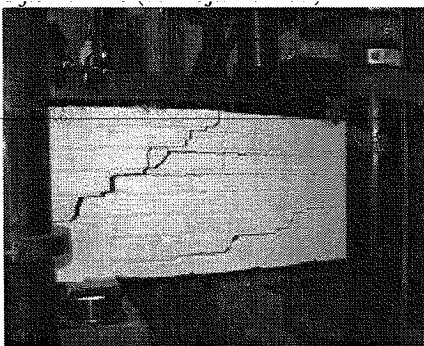
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 24,10 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 5

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 533 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 8

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 6

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,91 \text{ MPa}$

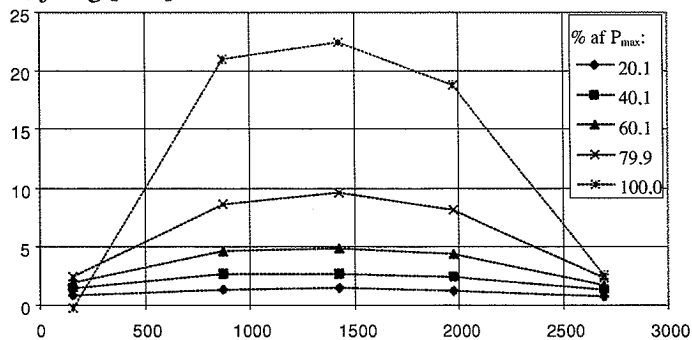
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

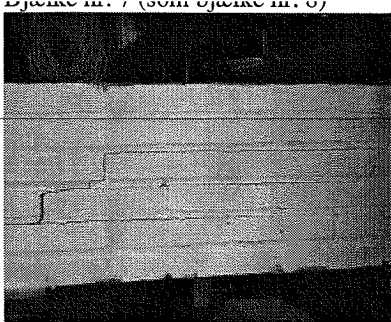
Brudlast: 22,81 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 6

nedbøjning [mm]



afstand fra venstre kant [mm]



Bjælke før brud (venstre side)

Højde: 400 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 6

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 7

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 7,09 \text{ MPa}$

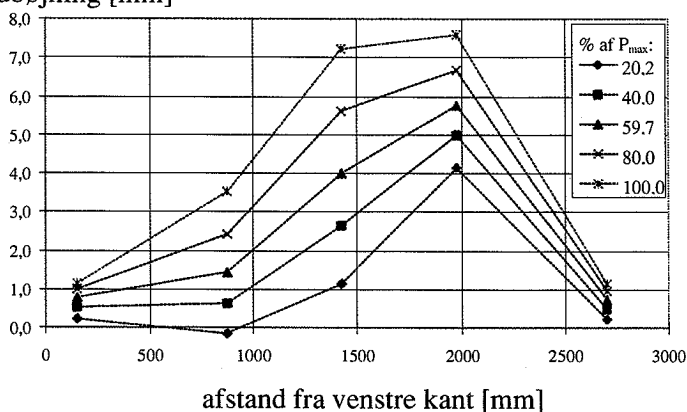
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 6,84 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 7

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 400 mm

Længde: 2868 mm

Antal skifter 6

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 8

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 7,03 \text{ MPa}$

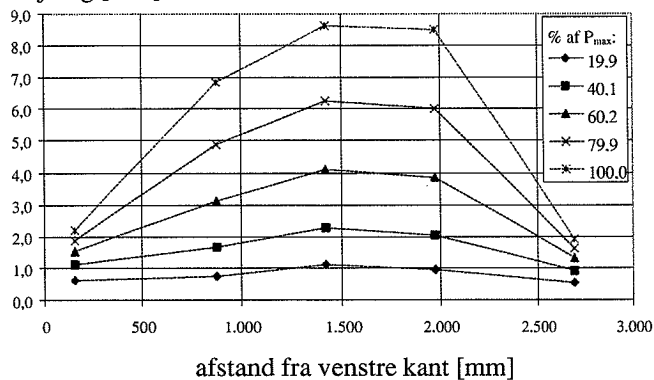
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

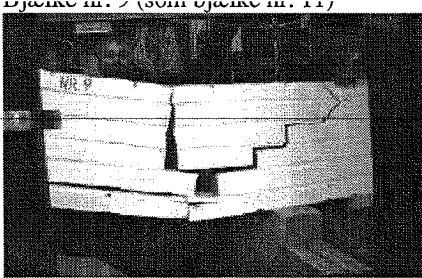
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 12,50 KN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 8

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 400 mm

Længde: 3588 mm

Antal skifter 6

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 8 til og med 3. skifte, derefter blanding 9

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 7,03 \text{ MPa}$ (blanding 8)

$f_{c,m} = 6,25 \text{ MPa}$ (blanding 9)

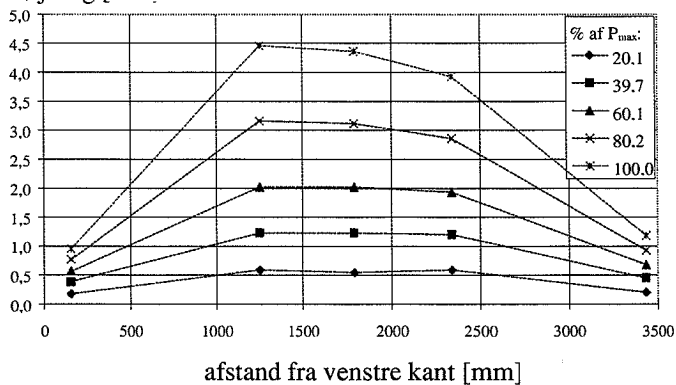
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

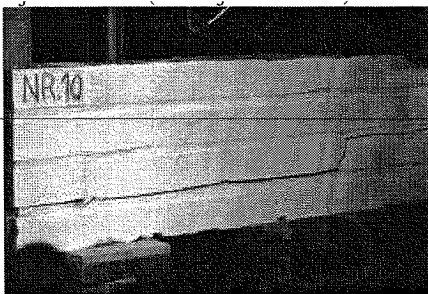
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 4,52 KN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 9

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 267 mm

Længde: 2148 mm

Antal skifter 4

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 9

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,25 \text{ MPa}$

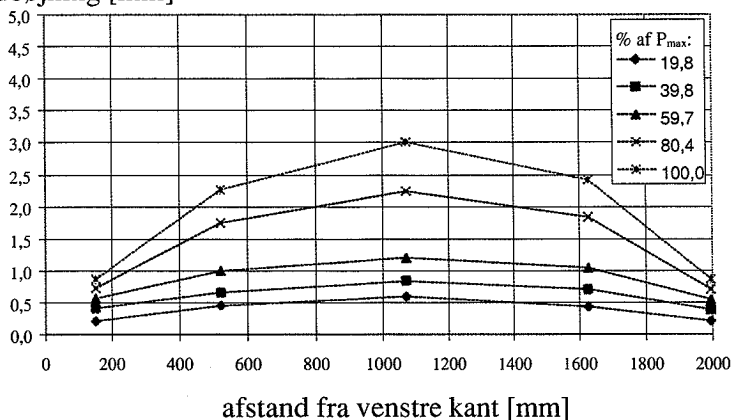
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

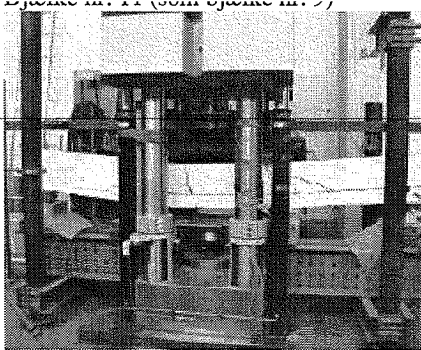
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 3,91 kN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 10

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud

Højde: 400 mm

Længde: 3588 mm

Antal skifter 6

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 10

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 6,80 \text{ MPa}$

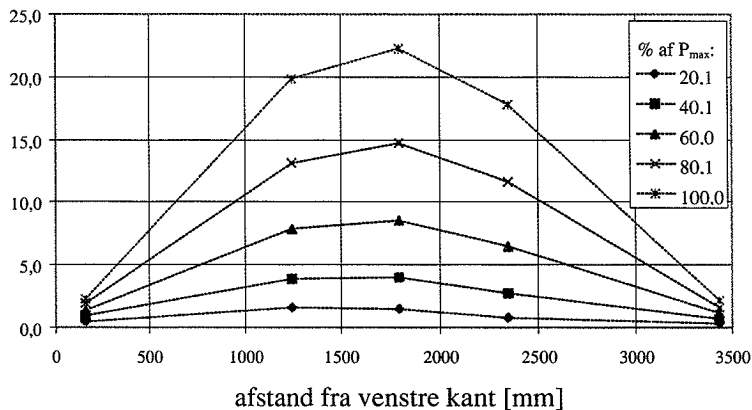
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

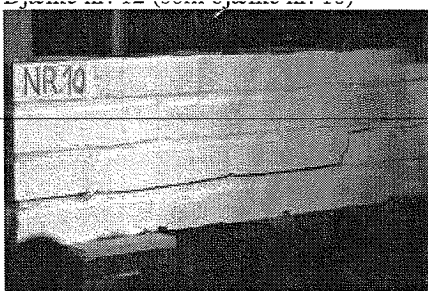
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 10,79 KN

Nedbøjningsniveauer for bjælke 11

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (venstre side)

Højde: 267 mm

Længde: 2148 mm

Antal skifter 4

Armering 2 stk. Y8

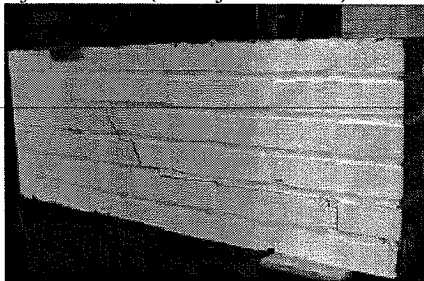
Blandingsnummer 9

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 7,38 \text{ MPa}$

Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 6,34 KN



Bjælke efter brud (højre side)

Højde: 267 mm

Længde: 2148 mm

Antal skifter 4

Armering 2 stk. Y8

Blandingsnummer 11

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 7,38 \text{ MPa}$

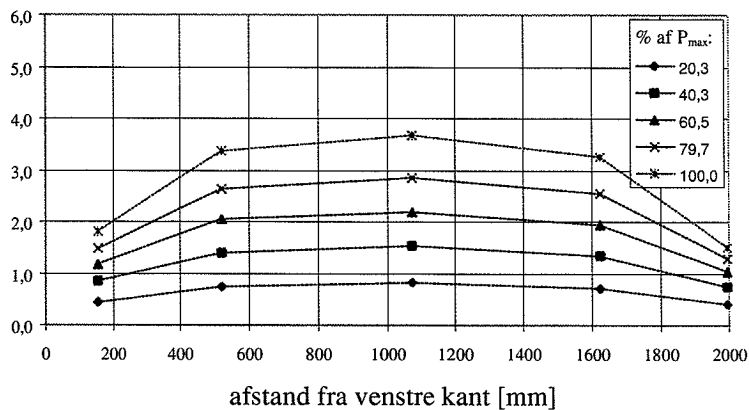
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

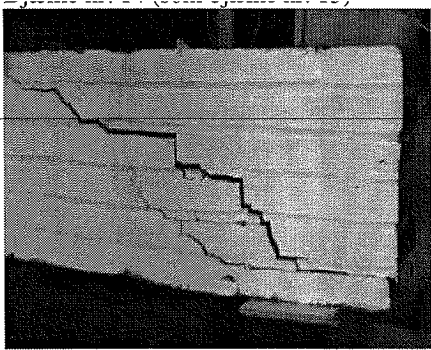
Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

Brudlast: 8,64 KN

nedbøjningsniveauer for bjælke 13

nedbøjning [mm]





Bjælke efter brud (højre side)

Højde: 267 mm

Længde: 2148 mm

Antal skifter 4

Armering 2 stk. Y8

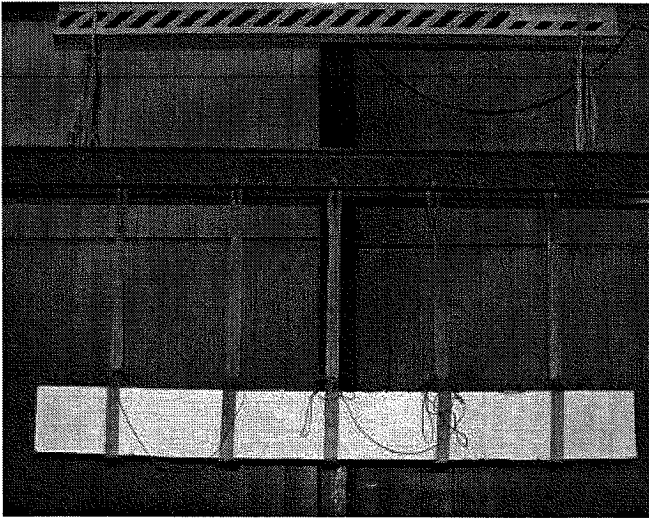
Blandingsnummer 12

Mørtelens trykstyrke: $f_{c,m} = 5,99 \text{ MPa}$

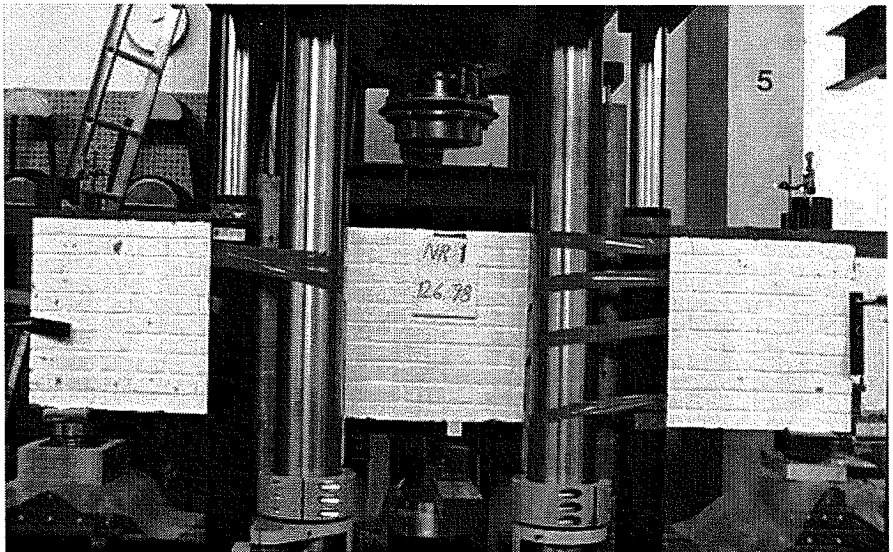
Stenenes trykstyrke: $f_{c,s} = 11,48 \text{ MPa}$

Minutsugning: $1,885 \text{ kg/m}^2/\text{min.}$

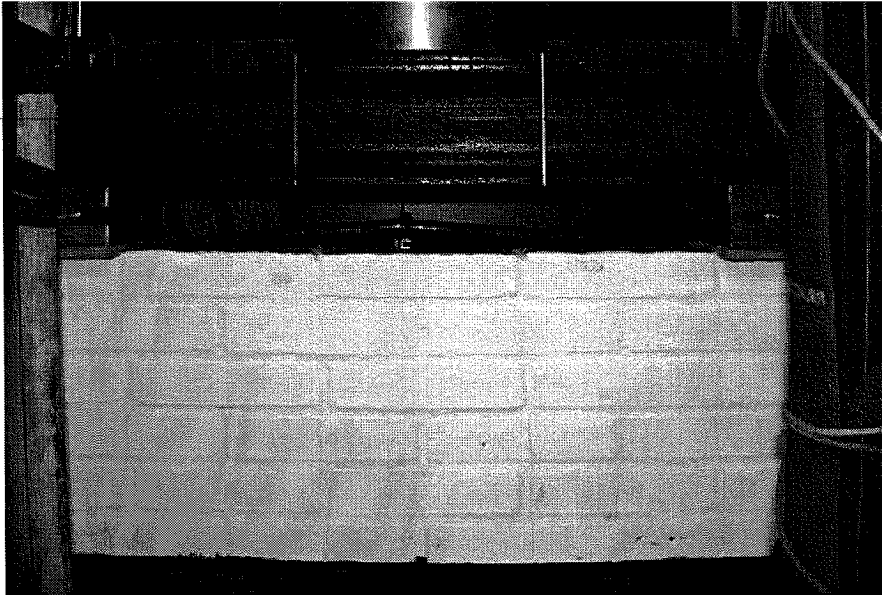
Brudlast: 12,61 KN



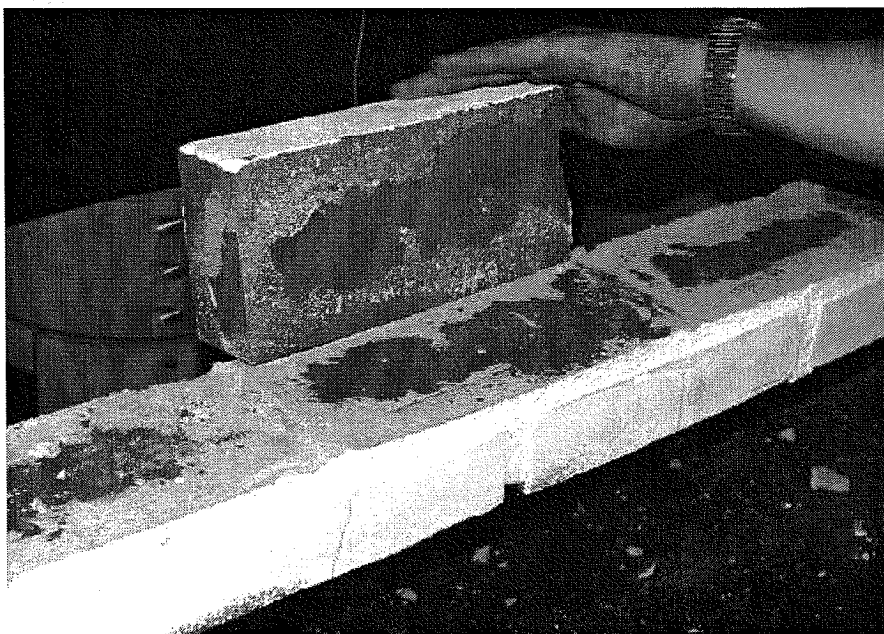
Figur E-1 *Hejsearrangement*



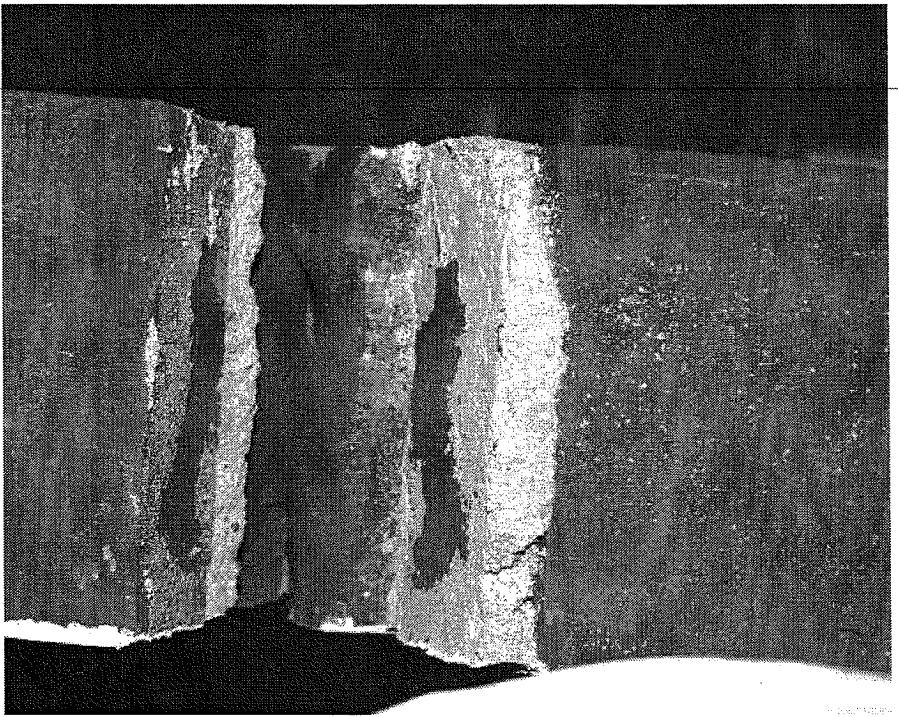
Figur E-2



Figur E-3 *Belastning*



Figur E-4 *Brud i øverste skilleflade over tegloveliggeren*



Figur E-5 *Brud ved kopenden. Bjælke 3.*

SERIE R
(Tidligere: Rapportør)

- R 33. TORBEN VALDBJØRN RASMUSSEN: Time Dependent Interfacial Parameters in Cementitious Composite Materials. 1997.
- R 34. KAREN GRØNDAHL LORENZEN, M.P. NIELSEN: Koncentreret last på beton. 1997.
- R 35. ANDERS BOE HAUGGAARD – NIELSEN: Mathematical Modelling and Experimental Analysis of Early Age Concrete. 1997.
- R 36. JUN YING LIU: Plastic Theory Applied to Shear Walls – Load – Carrying Capacity of Shear Walls. 1997.
- R 37. WILLIAM E. WARREN OG ESBEN BYSKOV: Micropolar and Nonlocal effects in Spatially Periodic, Two – Dimensional Structures. 1997.
- R 38. NIELSEN, LAUGE FUGLSANG: Modified Dugdale Crack Models. 1998.
- R 39. POULSEN, JOHANNES SAND: Compression in Clear Wood. 1998.
- R 40. COLLETTE, FRÉDÉRIC S.: A Combined Tuned Absorber and Impact Damper. 1998
- R 41. ZHANG, JUN.: Fatigue Fracture of Fibre Reinforced Concrete-An Experimental and Theoretical Study.
- R 42. OLSEN, DAVID HOLKMANN: Concrete Fracture and Crack Growth A Fracture Mechanocs Approach 1998
- R 43. HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Determination of te Fracture Energy of Concrete- Comparison of te TPBT and theWST Method 1998
- R 44. NIELSEN, LAUGE FUGLSANG: Modified Dugdale cracks and Fictitious cracks Characteristics at critical and sub-critical loading
- R 45. CHRISTIANSEN, MORTEN BO: Crack Tip Stress Field Modelling 1998
- R 46. JENSEN, MEJLHEDE OLE: Clinker mineral hydration at reduced relative humidities
- R 47. JENSEN, MEJLHEDE OLE: Influence of temperature on autogenous deformation and RH-change in hardening cement paste
- R 48. HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Holdbarhed af fiberarmeret beton og revnet beton. 1998.
- R 49. LANGE-HANSEN, P.: Comparative Study of Upper Bound Methods for the Calculation of Residual Deformations after Shakedown. 1998.
- R 50. KELLEZI, LINDITA: Dynamic Soil-Structure-Interaction. Transmitting Boundary for Transient Analysis. 1998.
- R 51. MEJLHEDE JENSEN, OLE: Chloride ingress in cement paste and mortar measured by Electronic Probe Micro Analysis. 1999
- R 52. KLENZ LARSEN, POUL: Desalination of painted brick vaults. 1999

Abonnement 1.7.1998 – 30.6.1999 kr. 130,–

Subscription rate 1.7.1998 – 30.6.1999 D.Kr. 130.–.

