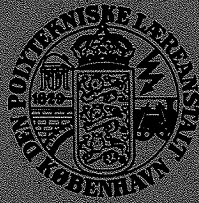


AFDELINGEN FOR  
BÆRENDE KONSTRUKTIONER  
DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



STRUCTURAL RESEARCH LABORATORY  
TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK

J. F. Jensen , C. Pedersen , M. W. Bræstrup,  
F. Bach og M. P. Nielsen

RAPPORT OVER FØRSKYDNINGFORSØG  
MED 6 SPENDBETONBJÆLKER

RAPPORT NR. R 102 1978

RAPPORT OVER FORSKYDNINGSFORSØG  
MED 6 SPENDBETONBJÆLKER

---

J.F. Jensen, civilingeniør

C. Pedersen, civilingeniør

M.W. Bræstrup, civilingeniør, lic.techn.

F. Bach, civilingeniør, lic.techn.

M.P. Nielsen, professor, dr.techn.

FORORD

Forsøgene refereret i denne rapport indgår som et led i et løbende forskningsprojekt, ledet af professor M.P. Nielsen, ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner, og arbejdet er udført med støtte fra Statens teknisk-videnskabelige Forskningsråd. Forsøgsbjælkerne er velvilligst blevet stillet til rådighed af Dansk Spændbeton A/S.

Forsøgsplanlægningen er forestået af J.F. Jensen, der også har udført forsøgene i fællesskab med F. Bach.

C. Pedersen har udfærdiget nærværende rapport, blandt andet under anvendelse af et EDB-program, der er udviklet af M.W. Bræstrup i forbindelse med tidligere forsøg.

RESUME

Rapporten beskriver forskydningsforsøg med seks forspændte jernbetonbjælker med I-tværsnit. Af forsøgene konkluderes, at trykbrudkriteriet for de undersøgte bjælker undervurderer forskydningsbærelsen noget ved små bøjlearmeringsgrader, formentlig fordi de relativt store flanger kan bidrage væsentligt til forskydningsoptagelsen. Endvidere konstateres det, at de anvendte z-bøjler fungerer fuldt tilfredsstillende som forskydningsarmering, også selv om der ikke tages særlige forholdsregler til sikring af bøjlernes forankring.

ABSTRACT

The report describes shear tests with six prestressed concrete I-beams. From the tests it is concluded that the web crushing criterion for the beams examined is somewhat underestimating the shear capacity at the lower degrees of shear reinforcement, probably because of the contribution to the shear resistance from the relatively large flanges. Furthermore it is demonstrated that the z-stirrups used work fully satisfactory, even if no particular measure is taken to ensure the anchorage of the stirrups.

SYMBOLLISTE

- b** : Kroppens bredde  
**f<sub>CC</sub>** : Betonens cylindertrykstyrke målt ved prøvning af en (15x30 cm) cylinder  
**f<sub>C</sub>** : Middelværdien af f<sub>CC</sub> taget over 3 forsøg  
**h** : Forskydningshøjden målt som afstanden mellem tyngdepunkterne af hovedarmeringen og trykflangen  
**A<sub>C</sub>** : Betonens alder i døgn ved prøvning  
**E** : Bøjlestålets elasticitetskoefficient i kp/cm<sup>2</sup>  
**E<sub>S</sub>** : Bøjlernes elasticitetsmodul i kp/%  
**P<sub>cr</sub>** : Belastningstrinet ved hvilket de første synlige forskydningsrevner opstår  
**P<sub>F</sub>** : Belastningstrinet ved hvilket de første synlige bøjningsrevner opstår  
**P<sub>S</sub>** : Bøjlernes flydekraft  
**P<sub>SU</sub>** : Bøjlernes brudkraft  
**P<sub>U</sub>** : Brudlasten  
**M<sub>S</sub>** : Moment i bøjningsfag ved forskydningsbrud  
**M<sub>U</sub>** : Brudmoment i henhold til DS 411  
**U** : Bøjleafstanden
- 
- v** : Betonens effektivitetskoefficient  
**τ** : Forskydningsspændingen defineret ved  

$$\tau = \frac{P_U}{bh}$$
**ρ** : Variationskoefficient  
**ψ** : Den mekaniske armeringsgrad udregnet på grundlag af kroppens areal  
**Σ** : Standardafvigelsen

NOTATIONS IN ENGLISH

- b** : Web width  
**f<sub>cc</sub>** : Compressive concrete cylinder strength measured by testing of a (15x30 cm) cylinder  
**f<sub>c</sub>** : Mean of f<sub>cc</sub> (3 tests)  
**h** : Effective shear depth taken as the distance between the centroids of the main reinforcement and the upper flange  
**A<sub>c</sub>** : Age of the concrete at the day of testing (days)  
**E<sub>s</sub>** : Elastic modulus of the stirrups (kp/%)  
**E** : Elastic modulus of the stirrup-steel (kp/cm<sup>2</sup>)  
**P<sub>cr</sub>** : The load step at which the first visible web crack appears  
**P<sub>E</sub>** : The load step at which the first visible flexural crack appears  
**P<sub>s</sub>** : The yield force of the stirrups  
**P<sub>SU</sub>** : The ultimate tensile force of the stirrups  
**P<sub>U</sub>** : The failure load of the beam  
**M<sub>s</sub>** : The moment in the bending span when shear failure is achieved  
**M<sub>U</sub>** : The ultimate bending moment of the cross-sections of the beams calculated by the Danish code for concrete structures DS 411.  
**U** : Spacing between stirrups
- 

- v** : Web effectiveness factor  
**τ** : Nominal shear stress of the beam defined as  $\tau = \frac{P_U}{bh}$   
**ψ** : Mechanical degree of shear reinforcement  
**ρ** : The coefficient of variation  
**Σ** : Standard deviation

INDHOLDSFORTEGNELSE

<u>1.</u>	Indledning	1
<u>2.</u>	Teoretisk baggrund og foreløbige beregninger	2
<u>3.</u>	Beskrivelse af prøvelegemer	
<u>3.1</u>	Prøvning af betoncylindre	3
<u>3.2</u>	Prøvning af bøjlearmering	4
<u>3.3</u>	Prøvning af spændstål til længdearmeringen	6
<u>3.4</u>	Opbygning af forsøgsbjælker	7
<u>4.</u>	Beskrivelse af forsøgsopstillingen og instrumenteringen	10
<u>5.</u>	Metoder til analyse af resultater	13
<u>6.</u>	Resultater af forsøg og resultater fra EDB-behandling af forsøgsdata	
<u>6.1</u>	Resultater af brudforsøg	14
<u>6.2</u>	Resultater fra EDB-behandling af forsøgsdata	16
<u>7.</u>	Konklusion	27
	Henvisninger	28



TABLE OF CONTENTS

<u>1.</u>	Introduction	1
<u>2.</u>	Theoretical background and provisional calculations	2
<u>3.</u>	Description of test specimens	
<u>3.1</u>	Testing of concrete cylinders	3
<u>3.2</u>	Testing of the shear reinforcement	4
<u>3.3</u>	Testing of the longitudinal reinforcement	6
<u>3.4</u>	Construction of beams for testing	7
<u>4.</u>	Description of the test-rig and placing of the instruments	10
<u>5.</u>	Methods for analysis of results	13
<u>6.</u>	Results of tests and results from computer treatment of results	
<u>6.1</u>	Results of failure tests	14
<u>6.2</u>	Computer treatment of results	16
<u>7.</u>	Conclusion	27
	References	28



## 1. Indledning

Siden foråret 1973 er der på Afdelingen for Bærende Konstruktioner ved Danmarks tekniske Højskole blevet arbejdet teoretisk og eksperimentelt med studiet af jernbetonbjælkers forskydningsstyrke. I den første tid var projektets eksperimentelle del koncentreret omkring slapt armerede bjælker, [75.1] og [76.1]. Senere er spændbetonbjælker blevet inddraget i forsøgsarbejdet, se f.eks. [77.1], hvor en række forskydningsforsøg med spændbetonbjælker uden forskydningsarmering er refereret.

I nærværende rapport præsenteres forsøgsresultaterne fra forskydningsforsøg med seks forskydningsarmerede spændbetonbjælker udført i foråret 1978. Hovedformålet med forsøgene var at undersøge om de sædvanlige plasticitetsteoretiske bæreevneudtryk, [75.1], leder til en rimelig bestemmelse af den betragtede bjælketypes forskydningsbæreevne. Endvidere ønskedes det efterprøvet, om den anvendte bøjletype, Z-bøjlen, kan udnyttes fuldt ud, også selv om der som standard fra fabrikanten ikke tages særlige forholdsregler til at sikre bøjlernes forankring.

## 2. Teoretisk baggrund og foreløbige beregninger

Forskydningsbæreevne forventes på forhånd at kunne beregnes af det sædvanlige udtryk, se [75.1] p. 88

$$\frac{\tau}{F_c} = \begin{cases} \sqrt{\psi(v-\psi)} & ; \quad \psi \leq \frac{v}{2} \\ \frac{v}{2} & ; \quad \psi > \frac{v}{2} \end{cases} \quad (2.1)$$

Bjælkerne er alle af typen IB 30/60 i henhold til [75.2]. På forhånd antages det, at kun kroppen er effektiv ved optagelse af forskydningskraften.

Da bjælkerne alle har stort set samme længdearmering, regnes der ikke med nogen effekt af denne armering.

Ud fra forsøgopstillingen og tværsnitsudformningen (se fig. 4.1, fig. 3.4.1, fig. 3.4.2, fig. 3.4.4 og tabel 3.4.1) kan man bestemme de forventede værdier af snitlaste og momenter ved brud, angivet i tabel 2.1.

Brudmomentet ved bjælkemidten er beregnet i henhold til DS 411, og forskydningsbrudlasten er beregnet ved anvendelse af (2.1). Betonens karakteristiske cylindertrykstyrke og hovedarmeringens karakteristiske flydekraft er af fabrikanten opgivet til h.h.v. 500 kp/cm<sup>2</sup> og 14 Mp pr. line.

BJÆLKE	$\psi$ (nominel)	$P_U$		$M_S$		$M_U$
		$v=0.5$	$v=0.6$	$v=0.5$	$v=0.6$	
		Mp	Mp	Mpm	Mpm	Mpm
IB1	0.049	30	33	36	39	69.4
IB2	0.087	38	42	45	51	69.4
IB3	0.147	46	52	55	62	69.4
IB4	0.293	50	60	60	72	69.4
IBZ1	0.049	30	33	36	39	69.4
IBZ2	0.087	38	42	45	51	69.4

Tabel 2.1. Foreløbige værdier af brudlaste.

Expected values of failure loads.

### 3. Beskrivelse af prøvelegemer

#### 3.1 Prøvning af betoncylindre

Ved udstøbningen af hver bjælke blev der udstøbt 3 betoncylindre (15x30 cm). Ved hjælp af disse målttes betontrykstyrken samme dag som bjælkeforsøget. Prøvningen af cylindrene skete i overensstemmelse med DS 411. Belastningen påførtes med en hastighed på ca. 195 kp/sec. Resultaterne er angivet i tabel 3.1.1.

BJÆLKE	$f_{cc}$	$f_c$	$\Sigma$	$\rho$	$A_c$
	kp/cm <sup>2</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	kp/cm <sup>2</sup>	%	døgn
IB1	543.2 535.9 527.3	535.5	7.98	1.5	83
IB2	565.1 561.1 560.5	562.2	2.51	0.5	63
IB3	504.7 516.6 541.9	521.1	18.99	3.6	56
IB4	494.7 489.4 510.0	498.0	10.46	2.1	48
IBZ-1	516.0 524.0 516.6	518.9	4.42	0.9	113
IBZ-2	486.1 493.4 475.5	485.0	9.02	1.9	99

Tabel 3.1.1. Resultater fra betonprøvning.

Results from testing of the concrete.

Til tabel 3.1.1 skal det bemærkes, at der synes at være en tendens til at styrken stiger med betonens alder. Dog falder IBZ-2 uden for denne tendens. Dette kan skyldes mangelfuld komprimering ved udstøbningen af prøvecylindrerne til IBZ-2.

### 3.2 Prøvning af bøjlearmering

Af materialet til Z-bøjlerne udtages der en prøve på 0.50 m fra hver af de anvendte armeringsstænger. Denne prøve belastes til brud i en trækprøvemaskine. Belastningshastigheden var 5 kp/s for T6, 10 kp/s for T8 og 15 kp/s for T10.

Samtidigt med forsøget optegnes automatisk en arbejdskurve for det pågældende prøvelegeme.

I tabel 3.2.1. er angivet resultaterne fra samtlige forsøg med bøjlearmeringen.

#### a) T6

PRØVE	PLACERING	P <sub>S</sub>	P <sub>SU</sub>	E <sub>S</sub>	E
		kp	kp	kp/%	kp/cm <sup>2</sup>
1	IB1, ø	2000	2170	641	2.27 · 10 <sup>6</sup>
2	IB1, ø	1900	2100	641	2.27 · 10 <sup>6</sup>
3	IB1, v	1950	2100	667	2.36 · 10 <sup>6</sup>
4	IB1, v	2060	2230	641	2.27 · 10 <sup>6</sup>
22	IBZ1, ø	2030	2235	645	2.28 · 10 <sup>6</sup>
23	IBZ1, ø	2030	2235	637	2.25 · 10 <sup>6</sup>
24	IBZ1, v	2030	2222	667	2.36 · 10 <sup>6</sup>
25	IBZ1, v	2030	2080	653	2.31 · 10 <sup>6</sup>

#### b) T8

PRØVE	PLACERING	P <sub>S</sub>	P <sub>SU</sub>	E <sub>S</sub>	E
		kp	kp	kp/%	kp/cm <sup>2</sup>
6	IB2, ø og v	2980	3340	1081	2.15 · 10 <sup>6</sup>
7	IB2, ø og v	2900	3250	1081	2.15 · 10 <sup>6</sup>
8	IB2, ø og v	2910	3240	1081	2.15 · 10 <sup>6</sup>
27	IBZ2, ø og v	2850	3210	1081	2.15 · 10 <sup>6</sup>
28	IBZ2, ø og v	2950	3290	1111	2.21 · 10 <sup>6</sup>
29	IBZ2, ø og v	2850	3250	1142	2.27 · 10 <sup>6</sup>

c) T10

PRØVE	PLACERING	$P_S$	$P_{SU}$	$E_S$	E
		kp	kp	kp/%	kp/cm <sup>2</sup>
10	IB3, $\emptyset$ og v	4670	5290	1709	$2.17 \cdot 10^6$
11	IB3, $\emptyset$ og v	4800	5380	1667	$2.12 \cdot 10^6$
12	IB3, $\emptyset$ og v	4800	5350	1714	$2.18 \cdot 10^6$
14	IB4, $\emptyset$	4770	5320	1714	$2.18 \cdot 10^6$
15	IB4, $\emptyset$	4710	5240	1709	$2.17 \cdot 10^6$
16	IB4, $\emptyset$	4790	5470	1714	$2.18 \cdot 10^6$
17	IB4, v	4680	5240	1714	$2.18 \cdot 10^6$
18	IB4, v	4640	5265	1718	$2.18 \cdot 10^6$
19	IB4, v	4780	5290	1640	$2.09 \cdot 10^6$

Tabel 3.2.1. Resultater fra forsøg med armeringsstål til bøjler.  
Results from testing of the stirrup's steel.

I fig. 3.2.1 er angivet resultater af prøvningen af prøve 15. På samme figur er desuden angivet, hvorledes man definerer flydekraften som den kraft, ved hvilken der optræder 2% blivende forlængelse. Den stiplede linie angiver den idealiserede arbejdskurve, der anvendes ved beregningerne i det i afsnit 5 beskrevne EDB-program.

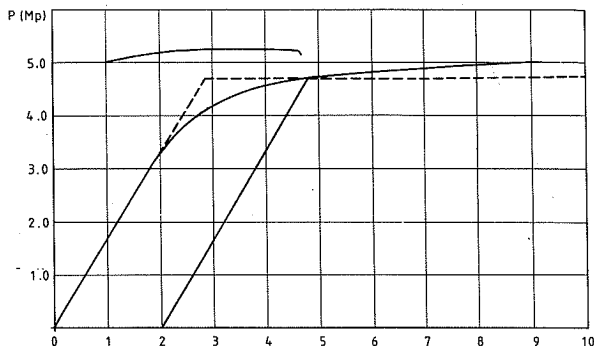


Fig. 3.2.1. Arbejdskurve for prøve 15.  
Load-strain relation for specimen number 15.

### 3.3 Prøvning af spændstål til længdearmeringen

Som kontrol af fabrikantens oplysninger vedrørende længdearmeringens styrke udførtes et enkelt trækforsøg med en prøve af denne. Flydekraften målt til 16.8 Mp og brudkraften til 17.9 Mp. Arbejdskurven er vist i fig. 3.3.1.

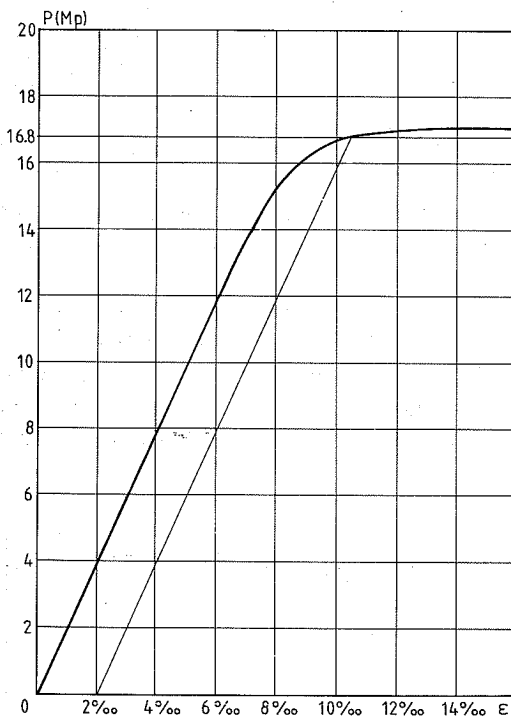


Fig. 3.3.1. Arbejdskurve for spændstål.

Load-strain relation for the longitudinal reinforcement.



### 3.4 Opbygning af forsøgsbjælker

Samtlige bjælker er af typen IB 30/60 i henhold til [75.2]. Længden af alle bjælker er 5500 mm.

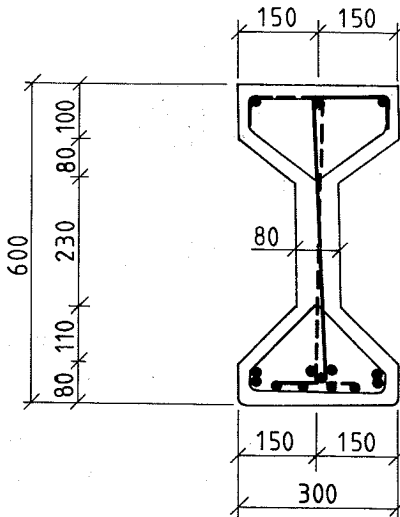


Fig. 3.4.1. Tværsnit IB1, IB2, IB3, IB4 (alle mål i mm).  
Cross-section, beam IB1, IB2, IB3, IB4 (mm).

Fig. 3.4.1 viser det ved IB1, IB2, IB3 og IB4 anvendte tværsnit. Z-bøjlerne er fastgjort til 2 langsgående T14 armeringsstænger. Længdearmeringen i undersiden består af 10 stk.  $\frac{1}{2}$ "-linjer, hver med en effektiv forspændingskraft på 100 kN. Oversidearmeringen består af 2  $\frac{1}{2}$ "-linjer, hver med en effektiv forspændingskraft på 64.5 kN. Z-bøjlerne vendes således, at de skiftevis vender til den ene og til den anden side.

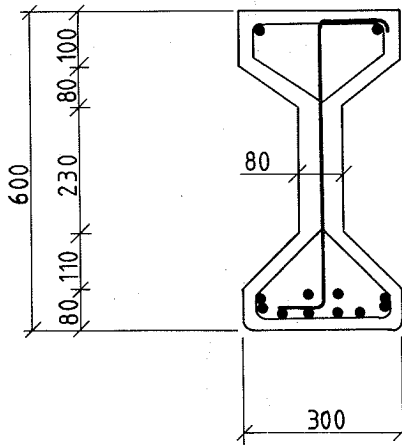


Fig. 3.4.2. Tværsnit ved IBZ1 og IBZ2 (alle mål i mm).  
Cross-section, beam IBZ1 and IBZ2 (mm).

Fig. 3.4.2 viser tværsnittet for IBZ1 og IBZ2. Længdearmeringen er opbygget som beskrevet i forbindelse med fig. 3.4.1, dog er Z-bøjlerne i dette tilfælde ikke fastgjort til langsgående armeringsjern som i de øvrige bjælker.

I længderetningen er bøjlearmeringen inddelt i to grupper, en fast gruppe i forankrings- og bøjningszoner, der er fælles for samtlige bjælker og en gruppe i forskydningszonerne, der varierer fra bjælke til bjælke. De 2 grupper er vist i fig. 3.4.3 og fig. 3.4.4 samt tabel 3.4.1.

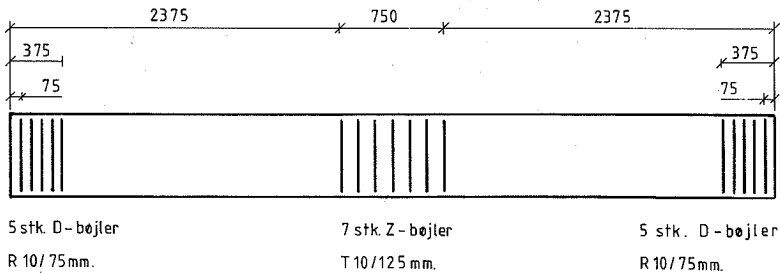


Fig. 3.4.3. Fast bøjlearrangement.  
Arrangement of stirrups common to all beams.

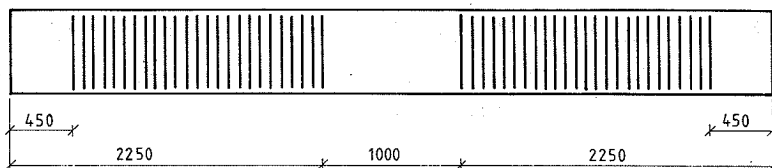


Fig. 3.4.4. Variabelt bøjlearrangement.  
Variable arrangement of stirrups.

BJÆLKE	ARM.TYPE	ANTAL	U (mm)
IB1	T6	50	75.0
IB2	T8	50	75.0
IB3	T10	50	75.0
IB4	T10	98	37.5
IBZ1	T6	50	75.0
IBZ2	T8	50	75.0

Tabel 3.4.1. Fordeling og type af variable bøjlearmering.  
Type and distribution of variable arrangement  
of stirrups.

Til tabel 3.4.1 skal det bemærkes, at hvis bøjlearmeringen er taget fra f.eks. 3 forskellige armeringsstænger, vil den være fordelt således, at hver 3. bøjle stammer fra én og samme stang. Ved de nedenfor beskrevne EDB-programmer skal man da anvende middelværdien af styrken af de 3 stænger.

De i fig. 3.4.3 angivne D-bøjler er simple tosnitsbøjler, der er lukket med en stuksvejsning i toppen.

Da bjælken i opstillingsfasen blev vendt på hovedet, dvs. at hovedarmeringen placeredes således, at forspændingen og egenvægten virker sammen, er det nødvendigt at undersøge, om bjælken kan holde til at blive vendt.

Brudmomentet for bjælken vendt på hovedet findes til at være 13.4 Mpm, medens egenvægtens moment er 1.0 Mpm. Bæreevnen er altså tilstrækkelig, hvis bjælken vendes på hovedet.

#### 4. Beskrivelse af forsøgsopstillingen og instrumentering

I det følgende vil forsøgsopstilling og instrumentering blive beskrevet skematisk ved hjælp af en række tegninger.

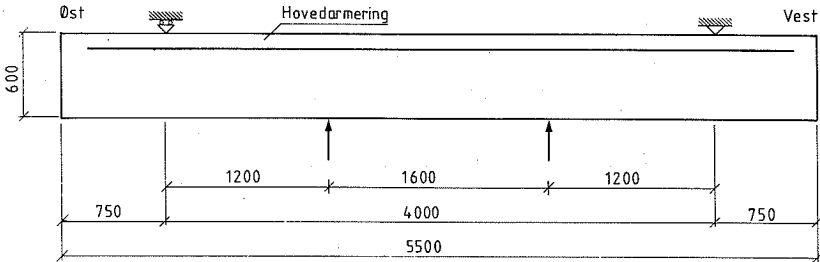


Fig. 4.1. Belastningsarrangement (skematisk).

Arrangement of loads and supports (schematic).

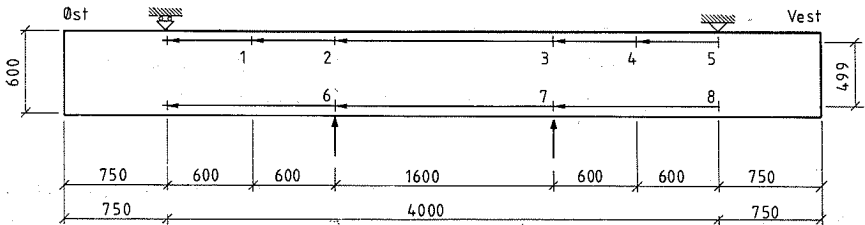


Fig. 4.2. Arrangement af spærmål.

Arrangement of dials.

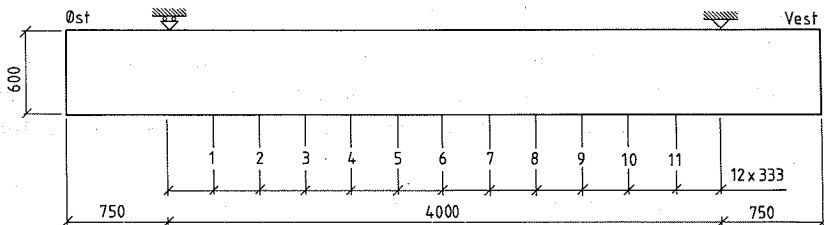


Fig. 4.3. Arrangement af nedbøjningsmålere.

Arrangement of deflexion readers.

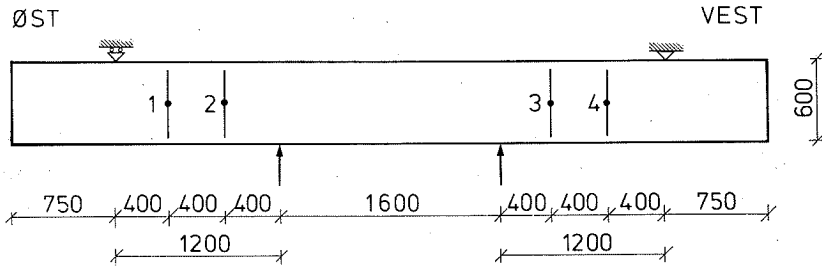


Fig. 4.4. Arrangement af strain gages på bøjler i forskydningsfagene.

Arrangement of gauges on stirrups in shear spans.

Enkeltkræfterne i fig. 4.1 blev leveret af 2 paralleltkoblede 100 MP olietrykpresser. Lastpladerne var lavet af stål og havde dimensionerne 10x30x6.6 cm. Reaktionspladerne var lavet af stål og havde dimensionerne 15x30x4 cm.

Den mindste afstand mellem kanterne af reaktions- og lastplade var 1075 mm, medens afstanden mellem centrene af de 2 plader var 1200 mm.

De 2 understøtninger var opbygget som beskrevet i [76.1] side 51.

Belastningen blev registreret dels manuelt ved aflæsning af et fjedermanometer og dels automatisk ved hjælp af en datalogger. Sidstnævnte foretog følgende aflæsninger i hvert scan:

- 1) Tiden ved scannets begyndelse
- 2) Brospændingen over Wheatstone broen (kanal 1)
- 3) Belastningen ved scannets begyndelse (kanal 2)
- 4) 8 tøjningsmålinger på de i fig. 4.4 angivne bøjler (kanal 3-10)
- 5) 11 flytningsmålinger, se fig. 4.3 (kanal 11-21)
- 6) Belastningen ved scannets afslutning (kanal 22)

Der blev foretaget mindst 2 scan pr. belastningstrin. For hvert belastningstrin blev der desuden foretaget en aflæsning af forlængelserne af spærmålene på nord- og sydsiden af bjælken. Ved division af forlængelserne med de respektive spærmåls længder findes træk- og tryktøjningerne. Spærmåls længderne var ikke, som det måske kunne fremgå af fig. 4.2, de samme for alle bjælker, men varierede med  $\pm 10$  mm.

De 4 gage-bøjler, der er angivet i fig. 4.4, var hver påsat 2 strain-gages, én på hver sin side af bøjlen. Ved at sammenligne de 2 tøj-

ningsmålinger kan man få mulighed for at vurdere bøjningseffekterne i bøjlerne.

Nedbøjningsmålerne, der vist på fig. 4.3, er placeret i 1/12-delspunkterne mellem de 2 understøtninger, altså med en indbyrdes afstand på 333 mm.

## 5. Metoder til analyse af resultater

### 5.1 Beskrivelse af EDB-programmet PLOT

EDB-programmet PLOT er nærmere beskrevet i [76.1], dog skal det anføres, at der er foretaget en hel del ændringer af versionen, der anvendtes i [76.1]. Dette skyldtes, at forsøgsopstillingen i dette tilfælde er en smule forskellig fra forsøgsopstillingen i [76.1].

Programmet foretager følgende analyser:

- 1) Udregning af betonens cylindertrykstyrke og standardafvigelsen på denne.
- 2) Analyse af resultaterne fra hvert scan samt udskrivning af disse.
- 3) Omsætning af nedbøjningsmålerens målinger til cm og udskrift af nedbøjningerne.
- 4) Indlæsning og udskrift af spørgmålsaflysningerne. Udregning af træk- og tryktøjninger i forskydnings- og bøjningsfagene, krumninger i bøjningsfaget og rotationsradier i forskydningsfaget.
- 5) Omsætning af målingerne fra de 8 strain gages på bøjlerne til tøjninger målt i %.
- 6) Udregning af bøjlekræfter.

Ved anvendelse af de plotterrutiner, der er tilgængelige ved NEUCC er følgende afbildninger foretaget:

- 1) Afbildning af belastningshistorien for bjælken, dvs. belastningen som funktion af tiden.
- 2) Afbildning af udbøjningsfeltet for hvert belastningstrin.
- 3) Afbildning af træk- og tryktøjningerne i forskydningsfagene som funktion af belastningen.
- 4) Afbildning af krumninger i bøjningsfaget og rotationsradier for begge forskydningsfag som funktion af belastningen P.
- 5) Afbildning af træk- og tryktøjninger i bøjningsfaget som funktion af belastningen.
- 6) Afbildning af middeltøjninger i bøjlerne som funktion af belastningen.
- 7) Afbildning af bøjlekræfterne som funktion af belastningen.
- 8) Afbildning af forskellene i bøjletøjningerne som funktion af belastningen.

Eksempler på udskrifter og afbildninger er i denne rapport gengivet for bjælke IB3.

6. Resultater af forsøg og resultater fra EDB-behandling af forsøgsdata

6.1 Resultater fra brudforsøg

Ved prøvning af beton, armering og bjælker fandtes følgende resultater.

BJÆLKE	$f_c$	$P_S$	U	$P_U$	$\psi$	$\tau/f_c$	$P_{cr}$	$P_F$
	kp/cm <sup>2</sup>	kp	cm	Mp			Mp	Mp
IB1 Ø	536	1950	7.50	45.0	0.061	0.210	20.0	*
V		2010		43.0	0.063			
IB2 Ø	562	2930	7.50	-	0.087	-	24.0	34.0
V		2930		49.9	0.087			
IB3 Ø	521	4760	7.50	-	0.152	-	16.0	32.0
V		4760		50.0	0.152			
IB4 Ø	498	4760	3.75	54.0	0.307	0.271	28.0	40.0
V		4700		-	0.303			
IBZ-1 Ø	519	2030	7.50	49.0	0.065	0.236	24.0	40.0
V		1970		47.5	0.063			
IBZ-2 Ø	485	2880	7.50	51.5	0.099	0.265	20.0	36.0
V		2880		49.8	0.099			

Tabel 6.1.1. Almindelige styrkedata for samtlige bjælker (\* ingen aflæsning foretaget).

General strength properties for all beams (\* no reading taken).

I forbindelse med tabel 6.1.1 skal det fremhæves, at samtlige bjælker brød ved forskydningsbrud. Når der for IB2, IB3 og IB4 kun er angivet én brudkraft, skyldes dette, at bjælkerne var for ødelagte efter første brud, til at brud kunne fremkaldes i den anden ende.

I fig. 6.1.1 er indtegnet  $\tau/f_c$  som funktion af  $\psi$ . I samme figur er desuden indtegnet det sædvanlige bæreevneudtryk, se (2.1), for en forskydningsarmeret stringerbjælke, hvor der ses bort fra flangernes bidrag til forskydningsbæreevnen. (2.1) er i fig. 6.1.1 indtegnet for  $v = 0.54$ .



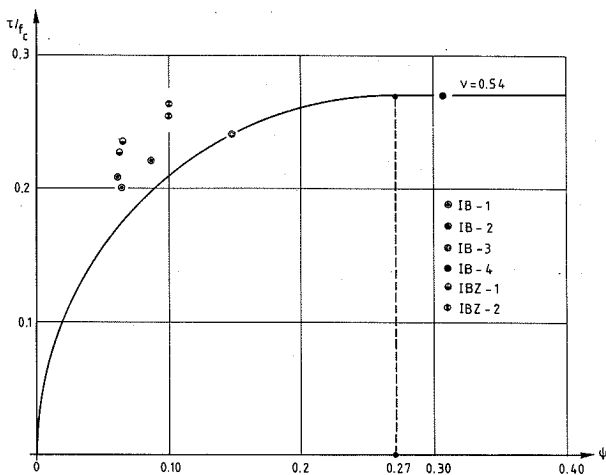


Fig. 6.1.1.  $\tau/f_c$  som funktion af  $\psi$ .  
 $\tau/f_c$  plotted versus  $\psi$ .

Af fig. 6.1.1 ses det, at resultaterne fra IB-3 og IB-4 passer udmærket med (2.1) og  $v = 0.54$ , medens samtlige øvrige resultater ikke udviser nogen videre god overensstemmelse. Dette kan skyldes, at flangerne i disse tilfælde yder et ikke forsvindende bidrag til forskydningsbæreevnen, dels på grund af deres stivhed og den forskydningsarmering, der findes i dem i form af montagearmering og dels på grund af den relative korte forskydningsspændvidde ( $a/h = 2.19$ ).

Det skal desuden fremhæves, at den registrerede cylindertrykstyrke for IB2 sandsynligvis er for lille på grund af den tidligere omtalte mangelfulde komprimering af prøvecylinderne. Dette kan være forklaringen på den noget mærkværdige placering af de 2 punkter fra denne bjælke, se fig. 6.1.1.

## 6.2 Resultater af EDB-behandling af forsøgsdata

I det følgende er vist resultaterne af EDB-behandlingen for bjælke IB3.

Fig. 6.2.1 viser belastningshistorien for bjælke IB3. Denne belastningshistorie var meget karakteristisk for samtlige, idet belastningen steg med 4 Mp på de første belastningstrin, som varede ca. 10 minutter. Dernæst blev stigningen i belastningen sat ned til det halve, medens belastningen nu blev opretholdt på hvert trin i ca. 15 minutter.

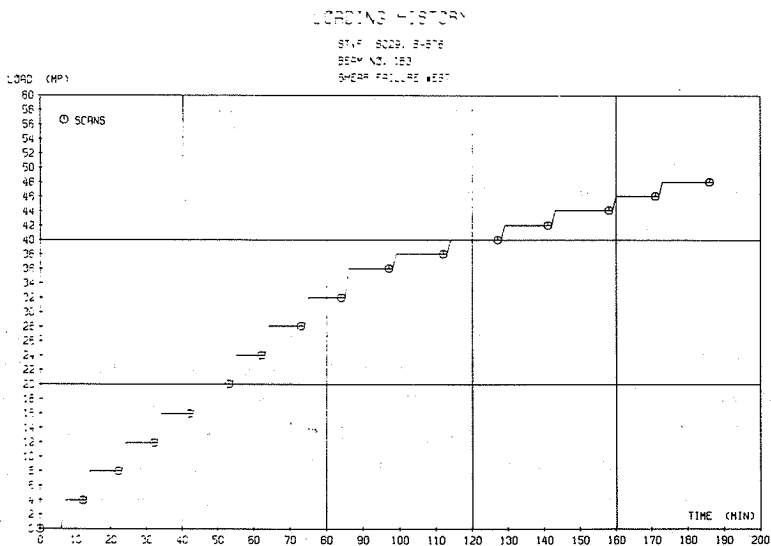


Fig. 6.2.1. Belastningshistorien for IB3.

Loading history for beam IB3.

Fig. 6.2.2 viser udbøjningernes forløb for IB3. Af denne figur ses det, at udbøjningerne vokser relativt hurtigt i de sidste belastningstrin umiddelbart før brud. Desuden skal det bemærkes, at krumningerne i forskydningsfagene skifter fortegn umiddelbart før brud.

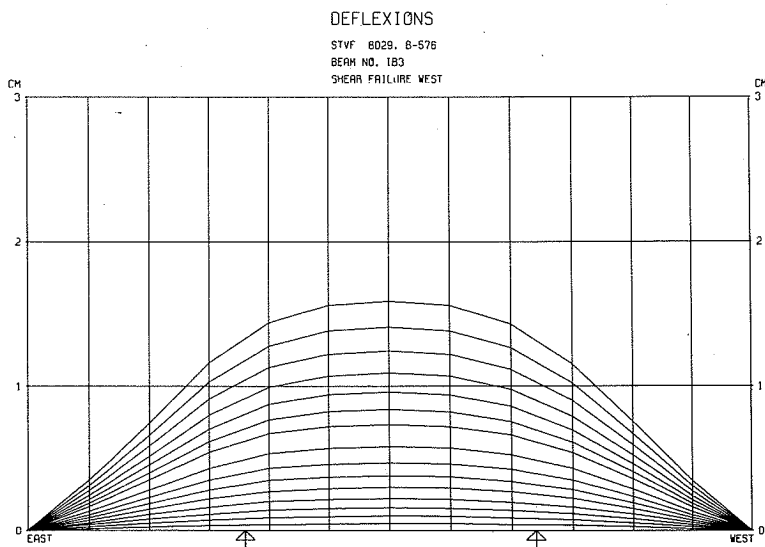


Fig. 6.2.2. Udbøjningsforløb for IB3.  
Deflexion pattern for beam IB3.

Fig. 6.2.3 viser træk- og tryktøjningerne i bøjnings- og forskydningsfagene. Det ses, at træktøjningerne i bøjningsfaget vokser ganske betydeligt efter dannelsen af de første bøjningsrevner. Desuden bemærkes det, at træktøjningerne er væsentligt større end tryktøjningerne, og at tryktøjningerne intetsteds har været så store, at der har været fare for knusning af betonen i trykzonen.

I fig. 6.2.3 er vist tøjninger både for nord- og sydsiden af bjælken. Det ses, at der er en vis forskel mellem disse tøjninger. Dette skyldes, at det ikke har været muligt at overføre belastninger og reaktioner helt uden ekscentriciteter i tværretningen, således at der er opstået små vridende momenter, der bevirker, at tøjningerne på de to sider ikke bliver helt ens.

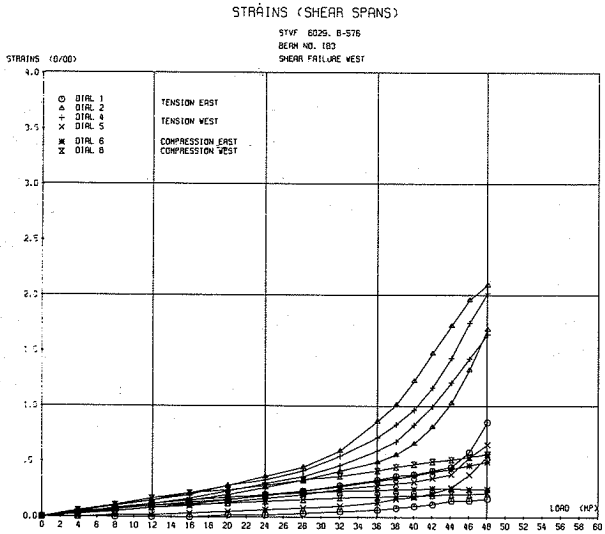
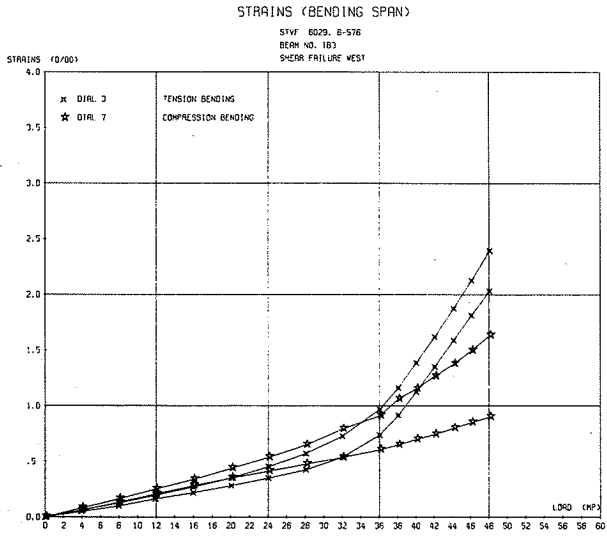


Fig. 6.2.3. Tøjninger i bøjnings- og forskydningsfag for IB3.  
Strains in the bending- and shear spans of beam IB3.

Fig. 6.2.4 viser krumninger og rotationsradier for IB3. Det bemærkes, at krumningerne vokser stort set lineært op til belastnings-trinet på ca. 36 Mp, hvorefter de vokser betydeligt hurtigere. Dette skyldes, at de første bøjningsrevner dannes ved belastningstri-net på 36 Mp. Rotationsradiernes størrelsesorden er konstant. Dette viser, at brudmekanismen ikke indeholder nogen rotation af bjælke-enderne, men er en ren forskydningsmekanisme. De i fig. 6.2.4 af-bildede radier hidrører alle fra de elastiske deformationer i de første belastningstrin. At forløbet af kurverne er en smule uregel-mæssigt, skyldes, at radierne er beregnet ved anvendelse af tal, der er behæftet med en stor relativ usikkerhed, se [75.1] side 73.

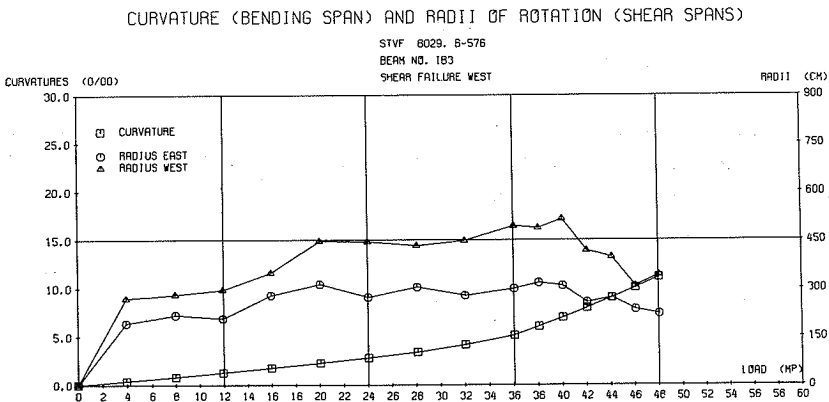


Fig. 6.2.4. Krumninger og rotationsradier for IB3.  
Curvatures and radii of rotation of beam IB3:

Fig. 6.2.5 viser tøjningerne i de fire gagebøjler. Det bemærkes, at bøjlerne kun er effektive efter dannelsen af de første forskydningsrevner. Det bemærkes desuden, at dannelsen af bøjningsrevnerne ikke har nogen indflydelse på tøjningerne i bøjlerne.

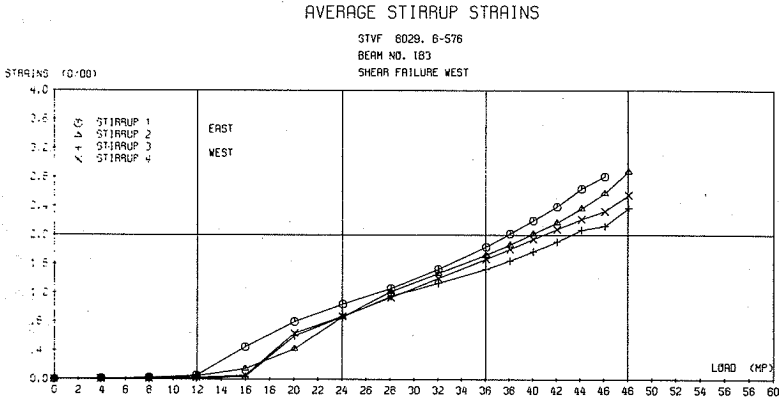


Fig. 6.2.5. Tøjninger i de 4 gagebøjler.  
Average stirrup strains.

Fig. 6.2.6 angiver forskellen mellem tøjningerne i de 4 gagebøjler. Det ses, at denne forskel er begrænset, hvorfor man kan se bort fra bøjningseffekter i bøjlerne.

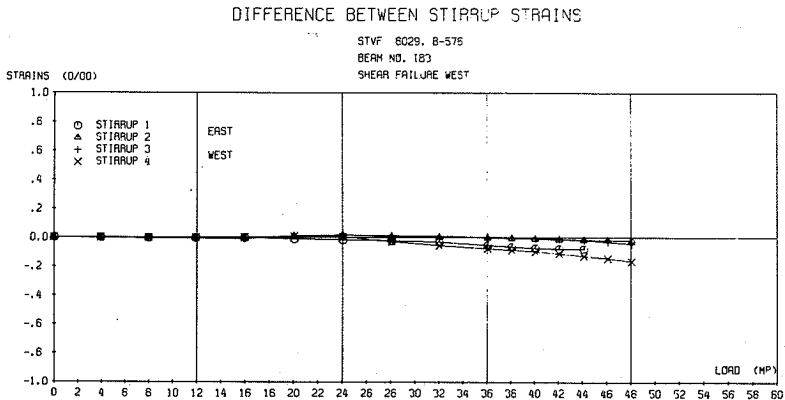


Fig. 6.2.6. Forskel mellem tøjningerne i de fire gagebøjler.  
Difference between stirrup strains.

Fig. 6.2.7 viser bøjlekræfternes variation med belastningen for IB3. Det ses, at der optræder flydning i bøjlerne, før brudlasten (50.0 Mp) nås. Dette kan tyde på, at betonrykhældningen er i stand til at ændre retning, dvs. blive mindre, efter flydning i bøjlerne er indtrådt.

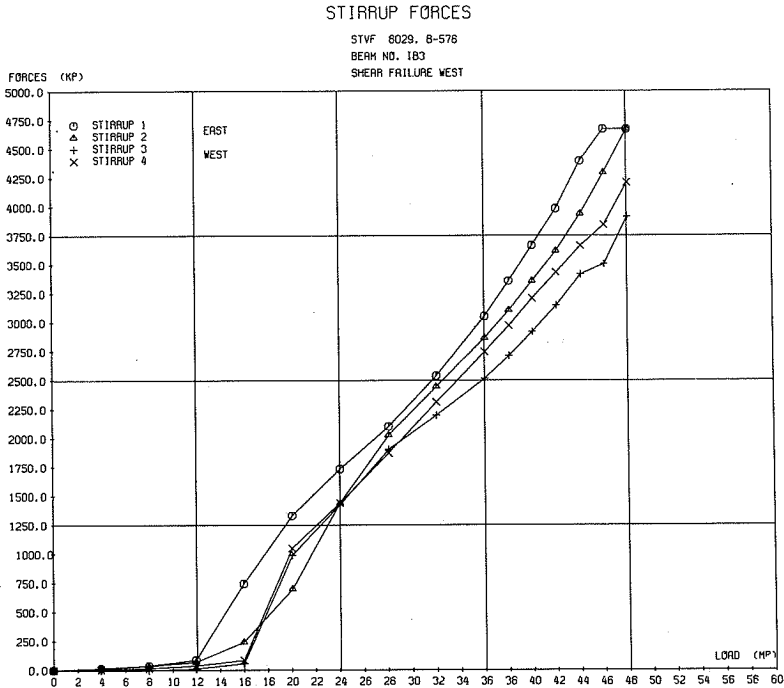


Fig. 6.2.7. Bøjlekræfter for IB3.  
Stirrup forces of beam IB3.

I fig. 6.2.8 og fig. 6.2.9 er angivet bøjlekræfternes variation for IB1 og IBZ1 samt IB2 og IBZ2. Af disse figurer ses det, at tendensen til, at flydning indtræder tidligere end det egentlige brud er tydeligere ved disse bjælker end ved IB3. Ved at sammenligne bjælkerne parvis ses det desuden, at bøjlerne virker stort set ens, dvs. at den simple Z-bøjle ved bjælkerne IBZ1 og IBZ2 er fuldt ud lige så effektivt forankret som bøjlen ved IB1, IB2, IB3 og IB4.

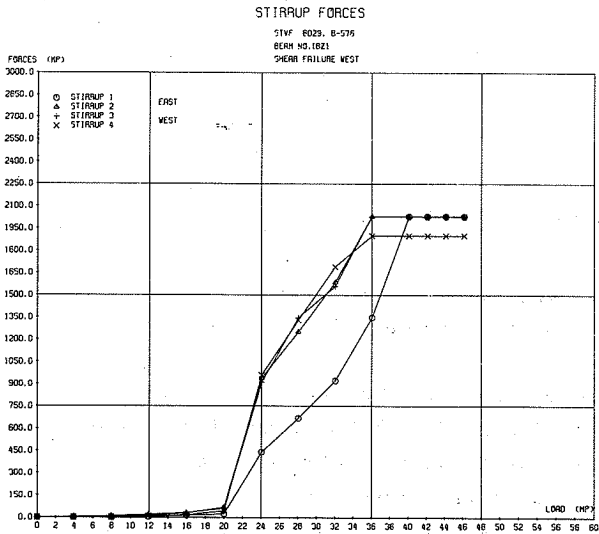
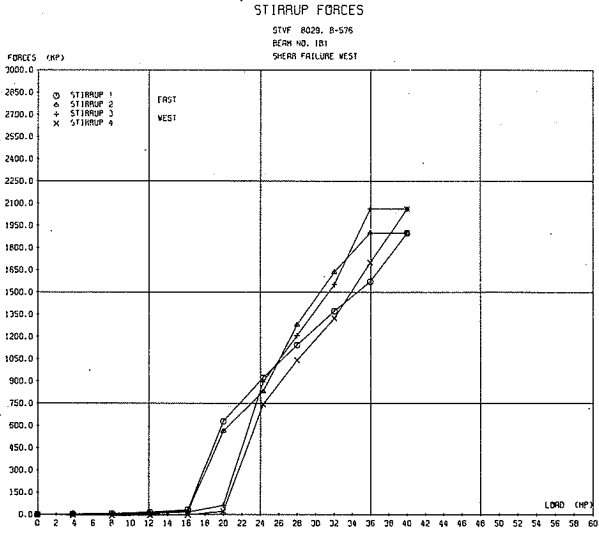


Fig. 6.2.8. Bøjlekræfter for IB1 og IBZ1.  
Stirrup forces of IB1 and IBZ1.



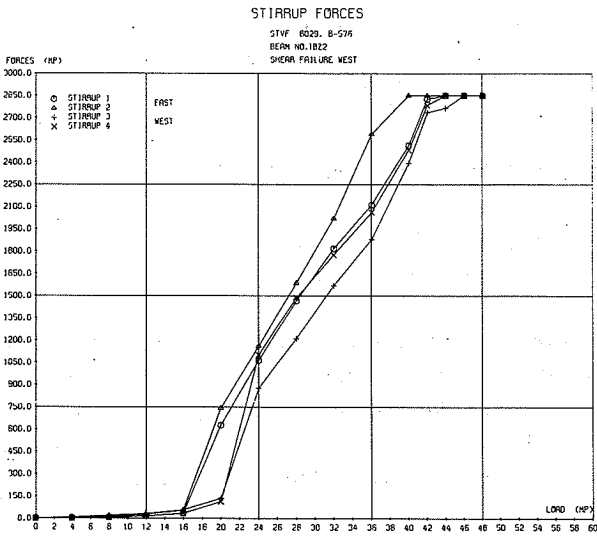
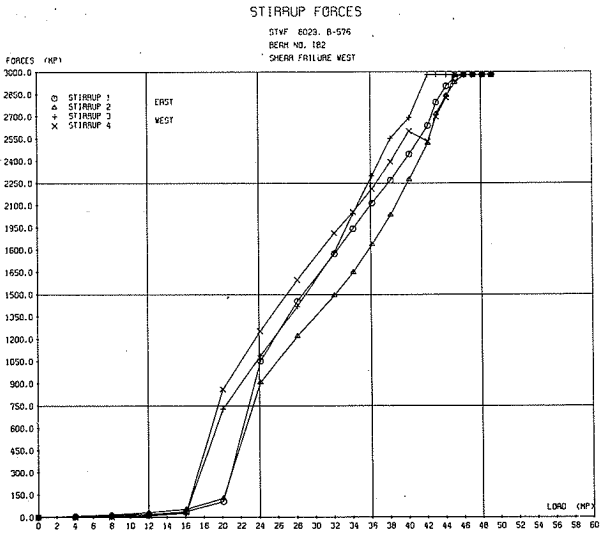


Fig. 6.2.9. Bøjlekræfter for IB2 og IB22.  
Stirrups forces of IB2 and IB22.

Fig. 6.2.10 viser bøjlekræfterne for IB4. Det ses tydeligt, at der ikke er indtrådt flydning i bøjlerne ved denne bjælke før brud. Dette stemmer også overens med fig. 6.1.1, hvor det er angivet, at IB4 er overarmeret.

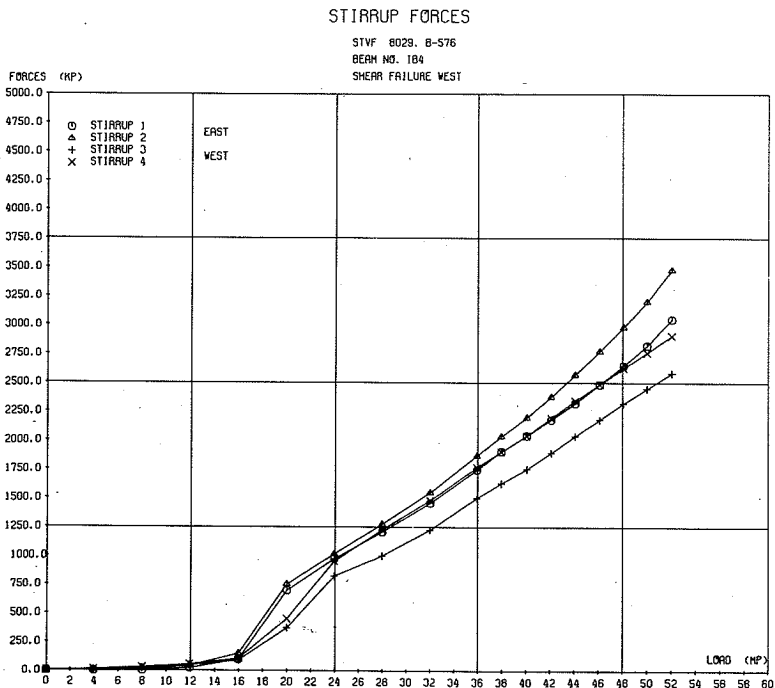


Fig. 6.2.10. Bøjlekræfter for IB4.  
Stirrup forces of IB4.

Fig. 6.2.11 viser fotografier af IB3 ved forskellige belastnings-trin.  $P = 20$  Mp svarer til dannelsen af 1. forskydningsrevne,  $P = 36$  Mp svarer til dannelsen af 1. bøjningsrevne, og  $P = 50$  Mp svarer til forskydningsbrud i vest. Af det sidste fotografi ses tydeligt, at der er tale om et betontrykbrud.

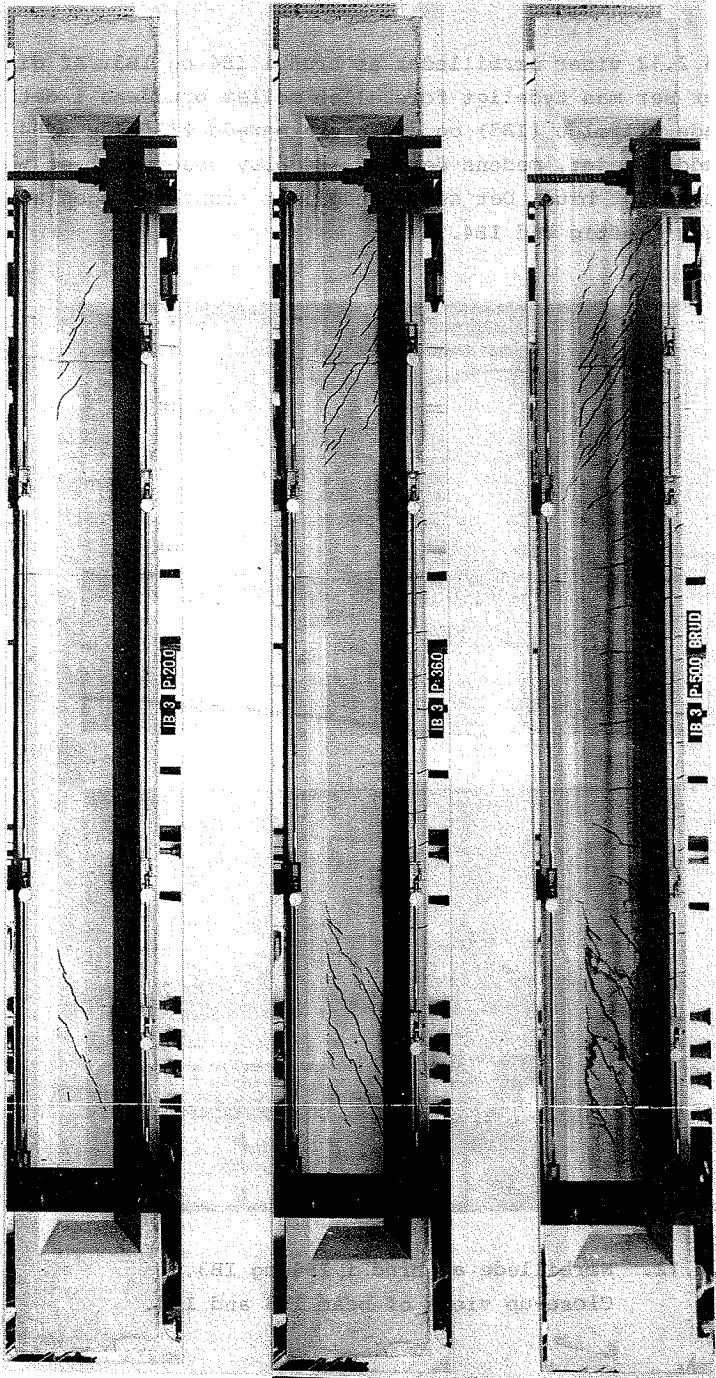


Fig. 6.2.11. Fotografier af IB3. / Views of the beam IB3.

Fig. 6.2.12 viser nærbilleder af brud i IB4 og IB3. Af disse fotografier ser man tydeligt forskellen mellem bruddene i det normalt-armede tilfælde (IB3) og det overarmede tilfælde (IB4). Ved IB3 er bruddet sejt, medens der ved IB4 blev observeret et voldsomt og pludseligt brud. Det ses desuden, at afsprængningen af betonen er meget kraftig ved IB4.

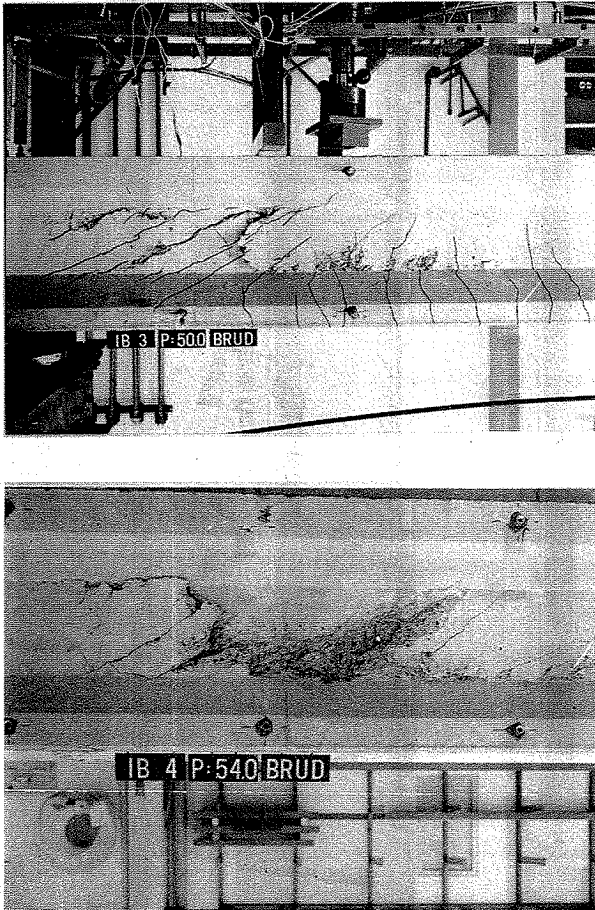


Fig. 6.2.12. Nærbillede af brud i IB4 og IB3.  
Close-up views of beam IB3 and IB4.

## 7. Konklusion

Ved sammenligning af forskydningsbæreevnerne observeret ved forsøgene med den teoretiske bæreevne bestemt ved trykbrudskriteriet ses det, at beregningsmodellen nok giver en rimelig, men ikke en fuldt ud dækkende bæreevnebestemmelse, idet der tydeligt er en tendens til undervurdering af bæreevnen ved de mindre forskydningsarmeringsgrader, når betonens effektive styrke fastlægges efter forholdene i det overarmerede område. Det må formodes, at uoverensstemmelsen mellem forsøg og teori skyldes en gunstig effekt fra forsøgsbjælkernes relativt kraftige flanger, som i den teoretiske model ikke regnes medvirkende til forskydningsoptagelsen.

Alt i alt leder bæreevneudtrykket dog til en acceptabel og forsvarlig bestemmelse af bjælkernes forskydningsbæreevne, når betonens effektive styrke i kroppen sættes til 54% af cylindertrykstyrken. I betragtning af de meget høje betonstyrker, og dermed lidet duktile betoner, der er tale om, er den fundne lave værdi af den effektive styrke ikke overraskende. Hvorvidt forspændingen har en indflydelse på den effektive styrke, redegør forsøgsserien ikke for.

I forsøgsbjælkerne anvendtes en særlig bøjletype, z-bøjlen, og forsøgene viser, at denne bøjletype fungerer fuldt tilfredsstillende som forskydningsarmering. Her er det særlig interessant, at det ikke på nogen måde synes at være nødvendigt at tage særlige forholdsregler til sikring af bøjlernes forankring, eftersom to prøvede standardbjælker ikke viste sig svagere end to tilsvarende bjælker med langsgående armeringsjern anbragt i bøjlernes krumning i top og bund. Desuden konstateredes flydning i bøjlerne i disse bjælker, inden brudlasten var nået.

Henvisninger/References

- [75.1] M.P. Nielsen and M.W. Bræstrup: "Plastic shear strength of reinforced concrete beams".  
Bygningsstatistiske Meddelelser, Vol. 46, Nr. 3, pp. 61-99, 1975.
- [75.2] A/S DANSK SPENDBETON: "Brochure no. B1" 1975 (på dansk/ in Danish).
- [76.1] M.W. Bræstrup, M.P. Nielsen, Finn Bach and B. Chr.Jensen: "Shear Test on reinforced Concrete T-beams, series T. Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Rapport no. R72.
- [77.1] M. Roikjær, M.P. Nielsen, M.W. Bræstrup and Finn Bach: "Forskydningsforsøg med spændbetonbjælker uden forskydningsarmering".  
Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, Intern rapport nr. I57.

AFDELINGEN FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE

Structural Research Laboratory

Technical University of Denmark, DK-2800 Lyngby

RAPPORTER (Reports)

(1975 - )

- R 61. NIELSEN, LEIF OTTO: Spændingshybride finite elementer til svingningsproblemer. 1975.
- R 62. EGERUP, ARNE RYDEN: Theoretical and experimental determination of the stiffness and ultimate load of timber trusses. 1975.
- R 63. LAURSEN, MARTIN: A curved beam equilibrium element applicable in standard finite element program systems. 1975.
- R 64. BACH, FINN: Metoder til måling af egenspændinger. 1975.
- R 65. BACH, FINN: En teoretisk og eksperimentel undersøgelse af den akustoelastiske metodes anvendelighed til egenspændingsmåling. 1975.
- R 66. PEDERSEN, FLEMMING BLIGAARD: Measurement of the complex modulus of viscoelastic materials. 1975.\*)
- R 67. PEDERSEN, FLEMMING BLIGAARD: Svingningsforsøg med viskoelastisk dæmpede sandwichbjælker. 1975.
- R 68. AGERSKOV, HENNING: Analysis of high strength bolted connections subject to prying. A simplified approach. 1975.
- R 69. PEDERSEN, MAX ELGAARD: En 2.ordens tilnærmelse til de konstitutive ligninger for beton. 1976.
- R 70. RIBERHOLT, HILMER and PETER CHR. NIELSEN: Timber under combined compression and bending stress. 1976.
- R 71. KRENCHER, HERBERT og J. BJØRNBAK-HANSEN: Undersøgelse af let konstruktionsbetons væsentligste materialemparametre. 1976.
- R 72. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN, FINN BACH and B.CHR. JENSEN: Shear tests on reinforced concrete T-beams. Series T. 1976.
- R 73. NIELSEN, M.P. and M.W. BRÆSTRUP: Plastic shear strength of reinforced concrete beams. 1976.
- R 74. Resume-oversigt 1975. Summaries of papers 1975. 1976.\*)
- R 75. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN, B.CHR. JENSEN and FINN BACH: Axisymmetric punching of plain and reinforced concrete. 1976.
- R 76. BRØNDUM-NIELSEN, TROELS: Partial prestressing. 1976.
- R 77. LAURSEN, M.E.: EQSHELL. An equilibrium shell finite element for arbitrary shell geometry. 1977.
- R 78. DYRBYE, CLÆS and FLEMMING BLIGAARD PEDERSEN: Rubber mountings and vibration isolation. 1977.
- R 79. BRÆSTRUP, M.W., M.P. NIELSEN and FINN BACH: Rational analysis and design of stirrups in reinforced concrete beams. 1977.

\*) Udsolgt. Out of print.

- R 80. ABK's informationsdag 1977. 1977.
- R 81. Resumeoversigt 1976. Summaries of papers 1976. 1977.
- R 82. MØLLMANN, H.: Static and dynamic analysis of plane cable structures. 1977.
- R 83. RIBERHOLT, H.: Bolte indlimet i limtræ. 1977.
- R 84. AGERSKOV, H. and J. BJØRNBAK-HANSEN: Fatigue strength of welded connections in round bar steel structures. 1977.
- R 85. LAURSEN, M.E., M.P. NIELSEN and M.ROIKJÆR: Stability analysis of beams and arches by energy methods. 1977.
- R 86. LAURSEN, M.E.: Derivation of symmetric integration formulas for triangles. 1977.
- R 87. LAURSEN, M.E.: Stability and vibration analysis of plane curved beams by an equilibrium finite element method. 1977.
- R 88. PEDERSEN, FLEMMING BLIGAARD: Vibration analysis of viscoelastically damped sandwich structures. 1978.
- R 89. BRØNDUM-NIELSEN, TROELS: Epoxy resin repair of cracked concrete beams. 1978.
- R 90. HESS, UWE, B. CHR. JENSEN, M.W. BRÆSTRUP, M.P. NIELSEN og FINN BACH: Gennemlokning af jernbetonplader. 1978.
- R 91. HANSEN, KARL ERIK, KAJ L. BRYDER og M.P. NIELSEN: Armeringsbestemmelse i jernbetonskaller. 1978.
- R 92. ASKEGAARD, V.: Stress and strain measurements in solid materials. 1978.
- R 93. SCHMIDT, HENRIK: Udbredelse af akustisk emission i beton. 1978.
- R 94. BYSKOV, ESBEN og STEEN KRENK: Konstruktionstræs mekaniske styrke. 1978.
- R 95. Resumeoversigt 1977. Summaries of papers 1977. 1978.
- R 96. DYRBYE, CLÆS: Admittance-curves. ZILSTORFF, ANNE and CLÆS DYRBYE: Admittance of bars. 1978.
- R 97. DYRBYE, CLÆS. Dynamic systems with sinusoidal mode shapes. 1978.
- R 98. ANDRESEN, CLAUS: Bjælker og søjler med åbne, tyndvægede tværsnit. 1978.
- R 99. RIBERHOLT, H.: Eingeleimte Gewindestangen. 1978.
- R100. PEDERSEN, C.: Opbøjet længdearmring som forskydningsarmering. 1978.
- R101. JENSEN, J.F., M.W. BRÆSTRUP, F. BACH og M.P. NIELSEN: Nogle plasticitetsteoretiske bjælkeløsninger. 1978.
- R102. JENSEN, J.F., C. PEDERSEN, M.W. BRÆSTRUP, F. BACH og M.P. NIELSEN: Rapport over forskydningsforsøg med 6 spændbetonbjælker. 1978.
- R103. JENSEN, J.F., V. JENSEN, H.H. CHRISTENSEN, F. BACH, M.W. BRÆSTRUP and M.P. NIELSEN: On the behaviour of cracked reinforced concrete beams in the elastic range. 1978.

Abonnement 1.7.1978 - 1.7.1979 inden for Danmark kr. 40.

Subscription rate 1.7.1978 - 1.7.1979 D.Kr. 60.-.