

AFDELINGEN FOR
BÆRENDE KONSTRUKTIONER

DANMARKS TEKNISKE HØJSKOLE



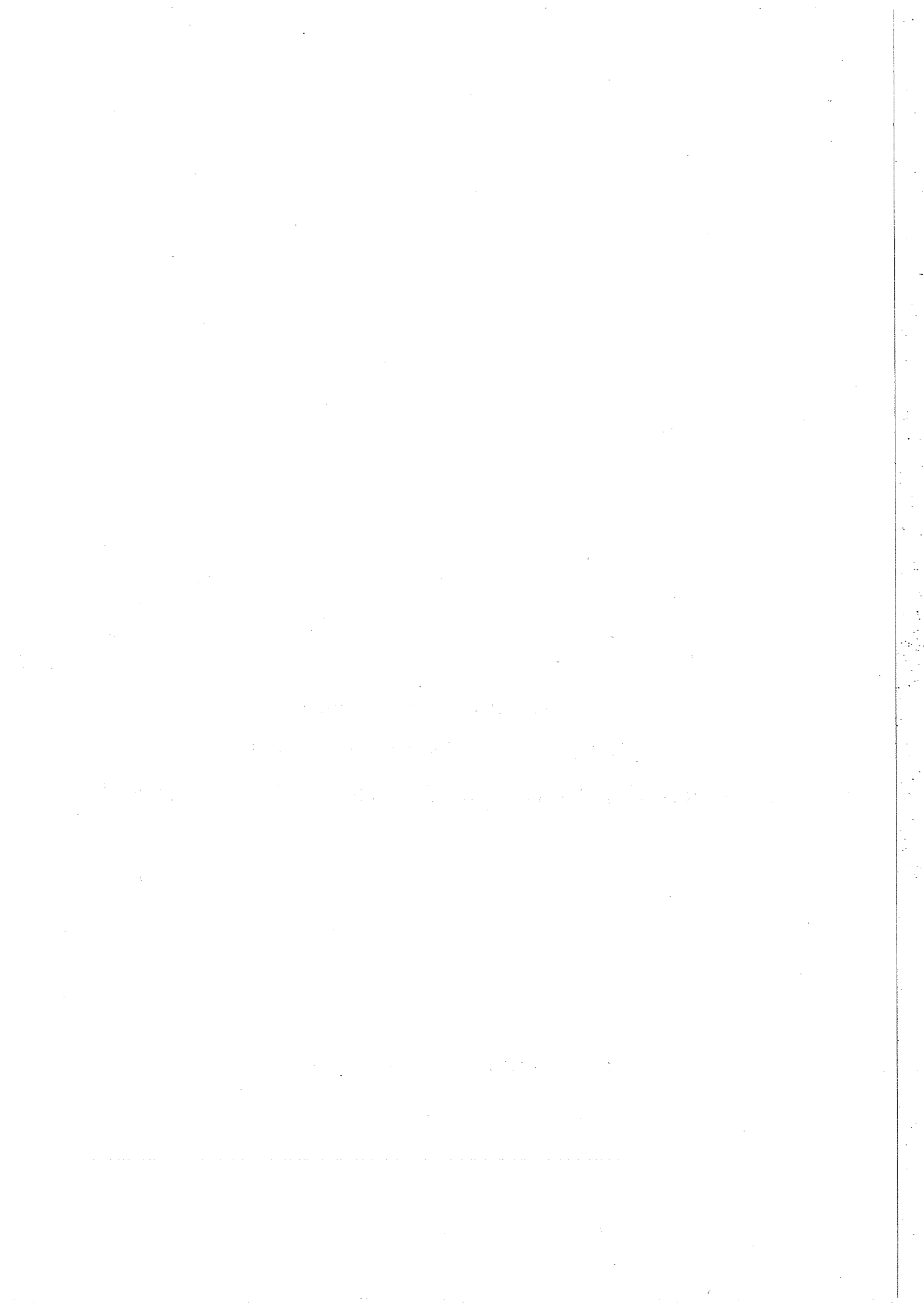
STRUCTURAL RESEARCH LABORATORY
TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK

Hans Christian Sørensen
FORSKYDNINGSFORSØG MED
12 JERNBETONBJÆLKER MED T-TVÆRSNIT

RAPPORT NR. R 20 1971

Hans Christian Sørensen
FORSKYDNINGSFORSØG MED
12 JERNBETONBJÆLKER MED T-TVÆRSNIT

RAPPORT NR. R 20 1971



Forord.

Denne forsøgsrapport er sammen med afhandlingen [70.1] udarbejdet som led i betingelserne for erhvervelse af den tekniske licentiatgrad.

Licentiatstudiets hovedemne er

"Giv en oversigt og vurdering af teori og forsøg angående forskydningsarmering af jernbetonbjælker, eventuelt suppleret med egne forsøg".

Studiet er udført hos professor dr.techn. K.W. Johansen ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner, Danmarks tekniske Højskole. Dr.techn. H. Krenchel har virket som vejleder.

I forbindelse med gennemførelsen af forsøgene har jeg herudover modtaget værdifuld bistand fra en lang række af afdelingens medarbejdere.

Jeg vil gerne takke Laboratoriet for Materiallære, der har givet mig mulighed for at indarbejde forsøgene i serie II til de bygningsingeniørstuderendes øvelser på 7. halvår. Jeg vil også takke de studerende for deres bistand ved gennemførelsen af forsøgene. Endelig vil jeg gerne rette en tak til DIAB for lån af datalogger udstyr i forbindelse med forsøgene i serie I.

København den 4. december 1970

Hans Chr. Sørensen.

Resumé.

I rapporten refereres resultaterne fra 12 forsøg med simpelt understøttede, punktbelastede T-bjælker, hvor forskydningsarmeringen i form af bøjler vinkelret på bjælkeaksen er varieret.

Ved 3 af bjælkerne (serie I) er der foretaget omfattende målinger med strain gages på længde- og forskydningsarmering og på betontrykflangen. Disse målinger viser bl.a., at hovedarmeringens krumning nær reaktionen er modsat rettet krumningen i bøjningsfaget, hvilket vidner om en betydelig dornvirkning. I flere af bøjlerne er tøjningerne inden brud større end 5 %, hvilket antyder, at det er muligt at udnytte bøjler med en flydespænding ($\sigma_{0,2}$) af størrelsen 6000 kp/cm² - f.eks. Tentorstål. Revnebillede og tøjningsmålinger langs betontrykflangen viser, at der opstår en buevirkning i forskydningsfaget.

En sammenligning af bjælkerens brudlast med den beregnede forskydningsbrudlast bestemt ved to typiske formler viser, at Hillerborgs formel giver god overensstemmelse, mens ACI's giver værdier ca. 60% under forskydningsbrudlasten.

Indholdsfortegnelse.

Forord	1
Resumé	2
Indholdsfortegnelse	3
Bogstavssymboler	5
1. Sammen drag af forsøg	7
1.1 Indledning	7
1.2 Forsøgsprogram	7
1.3 Resultater	9
1.3.1 Brudlast	9
1.3.2 Tøjningsmålinger langs betontrykflangen (serie I)	12
1.3.3 Tøjning og kraft i længdearm ering (serie I)	13
1.3.4 Tøjning i bøjler (serie I)	17
1.3.5 Nedbøjningsmålinger (serie I)	17
1.3.6 Målinger med spærmål	18
1.3.7 Revnedannelse og revnevidder	19
1.4 Konklusion	22
1.5 Litteratur	23
2. Forsøgsspecifikationer og forsøgsresultater	25
2.1 Bjælker	25
2.1.1 Fremstilling af bjælker	25
2.1.2 Beton	25
2.1.3 Hovedarm ering	28
2.1.4 Langsgående arm ering i trykzonen	30
2.1.5 Fordelingsarm ering i trykflangen	30
2.1.6 Forskydningsarm ering	30
2.2 Belastning	32
2.2.1 Belastningsanordning	32
2.2.2 Belastningshistorie	32
2.3 Forsøgsresultater	32
2.3.1 Strain gage målinger, generelt	32
2.3.2 Tøjninger langs betontrykflangen (serie I)	33
2.3.3 Tøjninger langs længdearm eringen (serie I)	34
2.3.4 Tøjninger i bøjler (serie I)	34
2.3.5 Nedbøjningsmålinger (serie I)	35

2.3.6	Målinger med spærmål	35
2.3.7	Revnedannelse og revnevidder	35
2.4	Tabel II - VIII. Fig. 2.9	35
Tabel IIa-c	Serie I. Tøjninger langs midten af trykflangens overside	36
Tabel IIIa-c	Serie I. Tøjninger i længdearmring	37-39
Tabel IVa-c	Serie I. Tøjninger i bøjler	40
Tabel Va-c	Serie I. Nedbøjning af træk- og trykside	41
Tabel VI	Serie I. Tøjningsmålinger med spærmål. Revnenumre.	42
Tabel VII	Serie II. Tøjningsmålinger med spærmål. Revnenumre.	43
Tabel VIII	Serie I. Maksimale revnevidder	44
Fig. 2.9	Revnebillede efter brud	45-48
Summary		49

Bogstavsymboler.

De anvendte bogstavsymboler er for størstedelens vedkommende i overensstemmelse med den af CEB [69.3] benyttede.

Følgende index er hyppigt anvendt

a	Længdearmering
b	Beton
f	Flydespænding ($\sim 0,2\%$ blivende forlængelse)
t	Forskydningsarmering
u	Brudlast
A(B)	Tilsvarende snitkraft henført til normalsnit A-A (B-B)
F	Forventet bøjningsbrudlast

Symbol

Betydning

A	Tværsnitsareal af armering
E	Elasticitetskoefficient
M	Bøjningsmoment
N_a	Træknormalkraft i længdearmering
T	Forskydningskraft
T_a, T_b	Forskydningskraft-andel optaget af henholdsvis længdearmering (dornvirkning) og af betontrykzone
\emptyset_t	Diameter af enkelt bøjleben
a	Forskydningsspændvidde
b	Trykflangebredde
b_o	Kropbredde
c	Længde af diagonalrevnens projektion på bjælkeaksen
h	Længdearmeringens nyttehøjde
n	Antal bøjler i forskydningsfaget
t	Afstand mellem bøjler målt parallelt med bjælkeaksen
v	Variationskoefficient
z	Momentarm
e	Tøjning positiv som træk, negativ som tryk
θ	Idealiseret diagonalrevnevinkel
\bar{w}_o	Længdearmeringsforholdet $\frac{A_a}{bh}$

ω_{ao} Længdearmeringsforholdet $\frac{A_a}{b_o h}$
 σ Spænding
 σ_{sp} Betonens spaltstyrke
 σ_c " cylinderstyrke

1. Sammendrag af forsøg

1.1 Indledning.

I årene 1963-65 er der ved Afdelingen for Bærende Konstruktioner blevet udført 16 forskydningsforsøg med T-bjælker, hvor den eneste variable var forskydningsarmeringen - Ozden [67.1].*

I halvdelen af disse bjælker bestod forskydningsarmeringen af relativt spredte bøjler vinkelret på bjælkeaksen. Disse forsøg viser, at blot en enkelt bøjle placeret, hvor diagonalrevnen dannes, vil medføre en væsentlig øgning af bjælkens brudlast i forhold til bjælker uden forskydningsarmering. Tilsvarende er fundet forsøg af bl.a. Kani [69.1]. I de øvrige forsøg bestod forskydningsarmeringen af ophøjet længdearmering (skråjern).

I denne rapport er der refereret resultaterne fra yderligere 12 forskydningsforsøg udført i 1969. Disse forsøg er tænkt som et supplement til Ozdens forsøg, idet forskydningsarmeringen består af relativt tætliggende bøjler. I de følgende afsnit 1.2 til 1.5 er der foretaget et kortfattet sammendrag af disse forsøg, mens der i afsnit 2 følger en nøjere gennemgang af forsøgsbetingelserne samt en række tabeller med forsøgsresultater.

1.2 Forsøgsprogram.

De undersøgte bjælker var alle T-bjælker, der var simpelt understøttede, og som blev belastet af to symmetriske enkeltkræfter vinkelret på bjælkeaksen ($\frac{M}{Th} = 3,5$), - se iøvrigt fig. 1.1 og afsnit 2.2. Længdearmeringen bestod af Dansk Kamstål med en nominal diameter på 20 mm, og en flydespænding σ_{af} på ca. 4300 kp/cm^2 - ialt 4 K 20 i 2 lag. (Armeringsforhold $\bar{w}_0 = 1,06\%$, $w_{a0} = 3,84\%$, se iøvrigt afsnit 2.1.3).

Betonens cylinderstyrke σ_c var tilstræbt ens lig 325 kp/cm^2 med et cement-vandtal på $C/V = 1,4$. Imidlertid var cementkvaliteten yderst varierende, hvorfor cylinderstyrken ved 3 af bjælkerne (serie I) blev som tilstræbt, men σ_c for de øv-

*Litteraturhenvisninger findes i afsnit 1.5.

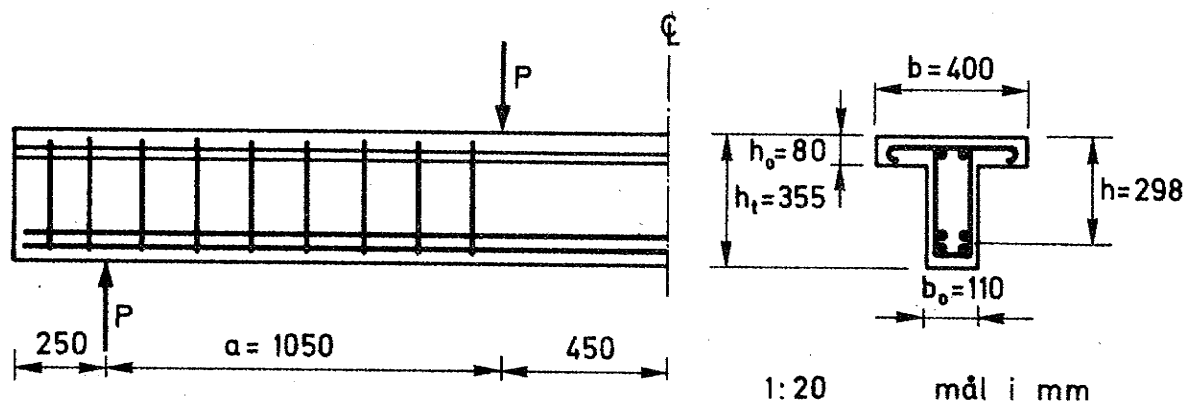


Fig. 1.1 Forsøgsbjælke.

riges bjælker (serie II) blev ca. 250 kp/cm^2 . σ_c for de forskellige bjælker fremgår af tabel I (afsnit 1.3.1), mens den benyttede recept og de opnåede arbejdskurvedata fremgår af afsnit 2.1.1 og 2.1.2.

Forskydningsarmeringen bestod af bøjler vinkelret på bjælkeaksen, armeringstypen var normal glat betonstål med en flydespænding σ_{tf} fra $2300 - 4500 \text{ kp/cm}^2$. Variationen af forskydningsarmeringen bestod dels i en ændring af bøjleafstanden t og dels af en ændring af bøjlernes nominelle diameter ϕ_t (og dermed også af flydespændingen σ_{tf}). I tabel I i afsnit 1.3.1 er der angivet værdierne af ϕ_t , t og $A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$, hvor A_t er det nominelle areal af to-snitbøjlen, og h er nyttehøjden. Størrelsen $A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$ angiver bøjlernes samlede flydekraft i diagonalrevneområdet, svarende til diagonalrevnevinklen $\theta = 45^\circ$.

I afsnit 2.1.6 er angivet arbejdskurver for armeringsstængerne, bøjlernes geometriske udformning og deres placering.

For bjælkerne T21 og T22 er der i tabel I angivet 2 værdier af $A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$ hvilket skyldes, at flydespændingen σ_{tf} for de anvendte bøjler kun vides at være beliggende mellem to værdier, der svarer til en undersøgelse af σ_{tf} før og efter forsøget. Se nærmere afsnit 2.1.6.

Efter de målinger, der blev foretaget ved forsøgene, er disse opdelt i to grupper: serie I og serie II.

Ved serie I blev der foretaget måling med strain gages af tøjningerne på hovedarmeringen, på trykflangens overside og

på bøjlerne - ialt 100-130 strain gages på hver bjælke. Herudover blev der foretaget udbøjningsmålinger af bjælkens over- og underside, ialt 13-17 punkter. Der blev foretaget måling af de samlede deformationer langs hovedarmeringen (5 strækninger) og langs trykflangen i bøjningsfaget. Endvidere blev der foretaget optegning og nummerering af revner, og de maksimale revnevidder blev målt.

Ved serie II, der bestod af 9 bjælker, blev der foretaget måling af de samlede deformationer langs hovedarmering og trykflange i bøjningsfaget. Endvidere blev der foretaget optegning og nummerering af revner.

Placeringen af målepunkter fremgår af fig. 2.3 og 2.4. i afsnit 2.

1.3 Resultater

1.3.1 Brudlast.

I tabel I er brudlast og brudtype for de forskellige bjælker angivet, herunder også den ende af bjælkerne, hvor bruddet indtrådte (angående orientering af bjælken henvises til fig. 2.7 i afsnit 2.2.1). Endvidere er angivet længden af diagonalrevnens vandrette projektion c (se fig. 1.5) i forhold til nyttehøjden h . Størrelsen af c fremgik af den revnede bjælke, idet der fra den største diagonalrevnes skæring med længdearmeringen udgik en tydelig bøjningstrækrevne til bjælkens underside omtrent vinkelret på bjælkeaksen. (Se også fig. 2.9).

På fig. 1.2 er brudlasten afbildet som funktion af $A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$ (lig bøjlernes bidrag til forskydningsoptagelsen ved diagonalrevnehældningen $\theta = 45^\circ$). På fig. 1.2 er endvidere afbildet resultaterne fra 8 af Ozdens forsøg [67.1]. Da der ved Ozdens forsøg i nogle tilfælde kun var anbragt 1 eller 2 bøjler i forskydningsfaget, og bøjleafstanden t dermed er udefineret, er t i disse tilfælde beregnet ved at fordele bøjlekraften over hele forskydningsfagets længde a , d.v.s.

$$A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t} = A_t \sigma_{tf} \frac{h}{a} n \quad (1.1)$$

hvor n er antallet af bøjler i forskydningsfaget ($n = 1$ eller 2).

Ved bjælkerne T21 og T22 fra serie 1 er der for $A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$ på fig. 1.2 anvendt middelværdien af de i tabel I angivne grænser.

Tabel I. Forskydningsarmering, betonstyrke, brudlast og brudtype.
Shear reinforcement, concrete strength, ultimate load and type of failure.

	Bjælke nr	ϕ_t mm	t mm	$A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}$ Mp	P_u 1) Mp	σ_c kp/cm ²	Brudtype 2)	$\frac{c}{h}$
Serie I	T21	R8	175	3.96- 4.67	13.2	331	DT -	2.2
	T22	R7	210	4.43- 4.95	13.0	317	DT/SC -	1.6
	T23	R6	150	3.98	14.2	349	DT +	2.5
Serie II	T1a	R6	87.5	5.09	13.5	234	F	
	T2a	R5	87.5	5.42	13.9	251	F	
	T3a	R6	105	4.24	13.0	251	AS -	1.9
	T4a	R5	105	4.52	13.5	257	AS -	1.9
	T1b	R6	117	3.80	12.0	236	AS-SC +	1.6
	T2b	R5	117	4.05	13.2	254	DT -	1.8
	T3b	R6	175	2.54	11.8	251	AS-DT -	2.3
	T4b	R5	175	2.71	10.9	252	DT +	2.0
	T5	R5	175	2.71	11.2	260	AS-DT -	2.0

1) Eksklusiv bjælkens vægt 0.15 Mp/m (exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m)

2) F Bøjningsbrud Flexure failure
 SC Forskydnings-trykbrud Shear compression failure
 DT Diagonalt-trækbrud Diagonal tension failure
 AS Buestabilitetsbrud Arch stability failure

+ eller - angiver i hvilken ende af bjælken brud indtrådte (fig. 2.7 afsnit 2.2.1)
 (+ or - mention in what end of the beam the failure took place (fig. 2.7 chapter 2.2.1))

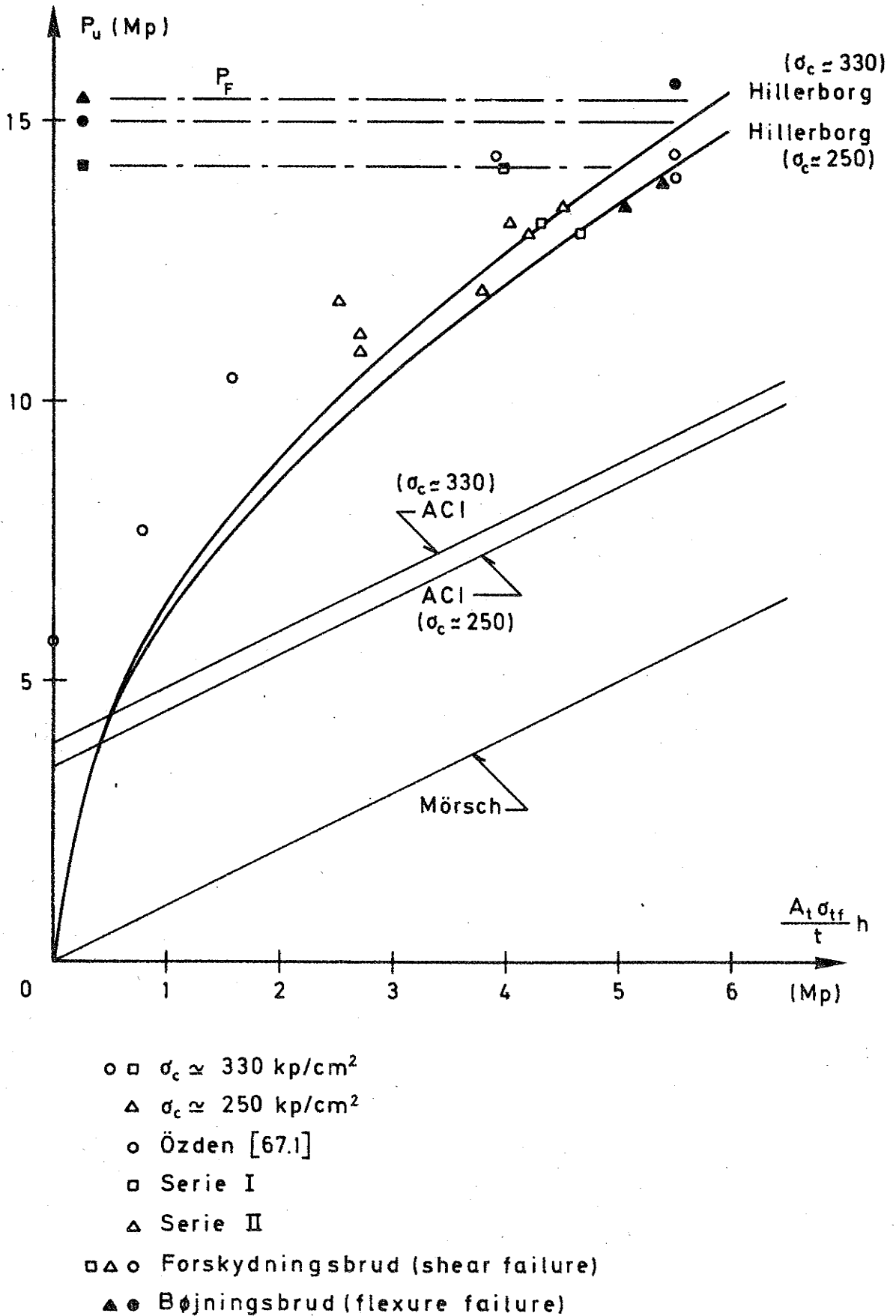


Fig. 1.2 Brudlasten som funktion af forskydningsarmeringens intensitet for bjælker i serie I og serie II og for nogle af Özden's bjælker [67.1].

På fig. 1.2 er der indtegnet den forventede bøjningsbrudlast P_F , beregnet af udtrykket

$$P_F = \frac{M_F}{a} = A_a \sigma_{af} \frac{z}{a} = \frac{h}{a} A_a \sigma_{af} \left(1 - 0,5 \frac{A_a \sigma_{af}}{bh \sigma_c}\right) \quad (1.2)$$

hvor z er momentarmen.

Endvidere er der indtegnet den forventede forskydningsbrudlast P_u beregnet efter Hillerborg, (se f.eks. Sørensen [70.1] eller Regan [68.1])

$$P_u = 9,5 (\sigma_c)^{\frac{1}{6}} (\bar{w}_{ao})^{\frac{1}{4}} \left(A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t}\right)^{\frac{1}{2}} (b_o h)^{\frac{1}{2}} \quad (1.3)$$

hvor der er anvendt enhedssystemet kp, cm, og P_u beregnet efter ACI [62.1] (Modificeret Gitteranalogi)

$$P_u = P_{cr} + A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t} \leq 2,65 \sqrt{\sigma_c} b_o h \quad (1.4)$$

hvor diagonalrevnelasten P_{cr} beregnes af

$$P_{cr} = \left(0,50 \sqrt{\sigma_c} + 176 \frac{\bar{w}_{ao}}{\frac{a}{h} - 1}\right) b_o h \leq 0,93 \sqrt{\sigma_c} b_o h \quad (1.5)$$

Enhedsystem kp, cm.

Endelig er også angivet den forventede forskydningsbrudlast P_u efter Mörsch (Gitteranalogien)

$$P_u = A_t \sigma_{tf} \frac{h}{t} \quad (1.6)$$

Det fremgår af fig. 1.2 at Hillerborgs formel giver en tilfredsstillende overensstemmelse med forsøgsresultaterne, mens de to øvrige formler giver værdier, der er betydelig på den sikre side.

1.3.2 Tøjningsmålinger langs betontrykflangen (serie I).

På fig. 1.3 er der for bjælke T23 vist tøjningsforløbet langs midten af beton-trykflangens overside ved nogle enkelte lasttrin. Det fremgår heraf, at der er betydelige trækspændinger i betonen nærmest understøtningerne. Nær brud vokser disse trækspændinger voldsomt, hvilket vidner om en betydelig buevirkning. Denne buevirkning fremgår også af revnerne i flangens overside på det viste brudbillede, fig. 2.9 (afsnit 2.4). Til-

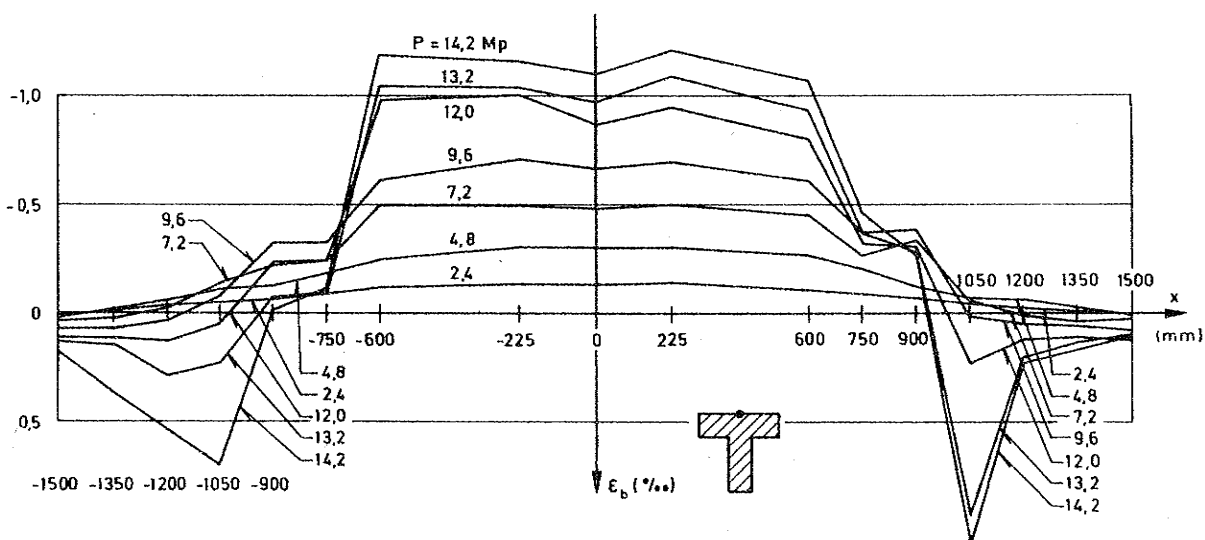


Fig. 1.3 Tøjningsforløb langs midten af trykflangens over-side for bjælke T23 (Tabel IIc).

svarende forhold gør sig gældende for de to øvrige bjælker i serie I.

I tabel IIa-c (afsnit 2.4) er tøjningerne anført for de tre bjælker i serie I.

1.3.3 Tøjning og kraft i længdearmring (serie I)

På fig. 1.4 er der for bjælke T23 optegnet kraften N_a i hovedarmringen ved nogle enkelte lasttrin, beregnet ud fra målingen med strain gages anført i tabel IIIc (afsnit 2.4).

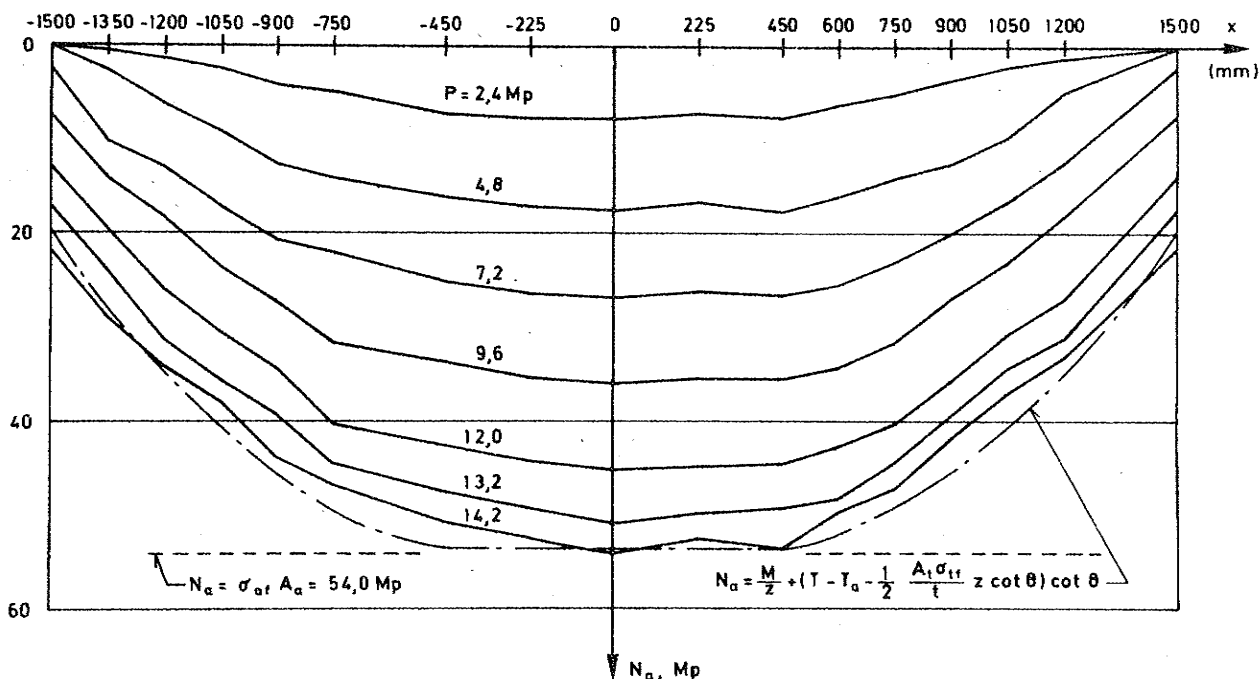


Fig. 1.4 Trækraften i hovedarmringen for bjælke T23. (Tabel IIIc).

Betragtes den diagonalrevnede bjælke på fig. 1.5 findes af ligevægtsligningerne, at N_a i snit A - A kan bestemmes af udtrykket

$$N_a = \frac{M_A}{z} + T_b \frac{c}{z} + \frac{1}{2} A_t \sigma_{tf} \frac{c^2}{tz} \quad (1.7)$$

hvor M_A er bøjningsmomentet i snit A - A og T_b er betontrykzonen bidrag til forskydningsoptagelsen. Når hovedarmeringens bidrag (dornvirkningen) til forskydningsoptagelsen betegnes T_a , fås endvidere for den samlede forskydningskraft T

$$T = T_a + T_b + A_t \sigma_{tf} \frac{c}{t} \quad (1.8)$$

Indføres diagonalrevnens middelhældning θ ved

$$\cot \theta = \frac{c}{z} \quad (1.9)$$

findes, idet T_b fra (1.8) indsættes i (1.7)

$$N_a = \frac{M_A}{z} + (T - T_a - \frac{1}{2} A_t \sigma_{tf} \frac{z}{t} \cot \theta) \cot \theta \quad (1.10)$$

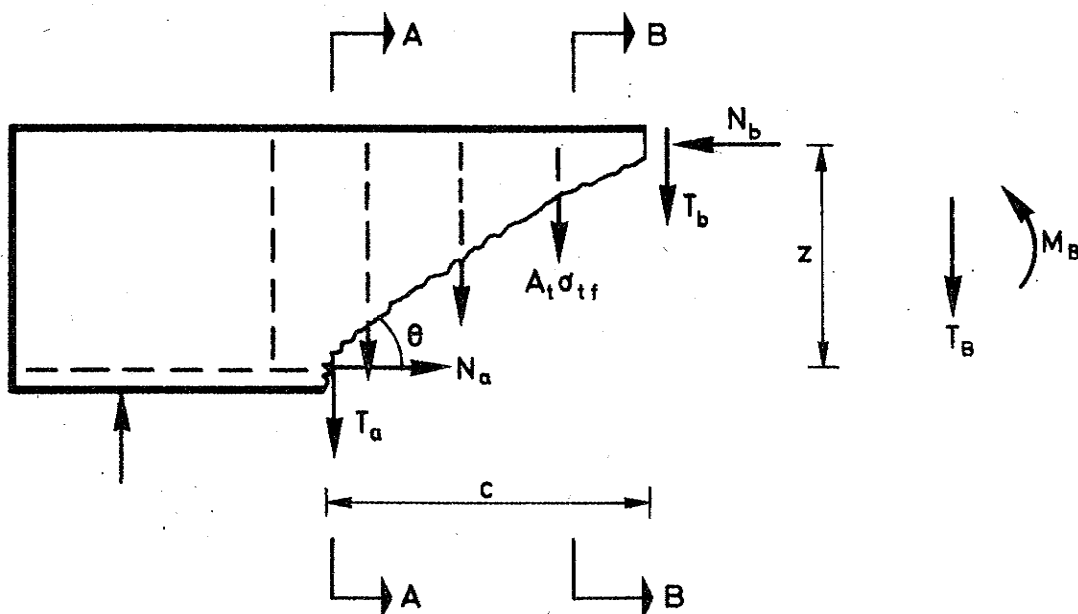


Fig. 1.5 Snitkræfter i diagonalrevnet bjælke.

N_a beregnet efter dette udtryk er indtegnet på fig. 1.4, idet T er indsat lig brudværdien P_u , momentarmen z er beregnet svarende til ren bøjning (sidste led i ligning (1.2)), og $\cot \theta$ er sat lig 0 i bøjningsfaget og regnet proportional med det betragtede snits afstand fra belastningssnittet. ($x = \pm 450$ mm), således at $\cot \theta = \frac{a}{z}$ ved reaktionen. For dornvirkningen T_a er der indsat et bidrag svarende til en enkelt bøjles flydekraft $A_t \sigma_{tf}$. I afstanden $c = z \cot \theta$ fra belastningssnittet fås da

$$N_a = P_u \frac{a}{z} - A_t \sigma_{tf} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{z}{t} \cot \theta\right) \cot \theta \quad (1.11)$$

Det fremgår af figuren, at dette udtryk giver en rimelig overensstemmelse med strain gage målingerne.

For at undersøge dornvirkningen er der på fig. 1.6a-c foretaget en afbildning af tøjningen i hovedarmeringens over- og underside for 3 karakteristiske snit - også i bjælke T23.

Midtersnittets tøjningsforløb (fig. 1.6a) viser, at tøjningen i samtlige målepunkter har været nær flydning (ϵ_{af}), hvilket antyder, at belastningen har været nær bøjningsbrudlasten, hvilket også fremgår af fig. 1.2.

Det på fig. 1.6b viste tøjningsforløb, er fra et snit beliggende umiddelbart før den største diagonalrevnes skæring med hovedarmeringen (sammenlign med revnebilledet på fig. 1.10). Det fremgår heraf, at der er store lokale krumninger i de enkelte armeringsstænger, og at der er foregået en glidning af de to armeringslag i forhold til hinanden. Dette vidner om en vis dornvirkning, der allerede er fremtrædende ved ca. 60% af brudlasten.

Reaktionssnittets tøjningsforløb (fig. 1.6c) viser tydeligt, at der er tale om en udpræget dornvirkning i hovedarmeringen, idet ikke alene den enkelte armeringsstang, men også de to lag tilsammen viser den modsatte krumning af, hvad der var tilfældet for det på fig. 1.6b viste snit.

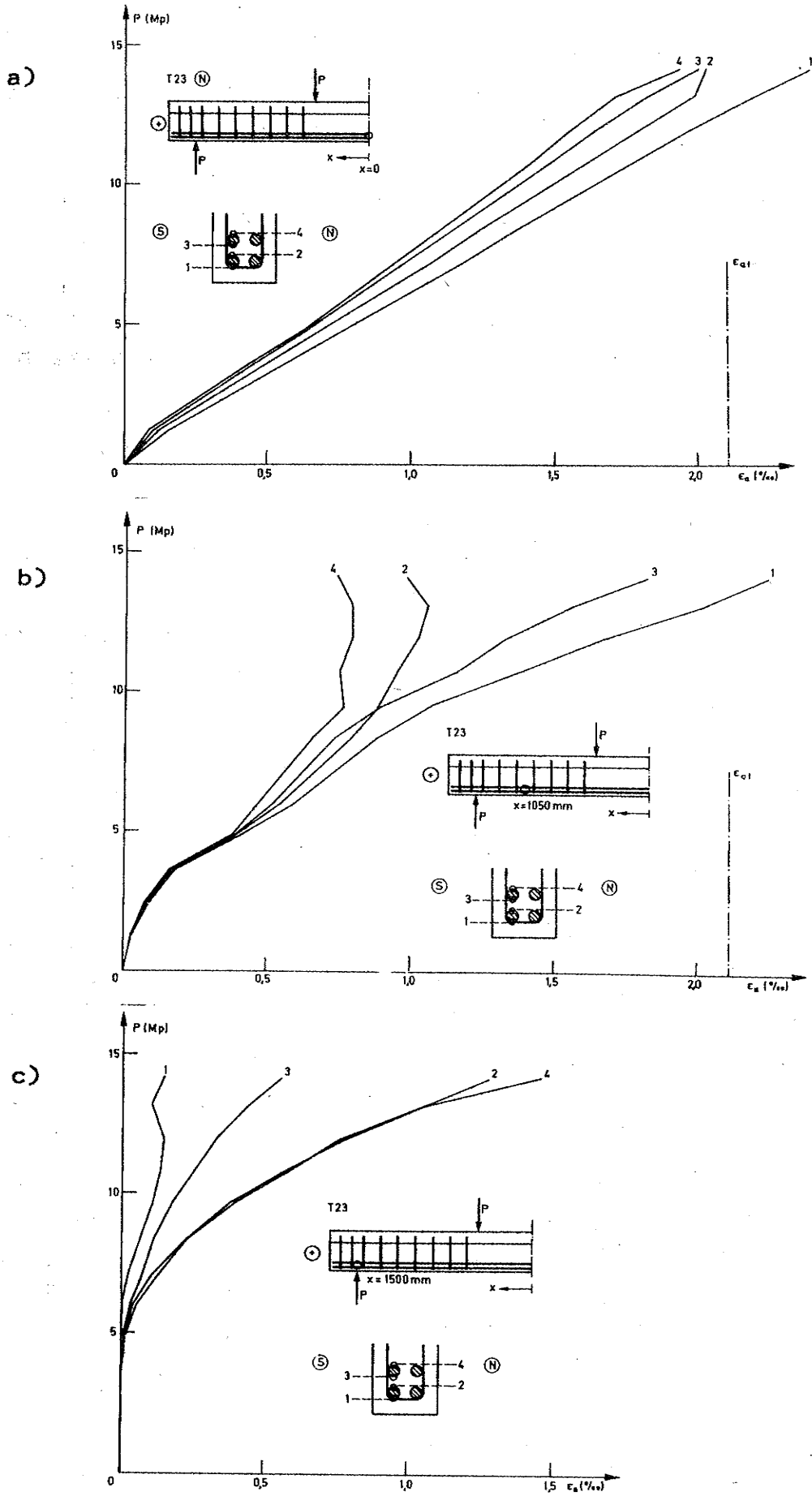


Fig. 1.6 Tøjning i hovedarmering.

1.3.4 Tøjning i bøjler (serie I)

På fig. 1.7 er vist tøjningerne i 4 af bøjlerne for bjælke T23 som funktion af belastningen. Det fremgår heraf og af tabel IVc (afsnit 2.4), at tøjningerne i alle bøjler har nået flydning, undtagen de bøjler, der er i umiddelbar nærhed af belastningssnit og understøtning. Tilsvarende forhold er også fundet af bl.a. Leonhardt og Walther [63.1].

Tøjningerne er allerede ved ca. 85% af brudlasten større end 4‰ i flere af bøjlerne, hvilket sammenholdt med revnemålingerne (tabel VIII) antyder, at det skulle være muligt at udnytte bøjler med betydelig højere flydespænding, f.eks. bøjler af Tentorstål.

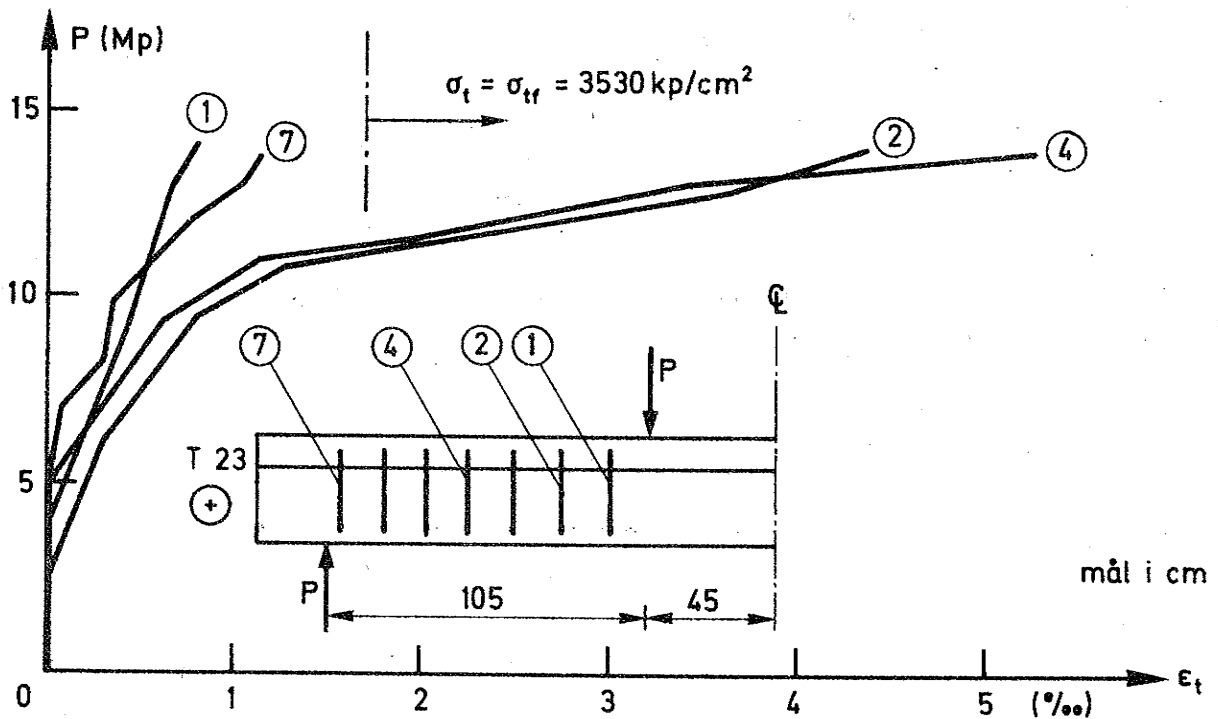


Fig. 1.7 Tøjningsforløbet i nogle bøjler i bjælke T23. (Tabel IVc).

1.3.5 Nedbøjningsmålinger (serie I)

På fig. 1.8 er der for bjælke T23 optegnet nedbøjningerne af bjælkens træk- og trykside. Som udgangspunkt for disse udbøjninger er der i begge tilfælde anvendt forbindelseslinien mellem to punkter i afstanden ± 1575 mm fra bjælkemidten.

Det fremgår af figuren, at der i forskydningsfaget er en betydelig forskel på de to nedbøjningslinier, når belastningen bliver større end ca. 50% af brudlasten. Dette skyldes åbning- en af diagonalrevnerne.

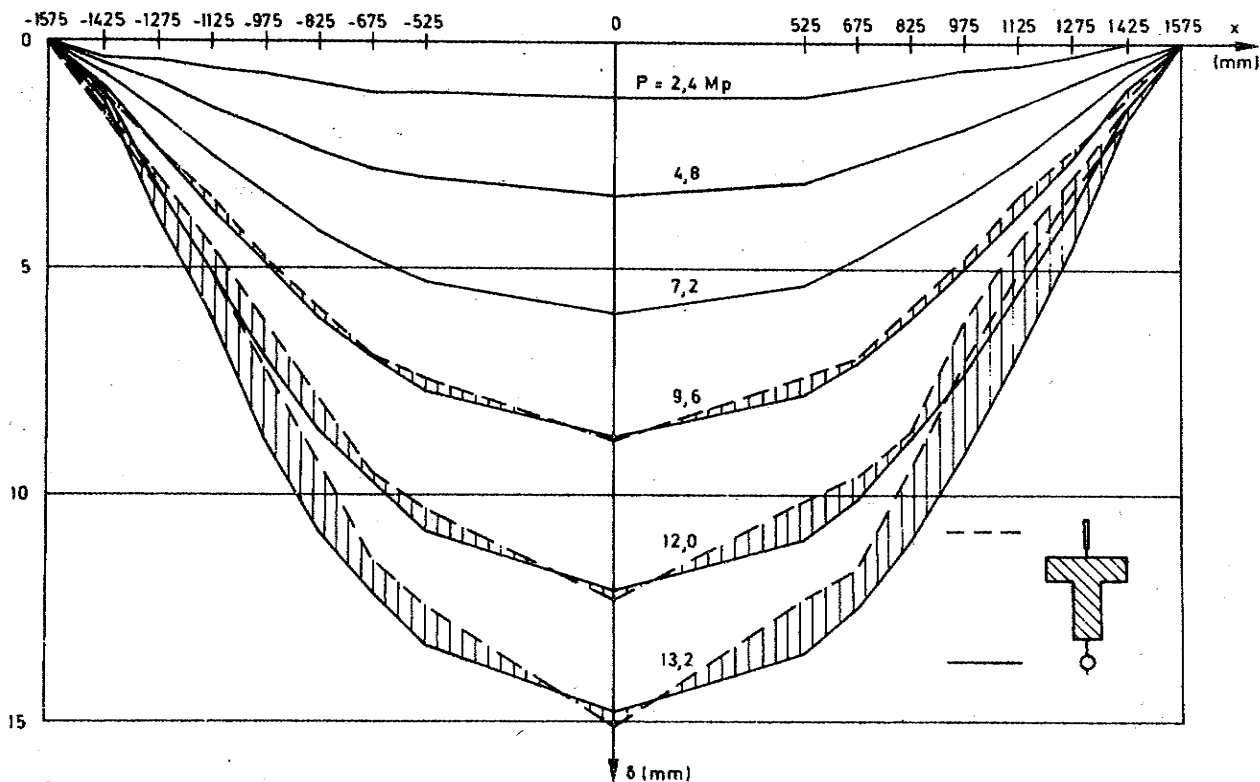


Fig. 1.8 Nedbøjning af træk- og trykside for bjælke T23. (Tabel Vc).

1.3.6 Målinger med spærmål

På fig. 1.9 er der for bjælke T23 i serie I optegnet middeltøjningen langs det nederste lag af længdearmeringen målt med spærmål uden på betonen (tabel VIc, afsnit 2.4). Til sammenligning er der foretaget en afbildning af tøjningerne målt med strain gages. Det ses heraf, at målingerne med spærmål max. afviger ca. 10% fra strain gage målingerne. I bøjningsfaget giver spærmålingerne altid for små værdier, hvilket også er tilfældet i forskydningsfaget indtil ca. 60% af brudlasten. Nærmere brud vil spærmålingerne ikke give et korrekt billede af det enkelte armeringslags tøjning. Således kan tøjningsmålinger på betonen ikke forventes at afspejle den i afsnit 1.3.3 omtalte dornvirkning.

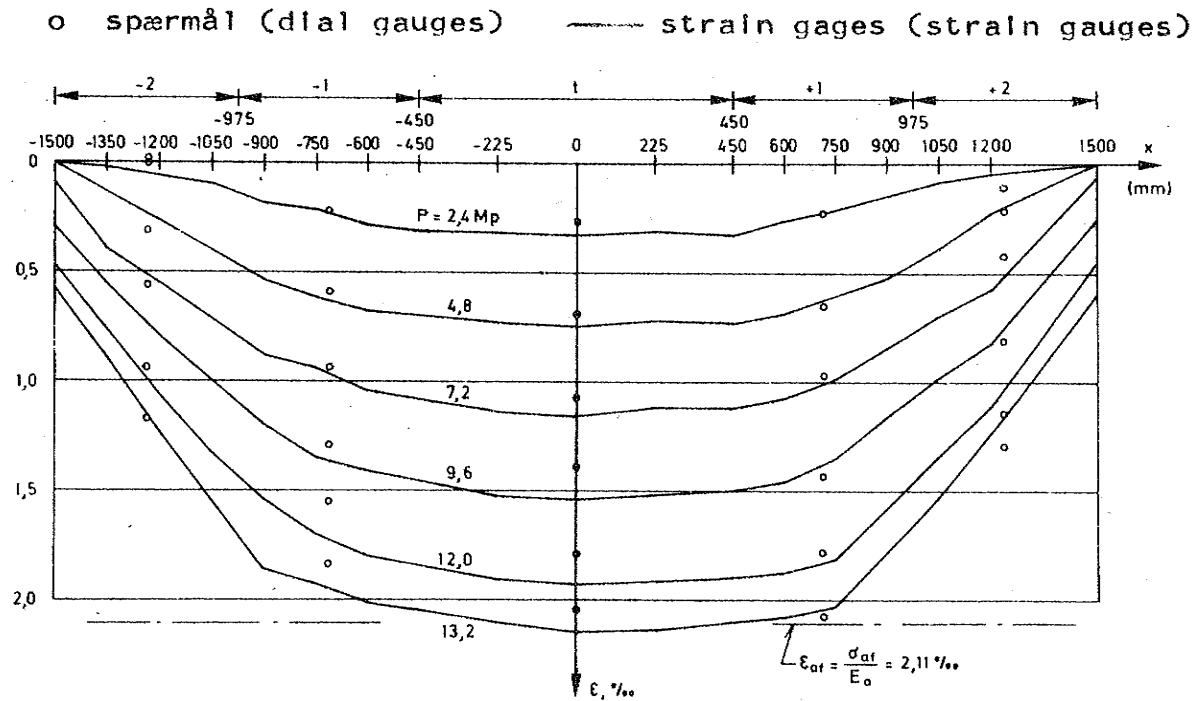


Fig. 1.9 Sammenligning af tøjningsmålinger med strain gages og med spærmål for bjælke T23 (Tabel IIIc og VIc).

1.3.7 Revnedannelse og revnevidder

På fig. 1.10 er vist revneudviklingen hos bjælke T23 i serie I. Det ses heraf, at den første diagonalrevne dannes som en bøjningsforskydningsrevne, og at den danner en vinkel på ca. 45° med bjælkeaksen. Efterhånden som belastningen øges, dannes der med en afstand ca. lig bøjleafstanden flere tilsvarende diagonalrevner i forskydningsfaget. Diagonalrevnernes maksimale revnevidde er indtil ca. 75% af brudlasten forholdsvis beskedne (mindre end 0,3 mm), som det fremgår af tabel VIII i afsnit 2.4. Dette svarer til, at tøjningerne i bøjlerne stadig er i det elastiske område, jfr. fig. 1.7. Når belastningen nu øges, vokser revnevidden betydeligt, og der dannes ikke flere diagonalrevner under 45° med bjælkeaksen. Der er en tendens til, at der mellem de først dannede diagonalrevner opstår fladere diagonalrevner, efterhånden som belastningen øges. Inden brud udbreder diagonalrevnerne sig op i trykflangen, og der dannes trækrevner i trykflangens overside, som tegn på en vis buevirkning. Bjælken bryder, ved at trykflangen gennemskares af en enkelt revne, samtidig med at

to diagonalrevner forenes med en vandret revne langs længdearmeringen, der dermed knækker ud (svigtende dornvirkning).

De maksimale revnevidder for bjælkerne i serie I er angivet ved nogle enkelte lasttrin i tabel VIII i afsnit 2.4.

Revnebilledet ved brud er for samtlige bjælker vist på fig. 2.9.a-n i afsnit 2.4. Revneudviklingen vil fremgå af revnernes nummerering, som beskrevet i afsnit 2.3.7.

En sammenligning af revnebilledet på bjælkernes to sider (N og S) viste, at dette i store træk var symmetrisk, til trods for at der ved serie I blev ført dobbelt så mange strain gageledninger ud gennem bjælkernes S-side, som i N-siden.

Foretages en sammenligning af revnebillederne for bjælkerne i serie I og serie II, kan der ikke konstateres nogen væsentlig forskel. Dette er i overensstemmelse med, at de opserverede diagonalrevner for bjælkerne i serie I ikke havde større tendens til at udgå fra punkter, hvor ledningerne blev ført ud fra bjælkekroppen.

Af tabel I (afsnit 1.3.1) fremgår det, at ca. $2/3$ af bjælkerne fik brud i den ende af forskydningsfaget, der er betegnet med minus (-) (se definition fig. 2.7 i afsnit 2.2.1). Dette skyldes muligvis den i afsnit 2.2.1 fig. 2.7 viste belastningsopstilling. Imidlertid viste revneudviklingen og tøjningsmålingerne en udpræget symmetri i de to forskydningsfag, således at det først umiddelbart inden brud var muligt at forudsige, i hvilken side bruddet ville indtræffe.

Diagonalrevnelasten P_{cr} , defineret som den belastning, hvor en diagonalrevne har nået bjælketværnsnittets tyngdepunktslinie, kan iflg. Zsutty's udvidede formel (Zsutty [68.2] og Sørensen [70.1]) bestemmes af udtrykket

$$P_{cr} = 10.1 \left(\sigma_c w_{ao} \frac{h}{a} \right)^{\frac{1}{3}} b_o h \leq 0,93 \sqrt{\sigma_c} b_o h \quad (1.12)$$

Indsættes $\sigma_c = 330 \text{ kp/cm}^2$ for serie I og $\sigma_c = 250 \text{ kp/cm}^2$ for serie II, findes

$$P_{cr} = 4,6 \text{ Mp for serie I} \quad (1.13)$$

og

$$P_{cr} = 4,9 \text{ Mp for serie II}$$

hvilket stemmer udmærket overens med forsøgsresultaterne (jfr. fig. 2.9).

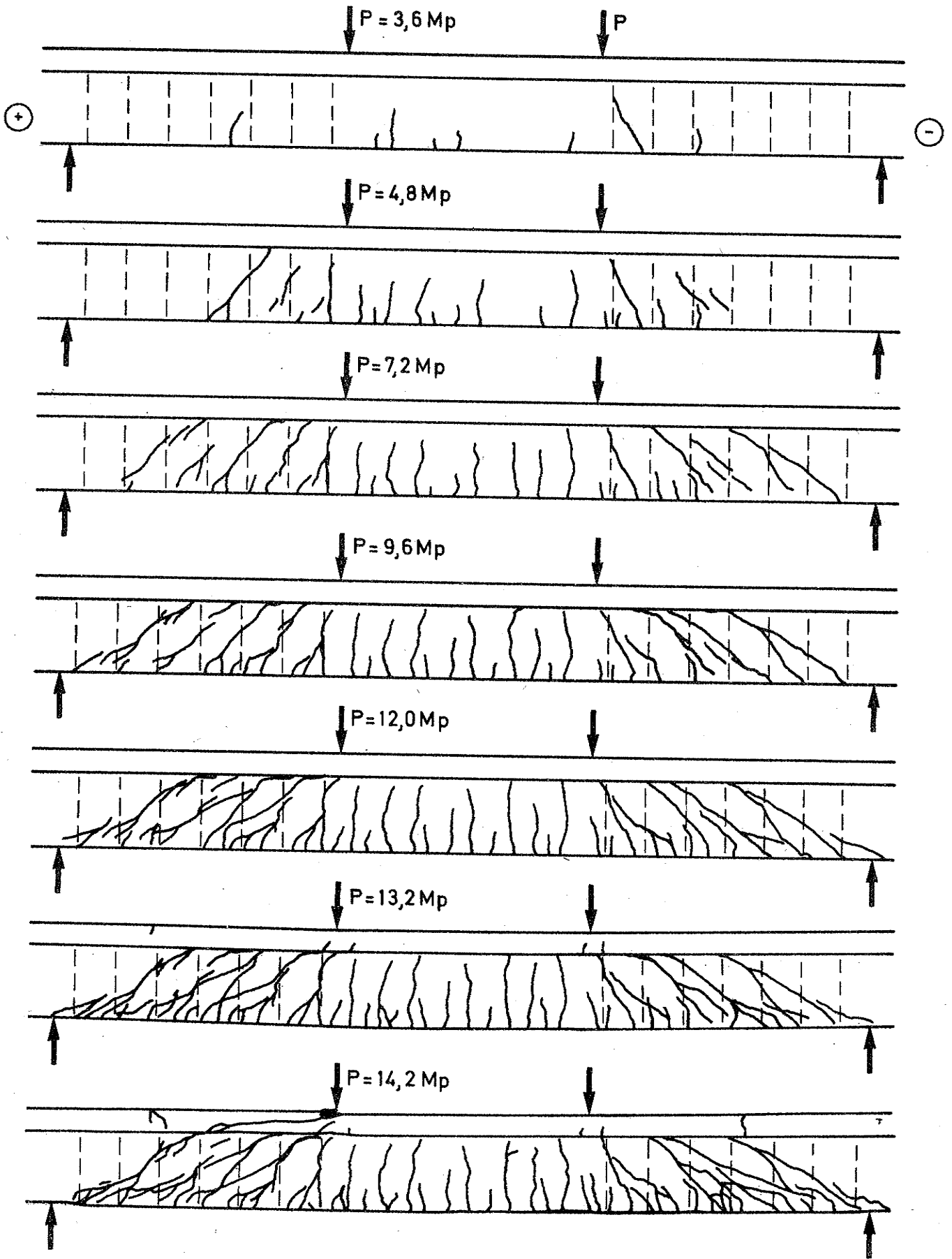


Fig. 1.10 Revneudvikling for bjælke T23 (side N).

1.4 Konklusion

- 1) Sammenligning af bjælkernes forskydningsbrudlast med to typiske beregningsformler viser, at der er relativ god overensstemmelse med Hillerborgs beregningsudtryk, mens en beregning efter ACI's beregningsudtryk giver værdier ca. 60% under bjælkernes brudlast.
- 2) Revnebillede og målinger med strain gage på betontrykflangen viser, at der opstår en betydelig buevirkning i bjælkens forskydningsfag.
- 3) Målinger med strain gage på hovedarmeringen viser, at der fra ca. 60% af brudlasten indtil brud findes en betydelig dornvirkning.
- 4) Målinger med strain gage på bøjlerne viser, at disse inden brud i flere tilfælde opnår tøjninger større end 5‰, hvorved det sammenholdt med målingen af revnevidder i forskydningsfaget må forventes, at det er muligt at udnytte bøjler med en flydespænding på 5-6000 kp/cm² som forskydningsarmering.
- 5) Deformationsmålinger uden på betonen i niveau med længdearmeringen giver sammenlignet med direkte tøjningsmålinger med strain gage resultater, der maksimalt er ca. 10% for lave. Bedst overensstemmelse fås, når der ikke forekommer lokale krumninger (dornvirkning) langs hovedarmeringen.

1.5 Litteratur

- [62.1] ACI-ASCE Committee 326.
Shear and Diagonal Tension.
ACI-Journal. Proceedings V. 59, No. 1,2,3, 1962,
pp. 1-30, pp. 277-333, pp. 353-395.
- [63.1] Leonhardt, F., Walther, R.
Schubversuche an Plattenbalken mit unterschiedlicher
Schubbewehrung.
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, H. 156, 1963,
84 pp.
- [67-1] ..
Özden, K.
An Experimental Investigation on the Shear Strength
of Reinforced Concrete Beams.
Technical University of Istanbul, 1967, 249 pp.
- [68.1] Regan, P.
Shear Strength of Reinforced Concrete Beams.
Department of Civil Engineering, Imperial College,
London, 1968, 164 pp.
- [68.2] Zsutty, T.C.
Beam Shear Strength Prediction by Analysis of
Existing Data.
ACI-Journal. Proceedings V. 65, No. 11, 1968,
pp. 943-951.
- [69.1] Kani, G.N.J.
A Rational Theory for the Function of Web Reinfor-
cement.
ACI-Journal. Proceedings V. 66, No. 3, 1969,
pp. 185-197.

- [69.2] Sørensen, H.C.
Vejledning i brug af ALGOL-programmerne "SOLAR-
TRONDATA" og "SOLARTRONSTRIMMEL UD".
Del 1: Rapport. Del 2: Bilag.
Laboratoriet for Bærende Konstruktioner, D.t.H.
1969. 25 pp. + bilag.
- [69.3] CEB-FIP
Recommandations Internationales pour le calcul et
l'exécution des ouvrages en béton.
Rédaction Provisoire. 1: Principes et Recommanda-
tions, 2: Manuel d'application. Paris 1969, 149+73 pp.
- [70.1] Sørensen, H.C.
Forskydningsarmering i jernbetonbjælker.
Danmarks tekniske Højskole, Afdelingen for Bærende
Konstruktioner, Report No. 19, 1970, 122 pp.

2 Forsøgsspecifikationer og forsøgsresultater.

2.1 Bjælker

2.1.1 Fremstilling af bjælke

Bjælken blev støbt i en stålform, hvor siderne fjernedes 1 døgn efter støbningen, hvorefter bjælken blev overdækket med våde søkke i 4 døgn. De sidste 9 døgn opbevaredes bjælken i laboratoriet, hvor den relative fugtighed var ca. 50% og temperaturen ca. 18°C. Alle bjælker blev prøvet 14 døgn efter støbningen. Bjælkens dimensioner og armeringens placering afveg højst ± 1 mm fra de angivne mål.

Sammen med hver bjælke støbtes en række prøvecylindre 150 x 30 cm, der blev opbevaret under samme betingelser som den støbte bjælke. I serie I blev der støbt 10 cylindre og i serie II 6 cylindre for hver bjælke.

2.1.2 Beton

Til betonen anvendtes Portland Rapid Cement. For alle bjælker var C/V-forholdet lig 1,40 og betonens vebeograd lig ca. 8 sek. Som tilslagsmateriale anvendtes betongrus og ærtesten i forholdet 35:65. Kornkurver for disse to materialer fremgår af fig. 2.1.

I serie I blev 4 cylindre anvendt til bestemmelse af betonens spaltstyrke σ_{sp} og 6 til bestemmelse af trykstyrken σ_c . 3 af trykcylindrene blev belastet til brud med en belastningshastighed på ca. 25 kp/cm² pr. min. De øvrige 3 blev belastet til brud med en belastningshastighed på ca. 6 kp/cm² pr. min., idet de samtidig blev anvendt til bestemmelse af betonens arbejdskurve. Til dette formål var der placeret 2 strain gages (type, se afsnit 2.3.2) langs to modstående frembringere (ϵ_l) og 2 strain gages vinkelret herpå (ϵ_t).

I serie II blev 4 cylindre belastet til brud med en belastningshastighed på ca. 25 kp/cm² pr. min. De øvrige 2 cylindre blev belastet til brud med en belastningshastighed på ca. 9 kp/cm² pr. min., idet disse samtidig blev anvendt til bestemmelse af betonens trykarbejdskurve.

For serie I lå trykstyrken σ_c i intervallet 306 til 357 kp/cm² og for serie II i intervallet fra 209 til 286 kp/cm². Variationskoefficienten inden for den enkelte støbning var

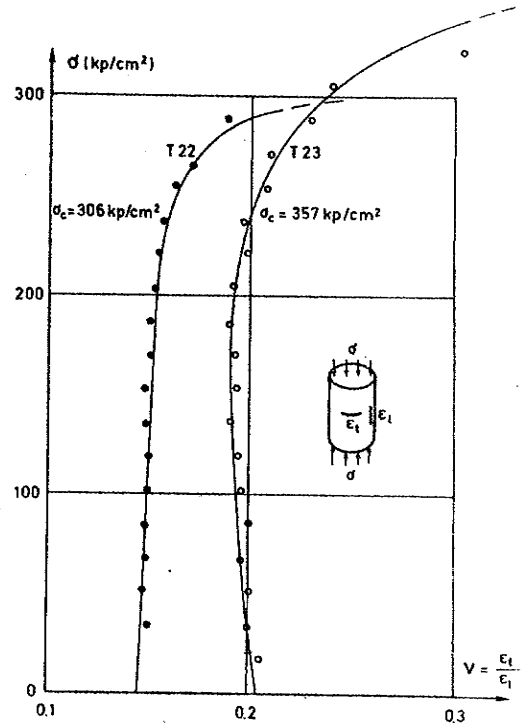
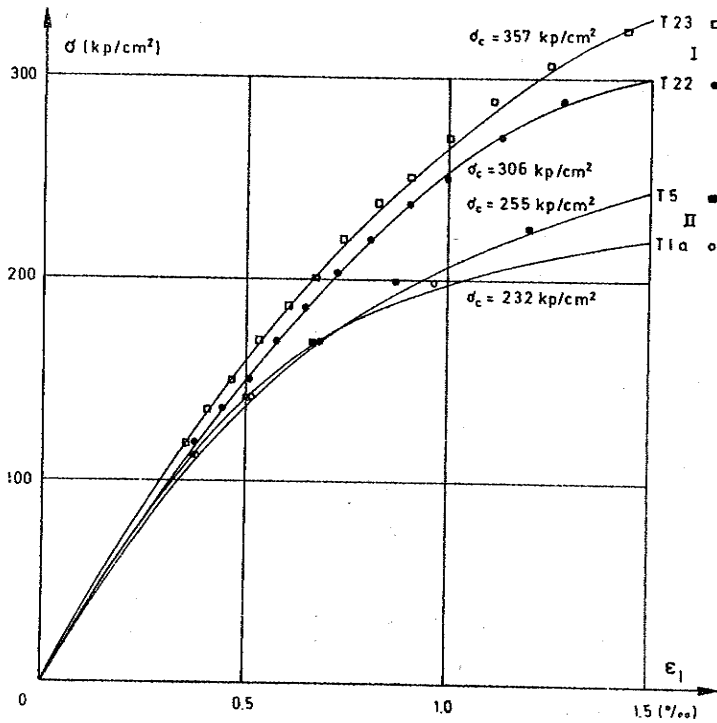
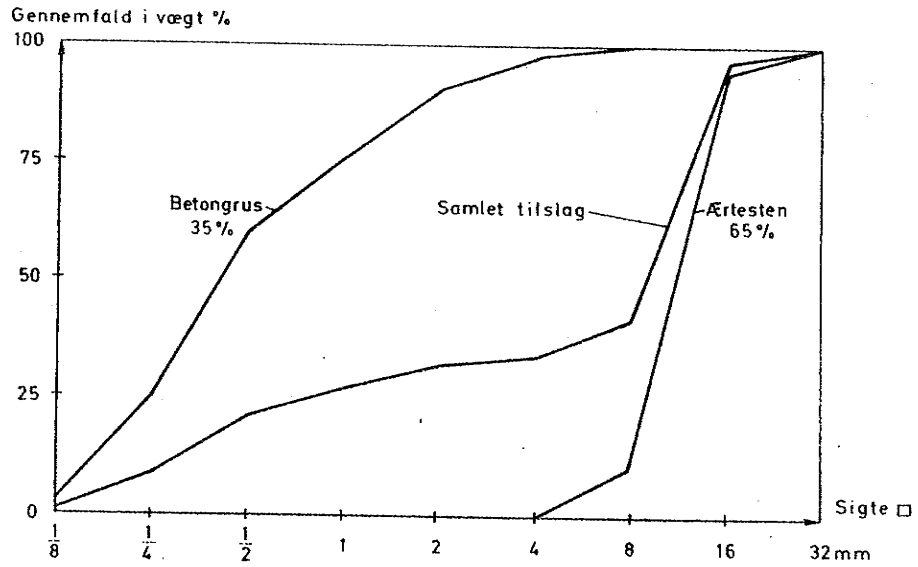


Fig. 2.2a Trykarbejdslinier for betonen i serie I og II.

Fig. 2.2b Poissons forhold for betonen i serie I.

maksimalt 5%. Middelværdien af σ_c for de enkelte bjælker er anført i tabel I (afsnit 1.3.1). Spaltestyrken σ_{sp} blev i middel fundet til $34,7 \text{ kp/cm}^2$ for serie I.

På fig. 2.2a er angivet to trykarbejdskurver for hver af serierne I og II, svarende til mindste og største σ_c . På fig. 2.2b er angivet Poissons forhold ν for to cylindre fra serie I.

Til trods for ens betonproportionering ved de to forsøgsserier, ses det, at σ_c ved serie II afveg væsentligt fra σ_c ved serie I. Denne forskel skyldes sandsynligvis, at den anvendte cement stammer fra to forskellige leveringer.

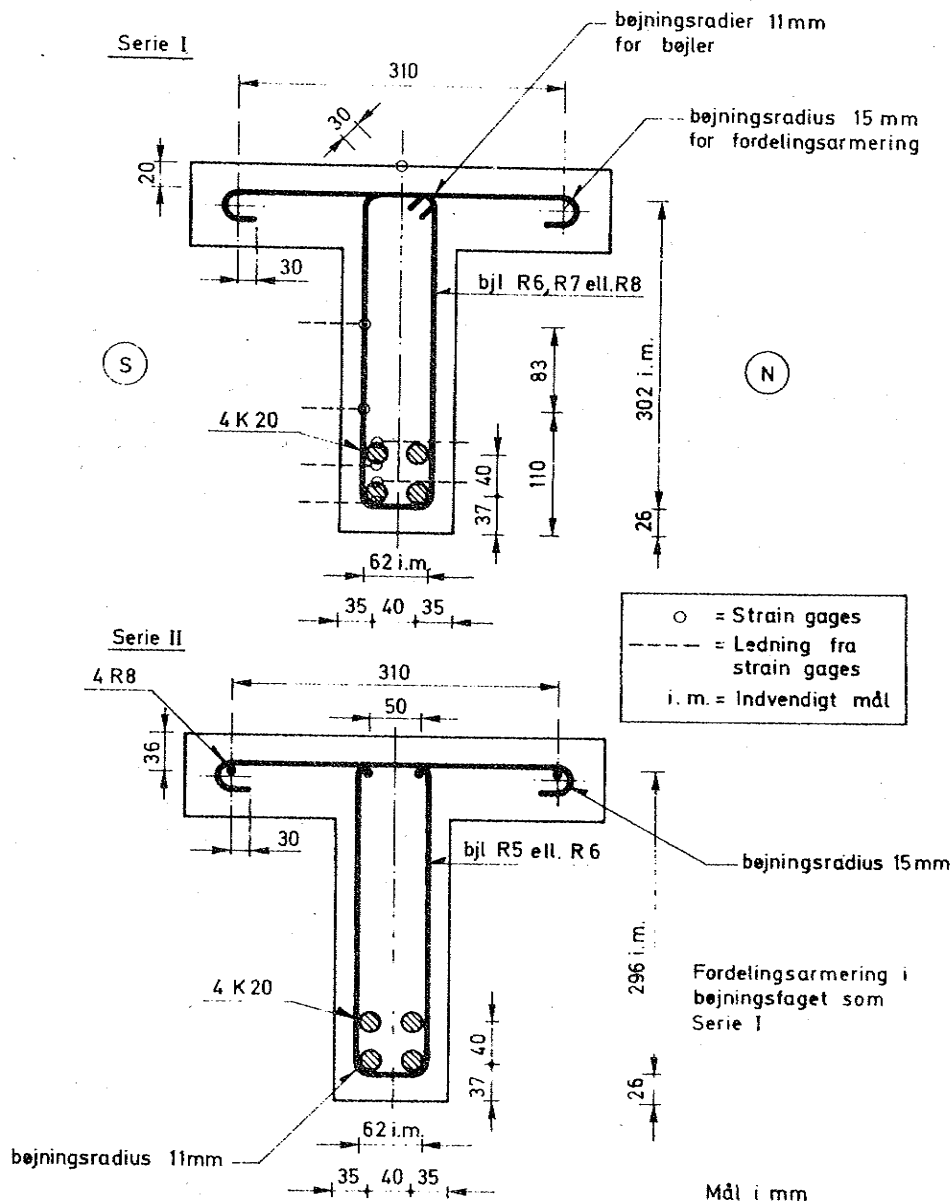


Fig. 2.3 Tværsnit for bjælker i serie I og II. Placering af strain gages for bjælker i serie I.

2.1.3 Hovedarmering

Som hovedarmering anvendtes Dansk Kamstål, ialt 4 stk. K20 placeret i 2 lag, hvorved det samlede nominelle armeringsareal blev $A_a = 12,6 \text{ cm}^2$. Armeringsstængernes placering fremgår af fig. 2.3 og 2.4.

De to armeringsstænger i hvert lag stammer fra den samme stanglængde, hvoraf der endvidere blev udtaget en prøvestang til bestemmelse af trækarbejdslinien. På fig. 2.5 og 2.6 er der vist typiske arbejdslinier. På figurerne er der endvidere angivet middelværdien af flydespændingen (σ_f) og elasticitetskoefficienten (E), samt de tilhørende variationskoefficienter v (for serie I bestemt ud fra 6 prøver og for serie II ud fra 18 prøver). Den jævnt fordelte brudforlængelse (δ_e) og brudspændingen (σ_u) fremgår også af figurerne.

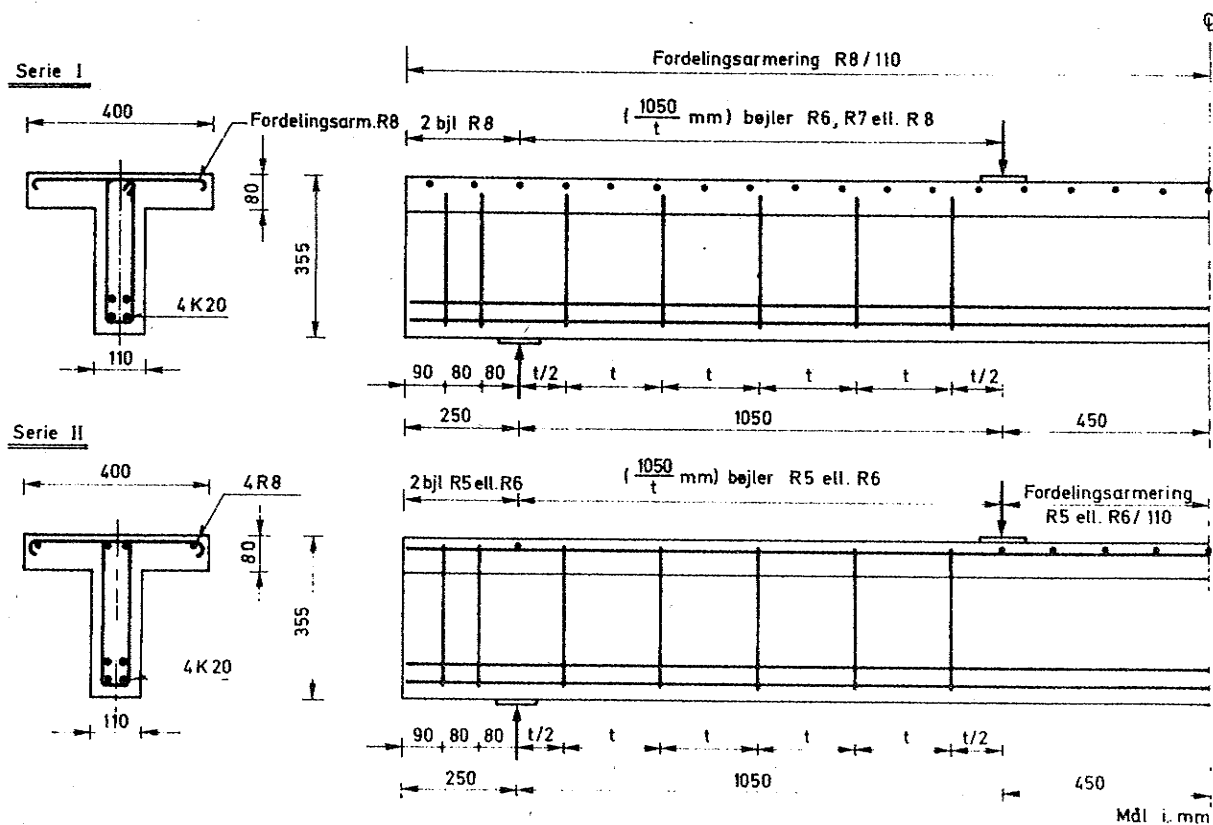


Fig. 2.4 Armeringens placering for bjælker i serie I og II.

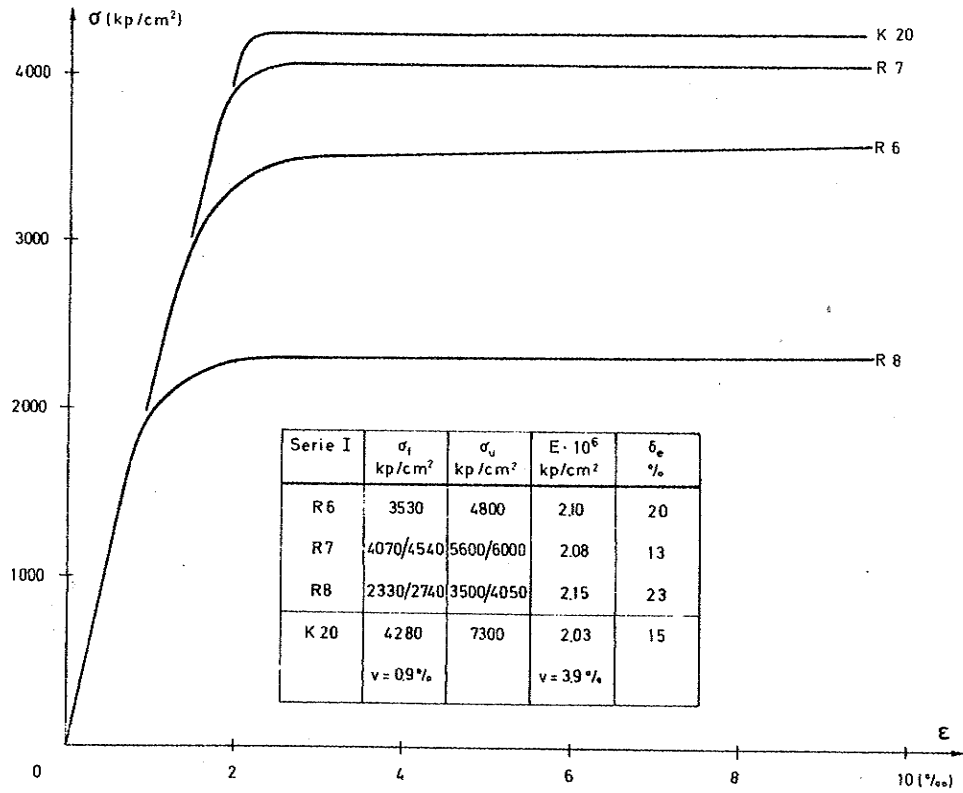


Fig. 2.5 Arbejdslinier for armering i serie I.

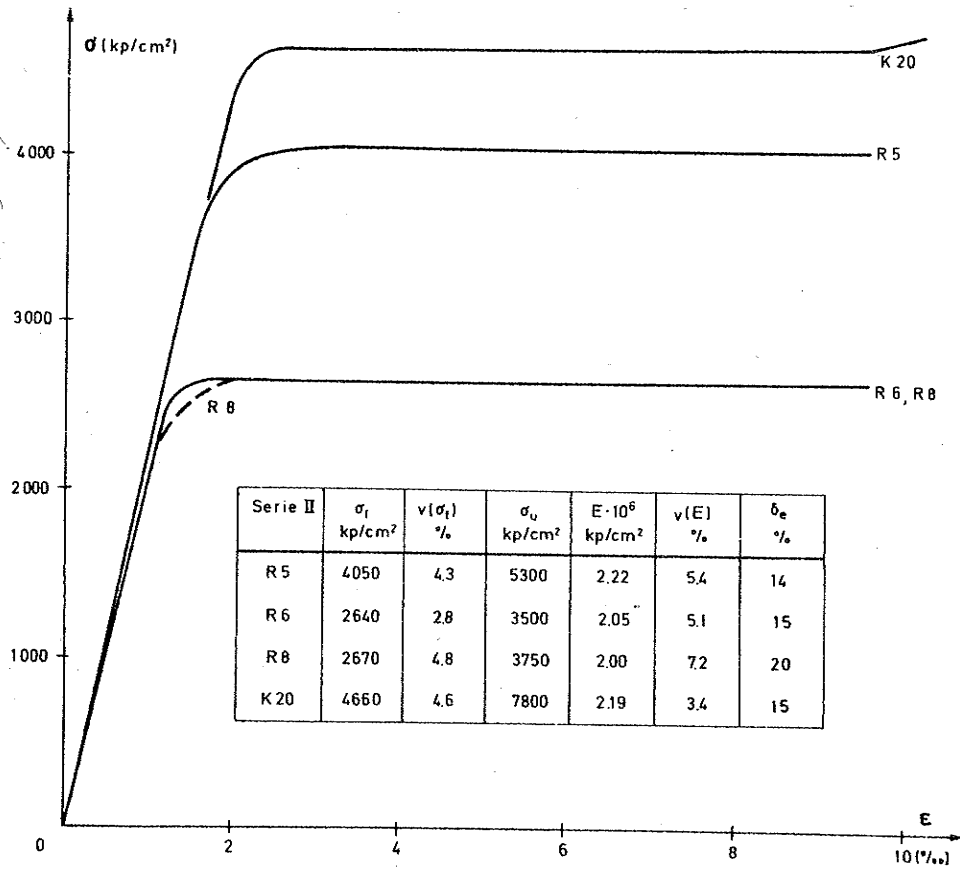


Fig. 2.6 Arbejdslinier for armering i serie II.

2.1.4 Langsgående armering i trykzonen

Bjælkerne i serie II var forsynet med en langsgående armering i trykzonen, der bestod af glat armering R8, ialt 4 stk., hvorved det samlede nominelle armeringsareal i trykzonen blev $2,01 \text{ cm}^2$. Placeringen fremgår af fig. 2.3 og 2.4. På fig. 2.6 er vist en typisk arbejdslinie for denne armering. På figuren er endvidere anført flydespænding, brudspænding, elasticitetsmodul og brudforlængelse.

2.1.5 Fordelingsarmering i trykflangen

I serie I bestod fordelingsarmeringen i bjælkens trykflange af glat armering R8 pr. 11 cm vinkelret på bjælkeaksen. Placering og form fremgår af fig. 2.3 og 2.4. Denne armering var af samme type som den bøjlearmering, der blev anvendt i bjælke T21.

I serie II bestod fordelingsarmeringen tilsvarende af glat armering R5 eller R6 pr. 11 cm i bøjningsfaget, idet armeringsdimensionen var den samme som for de anvendte bøjler i forskydningsfaget.

2.1.6 Forskydningsarmering

Som forskydningsarmering blev anvendt 2-snits bøjler af glat armering i dimensionerne R5, 6, 7 og 8 mm. Bøjlernes form og placering fremgår af fig. 2.3 og fig. 2.4. Til bestemmelse af denne armerings trækarbejdskurve blev der udtaget 1 eller 2 prøver af hver armeringslængde. Typiske arbejdskurver er vist på fig. 2.5 og 2.6.

For serie I blev den ene af stængerne prøvet 2, $2\frac{1}{2}$ henholdsvis 3 måneder før den tilsvarende bjælke blev prøvet, mens de resterende stænger blev prøvet $1\frac{1}{2}$, 1 henholdsvis $\frac{1}{2}$ måned efter, at den tilsvarende bjælke var prøvet, svarende til rækkefølgen R7, R8 og R6 (T22, T21 og T23). For R7 og R8 blev der ved den anden prøve fundet betydelig højere flydespændinger end ved den første prøvning, som det fremgår af fig. 2.5. Dette forhold skyldes formodentlig, at det leverede rundjern som afsluttende proces har været underkastet en vis kolddeformationsbehandling hos leverandøren, f.eks. en retteproces. Materialets endelige styrkeegenskaber opnås da først efter en modningsperiode. Forskydningsarmeringens flydespænding på prøvedagen er

således ikke helt veldefineret for bjælkerne T21 og T22.

For serie II blev der foretaget trækprøver både 1 måned før forsøgstidspunkter og på selve forsøgsdagen. Ved denne forsøgsserie blev der ikke konstateret nogen forskel i flydespændingen ved de to sæt trækforsøg. For hver armeringstype blev der ialt foretaget ca. 25 enkeltprøver til arbejdsliniebestemmelse.

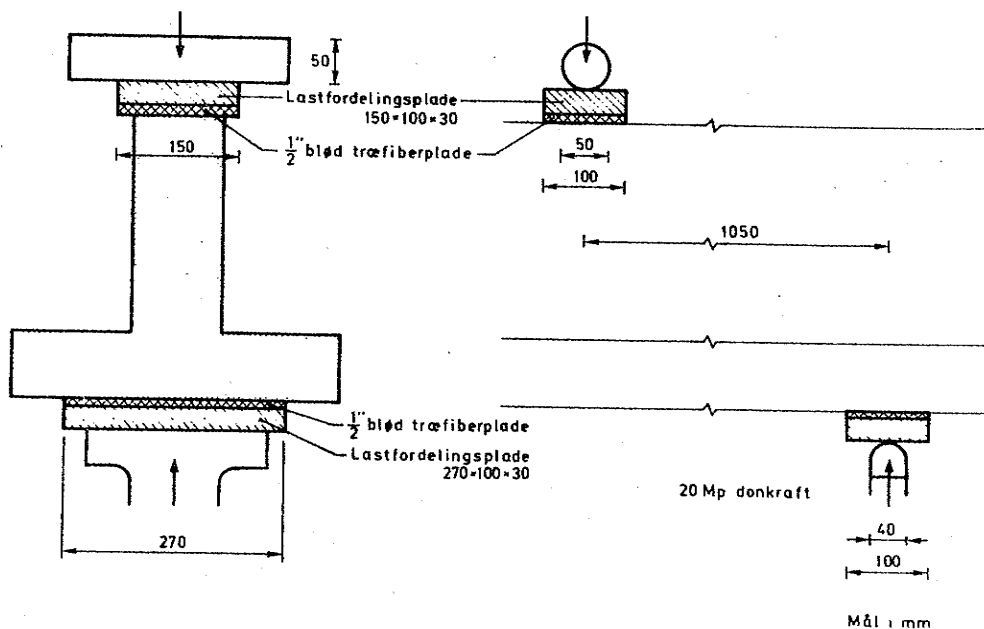
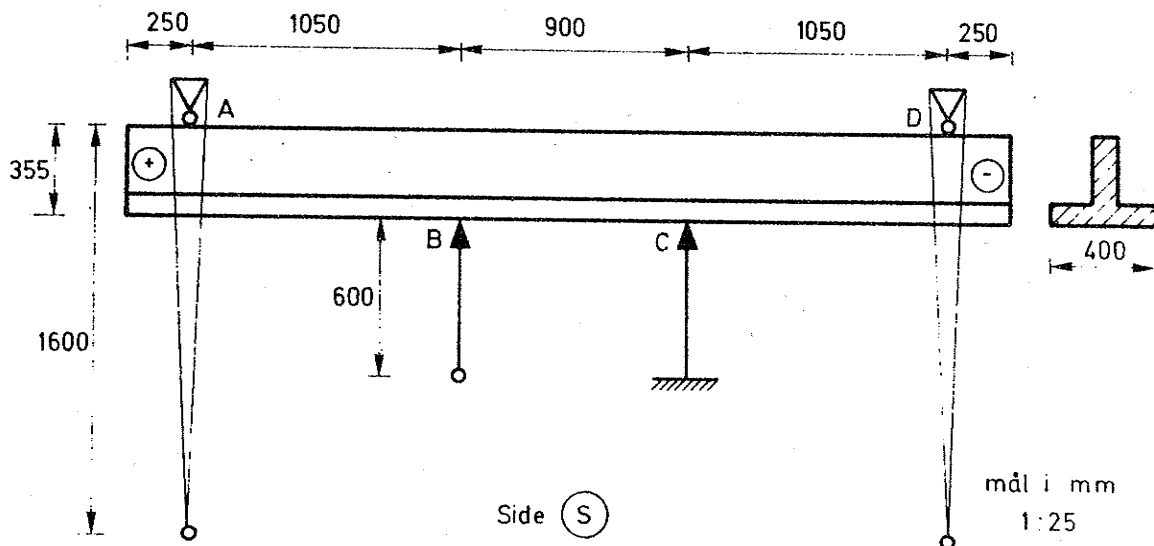


Fig. 2.7 Belastningsopstilling.

2.2 Belastning

2.2.1 Belastningsanordning

Bjælkerne blev prøvet i laboratoriets 105 Mp hydrauliske bøjeprovemaskine (Amsler) med trykflangen nedad, se iøvrigt fig. 2.7. Donkraften ved punkt C var fastholdt mod bevægelse i bjælkens længderetning, mens donkraften ved punkt B kunne dreje omkring et punkt ca. 600 mm under belastningspunktet. Lejerne ved punkt A og D var pendullejer med pendularm ca. 1600 mm. Belastningen blev ved donkraften B og C overført gennem to stålplader $10 \times 27 \times 3 \text{ cm}^3$ og ved lejerne A og D gennem to stålplader $10 \times 15 \times 3 \text{ cm}^3$. Mellem stålplade og beton var der anbragt en mellemlægsblanket af $\frac{1}{2}$ " blød træfiberplade.

2.2.2 Belastningshistorie

Ved serie I varede de første 5 lasttrin ca. 20 min. hver, mens de øvrige lasttrin hver havde en varighed på ca. 30 min. De i tabellerne anførte aflæsninger blev foretaget ca. 12 min. efter hver lastpåførsel, idet kontinuerlige målinger viste, at tøjningerne i strain gage først på dette tidspunkt var i ro.

Ved serie II varede hvert lasttrin 7 min. (for bjælke T5 dog kun 4 min.). Aflæsningen af spærmålene blev foretaget $6\frac{1}{2}$ min. efter hver lastpåførsel (resultater fra serie I viste, at spærmålene var i ro allerede 5 min. efter lastpåførslen).

For begge serier var hvert lasttrin af størrelsen 1,0 til 1,5 Mp, som det fremgår af tabellerne afsnit 2.3. Lasten blev påført i spring på ca. 0,2 Mp, idet det herefter blev kontrolleret, om måleurene kom i ro.

2.3 Forsøgsresultater

2.3.1 Strain gage målinger, generelt

Aflæsning af samtlige strain gages blev foretaget automatisk med 2 dataloggere (mrk. Solartron) og registreret på papirtape med henblik på EDB-behandling. Af kontrolgrunde blev der endvidere foretaget en registrering på printer. En enkelt gennemlæsning af de ialt 100 - 130 strain gages varede $1\frac{1}{2}$ min. Der blev ved hvert lasttrin foretaget aflæsning 1, 4, 7 og 10 min. efter, at belastningen var påført. Efter de 10 min. blev der foretaget automatisk aflæsning hver $1\frac{1}{2}$ min. Der blev så-

I tabel IIIa-c er tøjningerne angivet for de tre bjælker i serie I, endvidere er tøjningsforløbet for bjælke T23 optegnet på fig. 1.3.

2.3.3 Tøjninger langs længdearmeringen (serie I)

På de to længdearmeringsstænger i bjælkeside S var der i en række snit vinkelret på bjælkeaksen placeret 6 mm strain gages (type HBM 6/120 LE 11). Målesnittenes tilstræbte placering langs bjælkeaksen fremgår af fig. 2.8. I hvert målesnit var der placeret 4 strain gages, se fig. 2.3. Af hensyn til fastgørelsen af strain gagen blev en kam på hver side af den enkelte armeringsstang slebet bort. Strain gagenes afvigelse fra den tilstræbte placering var max. ± 5 mm. De anvendte strain gages (incl. lim) er lineære for tøjninger mindre end 7‰.

I de 14 dage mellem betonens udstøbning og forsøgets udførelse blev strain gagenes isoleringsmodstand jævnligt kontrolleret. Resultatet heraf var, at 1 - 6 strain gages i hver bjælke havde for lille isolationsmodstand og måtte udgå.

I tabel IIIa-c er tøjningerne for hver enkelt strain gage angivet for de tre bjælker i serie I. For bjælke T23 er der på fig. 1.4 foretaget en afbildning af kraftforløbet (N_a) langs bjælken og på fig. 1.9 en afbildning af middeltøjningen langs bjælken i den nederste armeringsstang til sammenligning med resultatet fra målingerne med spørgsmål.

2.3.4 Tøjninger i bøjler (serie I)

På hver bøjle i forskydningsfaget var der anbragt to stk. 6 mm strain gages (type HBM 6/120 LE 11) på det bøjle-ben, der var i bjælkeside S. Placeringen af strain gagen fremgår af fig. 2.3.

I tabel IVa-c er angivet tøjningerne for de tre bjælker i serie I. Nær brud blev tøjningerne i flere tilfælde så store, at måleområdet blev overskredet (eller strain gagens tilledning blev afbrudt). På fig. 1.7 er tøjningsforløbet optegnet for 4 bøjler i bjælke T23.

2.3.5 Nedbøjningsmålinger (serie I)

Der blev for bjælkerne i serie I foretaget nedbøjningsmålinger af træk- og trykside - på træksiden med 1/100 mm måleure og på tryksiden med nivellement til nedhængende stadier. Målepunkternes placering fremgår af fig. 2.8. De i tabel Va-c angivne flytninger er beregnet ud fra forbindelseslinien mellem to punkter i afstanden $\pm (1500 \text{ mm} + \frac{1}{2} t)$ fra bjælkemidten. Måleusikkerheden for de herved beregnede flytninger er $\pm 0,03$ mm. På fig. 1.8 er der for bjælke T23 optegnet nedbøjningerne ved nogle enkelte lasttrin.

2.3.6 Målinger med spærmål

I serie I blev der foretaget deformationsmålinger langs længdearmeringens nederste lag og langs midten af betontrykflangen i bøjningsfaget, se iøvrigt fig. 2.8. Deformationsmålingen blev foretaget med spærmål, hvor der blev anvendt 1/100 mm måleure. I tabel VIa-c er angivet de heraf beregnede middeltøjninger. På fig. 1.9 er der foretaget en sammenligning af målingerne med spærmål og med strain gages.

I serie II blev der kun foretaget deformationsmålinger i midterfaget, - dels langs længdearmeringens tyngdepunktslinie og dels langs betontrykflangen ca. i højde med trykarmeringen. I tabel VII er der angivet de heraf beregnede middeltøjninger.

2.3.7 Revnedannelse og revnevidder

Ved hvert lasttrin blev der foretaget en optegning af de dannede revner, og der blev foretaget en nummerering, idet revnernes endepunkt efter hvert lasttrin blev påført en tværstreg ud for hvilken lasttrinets nummer blev anført. Sammenhæng mellem revnenummer og belastning fremgår af tabel VI og VII i afsnit 2.4. På fig. 2.9a-n er angivet revnebilledet umiddelbart efter brud for samtlige bjælker, set fra S-siden.

På fig. 1.10 i afsnit 1.3.7 er der foretaget en optegning af revneudviklingen ved en række lasttrin for bjælke T23 set fra N-siden. I tabel VIII er angivet de maksimale revnevidder for bjælkerne i serie I ved nogle enkelte lasttrin.

2.4 Tabel II - VIII. Fig. 2.9

Tabel IIa. T21. Tøjninger langs midten af trykflangens overside.
(Strain along compression flange, Strain gauges).

x \ P	1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7	13.0
0	-87	-175	-274	-376	-480	-585	-701	-819	-947	-1079
-225	-87	-182	-289	-397	-507	-622	-753	-890	-1046	-1205
225	-85	-175	-275	-381	-487	-597	-720	-842	-978	-1113
-660	-64	-126	-216	-310	-364	-438	-507	-585	-651	-630
660	-66	-130	-213	-281	-377	-457	-532	-571	-603	-608
-870	-47	-94	-121	-147	-145	-246	-291	-274	-201	42
870	-9	-102	-123	-168	-242	-317	-331	-329	-305	-251
-1080	-28	-61	-85	-78	-88	-23	12	54	125	468
1080	-28	-55	-80	-87	-54	-29	12	68	161	398
-1290	-12	-23	-35	-36	-24	31	55	83	123	185
1290	-10	-21	-31	-9	10	28	52	76	104	149
-1500	2	5	9	12	23	47	68	99	137	158
1500	5	9	12	16	29	48	71	97	135	199

Tabel IIb. T22. Tøjninger langs midten af trykflangens overside.
(Strain along compression flange, Strain gauges).

x \ P	0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2
0	-3	-61	-149	-234	-326	-414	-507	-603	-698	-802	-907	-1013
-225	-2	-54	-132	-206	-287	-365	-448	-537	-629	-732	-845	-965
225	-2	-59	-142	-218	-303	-395	-488	-589	-687	-800	-914	-1034
-625	-2	-43	-106	-166	-237	-310	-390	-469	-544	-627	-687	-1441
625	-2	-45	-109	-173	-260	-350	-438	-500	-573	-625	-634	-634
-800	-2	-35	-83	-130	-180	-251	-305	-357	-407	-440	-407	-327
800	0	-50	-123	-173	-206	-253	-291	-384	-423	-454	-474	
-975	-2	-29	-68	-107	-125	-178	-218	-206	-242	52	-194	-64
975	-3	-29	-68	-102	-87	-87	-194	-178	-175	-152	213	36
-1150	0	-28	-50	-71	-55	-52	-29	12	100	320	1035	
1150	0	-17	-42	-64	-64	-66	-68	-19	10	68	156	222
-1325	0	-19	-35	-35	-5	12	33	69	90	118	215	
1325	0	-24	-40	-43	-21	-3	40	59	78	99	133	
-1500	2	-2	3	5	7	21	33	45	62	81	113	126
1500	0	5	3	7	12	21	38	61	81	104	121	149

Tabel IIc. T23. Tøjninger langs midten af trykflangens overside.
(Strain along compression flange, Strain gauges).

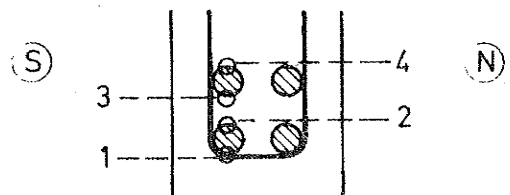
x \ P	0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2	14.2
0	-5	-59	-140	-222	-310	-398	-487	-574	-669	-765	-867	-977	-1103
-225	-3	-59	-140	-227	-315	-407	-499	-590	-694	-795	-908	-1040	-1167
225	-5	-59	-142	-223	-312	-403	-500	-598	-707	-821	-946	-1087	-1214
-600	-3	-50	-121	-173	-258	-369	-494	-605	-699	-836	-984	-1050	-1191
600	-3	-50	-113	-180	-275	-362	-452	-524	-617	-771	-810	-941	-1075
-750	-3	-40	-92	-139	-190	-199	-246	-302	-330	-303	-243	-96	-111
750	-3	-40	-97	-151	-204	-241	-272	-313	-371	-358	-326	-385	-464
-900	-3	-33	-76	-119	-133	-197	-227	-247	-335	-310	-240	-84	-17
900	-3	-33	-76	-113	-130	-218	-327	-366	-392	-348	-316	-276	-272
-1050	-2	-23	-54	-87	-118	-128	-137	-138	-86	-29	49	233	706
1050	-2	-23	-48	-73	-85	-85	-59	-29	10	99	224	927	1046
-1200	-2	-16	-36	-54	-61	-43	-23	-3	39	78	134	288	532
1200	-2	-14	-31	-48	-61	-12	2	22	42	76	119	226	232
-1350	-3	-9	-14	-17	-23	3	24	42	65	87	110	146	369
1350	-2	-9	-14	-21	-28	0	16	32	51	76	101	134	165
-1500	0	2	3	7	9	21	35	49	67	85	106	127	178
1500	-2	-2	2	3	3	14	26	42	63	88	119	103	109

P in Mp, exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m.
x in mm. Strain in 10^{-6} mm/mm.

Tabel IIIa. T21. Tøjninger i længdearmring. (Strain in longitudinal reinforcement).

x	P										
		1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7	13.0
0	1	220	438	685	928	1166	1395	1634	1874	2105	2098
	2	207	402	616	829	1039	1246	1468	1686	1923	2069
	3	184	358	553	746	936	1123	1324	1522	1724	2015
	4	132	283	544	612	771	989	1108	1284	1472	1709
-225	1	145	402	645	878	1118	1351	1598	1841	2090	2211
	2	151	396	633	846	1060	1269	1493	1713	1939	2189
	3	128	331	534	725	921	1108	1307	1504	1707	1927
	4	121	318	517	693	865	1033	1211	1389	1573	1778
225	1	186	379	630	875	1116	1349	1594	1837	2084	2149
	2	153	329	582	808	1024	1234	1455	1675	1904	2193
	3	151	316	534	731	928	1120	1321	1520	1722	1956
	4	147	299	511	700	875	1047	1229	1403	1583	1797
-450	1	211	400	632	867	1118	1365	1619	1876	2142	2390
	2	188	366	565	754	942	1125	1321	1514	1719	1966
	3	170	331	530	725	924	1118	1321	1523	1736	1958
	4	176	339	515	676	825	972	1125	1273	1420	1575
450	1	203	400	622	856	1089	1317	1562	1807	2059	2216
	2	199	392	588	794	989	1185	1393	1606	1826	2069
	3	178	343	538	735	932	1118	1315	1510	1703	1918
	4	182	348	526	687	834	976	1125	1275	1432	1611
-660	1	149	354	576	766	953	1114	1263	1418	1590	1887
	2	117	285	467	635	821	1030	1261	1481	1703	1906
	3	117	276	454	595	737	867	989	1093	1187	1278
	4	167	364	618	909	1185	1460	1745	2036	2299	2815
660	1	167	364	618	909	1185	1460	1745	2036	2299	2815
	2	136	304	498	685	865	1039	1231	1416	1621	1891
	3	121	270	473	710	928	1148	1353	1566	1782	2011
	4	109	251	425	584	702	794	894	997	1100	1221
-870	1	103	222	400	628	854	1108	1393	1675	2025	2603
	2	103	228	440	622	746	867	978	1081	1175	1403
	3	80	189	358	513	656	790	961	1145	1345	1715
	4	78	182	369	521	687	823	930	1011	1058	804
870	1	92	239	492	731	951	1162	1449	1669	1889	2101
	2	80	199	373	534	731	940	1116	1296	1489	1677
	3	67	163	360	547	785	961	1148	1317	1464	1604
	4	63	165	360	431	509	681	880	1055	1231	1374
-1080	1	34	134	283	482	744	978	1196	1433	1753	2008
	2	38	132	289	492	549	662	762	823	850	911
	3	33	94	214	415	586	660	766	877	1039	1280
	4	29	77	189	423	544	653	766	886	974	1141
1080	1	65	122	232	356	630	811	1062	1347	1734	2180
	2	54	107	216	425	576	708	794	852	834	798
	3	42	88	178	327	488	632	790	965	1240	1466
	4	36	78	199	387	519	676	926	984	951	907
-1290	1	19	38	67	188	387	700	930	1158	1414	1675
	2	21	34	78	235	329	400	427	427	425	362
	3	15	31	52	138	300	528	658	767	905	1129
	4	10	21	38	144	293	465	572	679	758	940
1290	1	19	48	100	268	442	632	884	1099	1330	1541
	2	15	38	82	291	371	402	406	389	383	423
	3	13	29	56	189	274	354	515	679	878	1072
	4	13	34	71	343	545	637	689	723	792	984
-1500	1	-2	-8	-15	-15	-4	40	71	111	144	144
	2	11	21	29	52	98	279	410	568	785	1053
	3	4	8	13	19	36	149	233	331	477	660
	4	10	19	29	40	65	218	341	480	697	1033
1500	1	-6	-10	-15	-11	4	44	94	130	163	184
	2	4	13	25	48	105	226	398	601	798	989
	3	0	6	10	34	61	98	161	245	346	467
	4	11	21	33	52	98	218	344	534	744	984

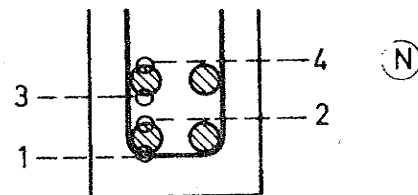
P in Mp,
exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m.
x in mm. Strain in 10^{-6} mm/mm.



Tabel IIIb. T22. Tøjninger i længdearmring. (Strain in longitudinal reinforcement).

x	P												
		0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2
n	1	6	132	356	568	781	988	1194	1401	1604	1814	2023	2262
	2	4	113	333	524	718	905	1097	1288	1478	1669	1866	2065
	3	6	96	289	465	651	823	999	1175	1347	1523	1703	1885
	4	6	94	318	482	647	802	963	1122	1278	1439	1602	1768
-225	1	8	84	314	521	741	955	1160	1367	1566	1776	1987	2147
	2	6	96	331	528	725	917	1104	1292	1481	1675	1874	2094
	3	6	82	270	452	635	817	997	1173	1347	1525	1707	1885
	4	4	78	270	431	595	743	901	1062	1219	1384	1548	1713
225	1	8	132	350	553	764	965	1164	1370	1569	1774	1979	2144
	2	10	128	329	517	716	915	1110	1303	1495	1690	1891	2098
	3	8	103	274	442	624	811	988	1164	1338	1514	1694	1874
	4	6	105	293	446	614	790	957	1122	1282	1445	1610	1774
-450	1	8	124	358	563	769	967	1162	1363	1564	1768	1981	2167
	2	15	111	331	517	712	901	1093	1282	1474	1658	1852	2052
	3	6	86	272	444	624	798	974	1150	1322	1497	1671	1837
	4	6	71	272	434	607	773	932	1091	1242	1397	1550	1690
450	1	6	117	323	538	750	953	1160	1367	1571	1789	2006	2168
	2	6	107	312	498	685	869	1058	1242	1424	1611	1801	2008
	3	4	88	287	467	643	813	986	1154	1330	1510	1690	1864
	4	4	71	279	448	595	743	892	1037	1187	1338	1487	1631
-625	1	4	77	270	480	695	894	1095	1298	1499	1707	1929	2121
	2	4	73	258	456	641	810	972	1129	1286	1445	1629	1822
	3	2	63	228	419	616	810	997	1185	1365	1543	1698	1830
	4	4	57	211	389	568	727	875	1018	1150	1277	1382	1462
625	1	6	82	287	492	718	926	1143	1393	1613	1835	2054	2239
	2	6	77	264	459	656	836	1007	1164	1322	1497	1680	1893
	3	4	65	224	396	570	739	917	1127	1300	1460	1613	1761
	4	2	54	189	369	557	733	867	984	1112	1238	1363	1489
-800	1	2	52	149	366	582	777	974	1167	1368	1579	1920	2287
	2	2	54	193	394	557	699	838	980	1118	1261	1372	1502
	3	4	48	138	316	496	658	831	1007	1185	1357	1619	1860
	4	4	40	115	291	498	635	758	857	957	1051	1049	863
800	1	4	56	212	427	643	856	1064	1269	1497	1744	2010	2293
	2	2	59	199	396	567	695	829	986	1133	1296	1466	1671
	3	2	50	163	350	528	720	915	1089	1275	1453	1623	1795
	4	2	48	138	335	469	580	674	789	886	972	1016	1049
-975	1	2	40	122	251	454	630	813	980	1137	1083	1426	1552
	2	-2	34	109	237	385	513	660	811	968	2568	1376	1634
	3	-4	29	92	201	358	473	595	716	827	965	1085	1187
	4	2	31	88	201	371	473	563	660	769	942	1148	1458
975	1	0	17	113	268	905	1167		1041		1474	1763	2676
	2	0	34	107	253	601	452	718	792	921	1014	258	1870
	3	0	29	100	228	373	498	744	857	1039	1223	475	1577
	4	-2	29	82	209	446	567	670	731	844	940	976	875
-1150	1	0	25	67	155	285	434	565	731	907	1154	1851	2289
	2	0	15	54	157	852	513	1376	683	1233	1328	1187	984
	3	0	13	52	124		344	161	568	180	649	844	281
	4	0	2	36	124		394	482	664	754	764	672	557
1150	1	0	15	92	195	664	528	890	896	1122	1215	1284	1409
	2	0	23	80	178	320	423	494	597	697	825	1028	1321
	3	2	21	73	155	310	456	628	769	907	1066	1150	1125
	4	0	17	63	167	300	362	398	421	448	567	957	1487
-1325	1	0	0	17	52	157	331	214	651	808	949	1100	926
	2	8	13	31	52	159	274	270	333	369	425	563	1066
	3	0	8	25	46	122	295	423	559	700	852	972	417
	4	0	10	25	44	151	329	369	362	352	343	584	1724
1325	1	0	11	29	71	167	343	498	649	787	949	1135	1257
	2	2	11	23	50	134	249	310	371	417	448	473	595
	3	0	0	618	46	101	235	645	519	744	773	892	1079
	4	0	0		29	98	272	362	473	555	649	725	917
-1500	1	-2	-4	-6	-8	-10	15	52	84	109	121	119	77
	2	-2	4	10	19	33	80	170	285	419	589	819	1420
	3	-2	2	6	10	15	36	57	86	136	207	323	611
	4	0	6	15	23	33	56	90	144	235	367	597	1173
1500	1	-4	-2	-4	-4	2	21	59	117	161	201	237	268
	2	-4	2	6	11	25	57	126	253	369	530	687	856
	3	-2	2	6	11	21	34	59	134	209	302	404	532
	4	-2	4	10	15	25	33	65	170	281	423	584	810

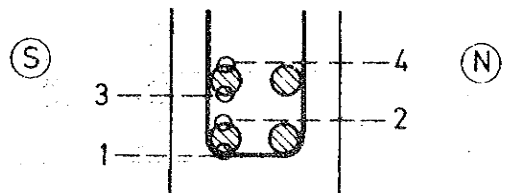
P in Mp,
 exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m. (S)
 x in mm. Strain in 10^{-6} mm/mm.



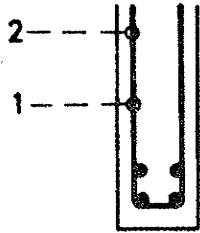
Tabel IIIc. T23. Tøjninger i længdearmring. (Strain in longitudinal reinforcement).

x	P													
		0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2	14.2
0	1	6	126	352	576	770	1009	1225	1422	1636	1841	2050	2205	2071
	2	8	113	312	505	697	890	1079	1254	1445	1629	1816	2069	2092
	3	6	92	278	457	633	810	984	1146	1326	1495	1667	1862	2260
	4	21	80	293	467	630	785	938	1078	1234	1382	1531	1853	2046
-225	1	8	107	341	547	760	974	1185	1380	1590	1791	1990	2165	2044
	2	6	94	297	500	697	896	1089	1267	1462	1650	1837	2063	2126
	3	6	71	272	456	633	811	988	1150	1326	1491	1659	1847	2167
	4	6	71	276	438	591	744	894	1032	1183	1326	1474	1640	1897
225	1	6	105	320	538	743	949	1156	1359	1585	1793	2002	2205	2117
	2	11	109	299	492	685	878	1070	1252	1455	1642	1833	2046	2130
	3	4	84	279	467	643	819	997	1164	1347	1518	1686	1872	2097
	4	6	77	233	389	544	702	859	1011	1187	1351	1514	1694	1916
-450	1	-6	124	325	542	731	921	1112	1292	1495	1694	1899	2111	2117
	2	4	105	295	484	670	857	1045	1217	1407	1587	1784	1989	2061
	3	4	88	266	440	612	781	951	1108	1273	1432	1590	1759	1962
	4	4	73	243	379	519	666	817	955	1108	1252	1416	1585	1799
450	1	8	147	356	565	767	974	1175	1363	1573	1774	1979	2199	2396
	2	6	111	306	494	689	877	1060	1234	1426	1610	1799	2000	2040
	3	6	101	279	457	637	808	980	1139	1317	1483	1648	1826	2006
	4	6	84	260	438	624	789	951	1099	1259	1409	1556	1717	1945
-600	1	6	73	295	494	704	919	1129	1332	1566	1780	2008	2245	2371
	2	4	61	256	457	639	810	972	1120	1284	1435	1594	1786	2033
	3	4	59	243	436	611	789	963	1131	1319	1497	1671	1845	2042
	4													
600	1	8	69	266	484	689	888	1091	1286	1500	1717	1943	2147	2056
	2	10	78	264	480	681	880	1066	1238	1426	1608	1791	2010	2113
	3	4	65	230	417	588	756	919	1076	1250	1409	1548	1709	1893
	4	6	61	226	396	568	750	903	1043	1194	1326	1439	1579	1761
-750	1	2	40	232	434	651	838	1007	1158	1382	1571	1767	2008	2149
	2	4	52	209	394	576	741	915	1093	1294	1468	1640	1826	1948
	3	4	48	189	362	526	679	825	947	1100	1246	1382	1506	1627
	4	6	46	180	350	477	595	733	896	1023	1186	1327	1463	1726
750	1	8	52	228	410	630	821	1035	1248	1483	1757	2078	2291	2205
	2	6	56	205	390	599	766	934	1074	1213	1370	1537	1770	1967
	3	4	48	188	337	500	649	829	1005	1200	1376	1554	1728	1948
	4	6	50	172	348	515	649	825	959	1078	1146	1152	1215	1313
-900	1	38	100	211	358	578	815	1018	1202	1424	1665	1929	2498	2924
	2	6	56	157	291	496	614	735	840	947	1055	1160	1215	1382
	3	4	44	140	260	463	632	794	945	1146	1322	1497	1908	2170
	4	4	42	132	243	452	574	670	741	777	798	787	524	406
900	1	4	42	159	335	547	741	944	1139	1349	1598	1765	2017	2126
	2	4	40	149	318	488	614	729	844	974	1131	1347	1518	1633
	3	6	38	134	276	480	639	806	965	1123	1282	1365	1493	1610
	4	0	29	121	291	461	567	653	720	787	865	1106	1145	1164
-1050	1	4	27	98	193	362	555	764	947	1152	1432	1736	1872	2084
	2	2	25	103	211	396	549	656	723	829	917	1017	1121	1223
	3	4	27	94	189	339	482	643	798	945	1196	1447	1531	1719
	4	2	21	78	168	329	465	620	727	792	748	691	953	928
1050	1	4	31	86	172	392	595	739	888	1074	1370	1659	2013	2239
	2	4	29	84	178	381	544	670	789	894	949	1024	1053	986
	3	4	29	78	163	377	524	630	739	894	1156	1326	1567	1826
	4	4	29	71	161	373	475	570	666	762	756	796	794	744
-1200	1	4	23	63	144	256	457	591	706	861	926	940	1087	1171
	2	2	19	59	144	272	408	509	609	723	921	1177	1365	1433
	3	2	17	52	121	239	390	496	605	735	842	852	1035	1202
	4	2	13	42	103	233	360	408	450	509	722	1122	1441	1569
1200	1	4	21	46	82	218	501	649	794	938	1024	1137	1332	1523
	2	6	21	46	90	228	415	503	588	702	938	1087	1150	1056
	3	4	19	42	78	153	379	494	622	760	936	1085	1282	1564
	4	6	17	38	71	170	270	302	346	436	697	932	1099	1087
-1350	1	0	8	21	31	124	297	467	599	756	945	1148	1367	1284
	2	0	8	19	29	109	310	337	352	371	377	373	411	767
	3	0	4	15	23	84	216	344	427	515	614	773	988	970
	4	2	6	13	17	78	333	452	534	641	712	769	953	1537
1350	1	0	11	27	38	65	186	268	348	463	597	737	892	641
	2													
	3	2	10	19	36	59	186	278	358	448	576	729	854	674
	4													
-1500	1	6	-6	-11	-29	-34	-27	4	34	61	61	36	-57	-82
	2	4	4	11	11	27	61	168	308	494	679	898	1192	1460
	3	8	6	10	10	21	48	92	144	230	299	373	480	628
	4	10	6	11	15	29	54	115	197	364	526	723	1064	1424
1500	1	4	-6	-10	-23	-21	-6	23	63	109	136	144	103	144
	2	6	4	10	6	13	42	109	237	402	586	769	1053	1280
	3	6	2	8	2	11	36	71	115	180	253	335	446	559
	4	4	6	13	11	23	52	121	235	390	580	798	1150	1464

P in Mp,
exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m.
x in mm. Strain in 10^{-6} mm/mm.



Tabel IVa. T21. Tøjninger i bøjler. (Strain in stirrups).



P		1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7	13.0
x											
-550	1	-2	2	19	48	96	182	344	500	695	871
	2	-2	36	163	253	369	538	775	961	1185	1361
550	1	-6	17	67	90	128	220	371	521	685	844
	2	-6	-15	19	101	211	331	505	689	880	1055
-765	1	-4	4	115	318	599	878	1208	1569	1885	1952
	2	6	21	270	526	829	1100	1411	1856	3514	
765	1	-13	-27	17	100	299	679	1064	1359	1724	1899
	2	4	19	61	140	293	492	863	1167	1638	1768
-975	1	11	0	98	505	850	1041	1309	1860	5332	
	2	10	-6	33	383	706	951	1211	1633	2010	2078
975	1	-2	-6	52	233	421	687	1581	2077	2021	2021
	2	2	-2	21	191	344	584	1148	1552	1864	1952
-1185	1	-4	-10	2	163	459	1137	1441	1763	2295	
	2	0	2	13	88	333	1007	1338	1688	1983	2042
1185	1	-4	-6	11	306	664	997	1261	1656	2544	3770
	2	0	0	11	262	679	1047	1338	1698	2057	2249
-1395	1	-6	-11	-13	-2	31	241	352	480	662	878
	2	-10	-15	-15	-10	10	237	379	536	720	926
1395	1	-2	-8	-15	-2	59	163	289	417	557	681
	2	-2	-8	-11	-4	2	46	178	346	530	718

Tabel IVb. T22. Tøjninger i bøjler. (Strain in stirrups).

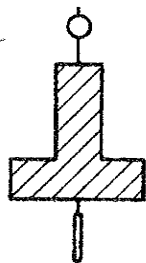
P		0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2
x													
-538	1	0	-6	-8	21	72	154	238	314	408	1983		
	2	0	-4	-13	57	196	337	467	583	686	781	874	1006
538	1	0	-4	10	32	46	59	82	107	139	185	240	299
	2	0	-2	-17	2	65	149	227	295	371	446	518	581
-713	1	0	2	38	110	166	246	337	438	564	695	802	983
	2	0	-2	-10	-6	154	339	568	779	1055	1634	5263	
713	1	-2	-4	-8	19	46	97	232	478	648	764	926	1198
	2	0	0	11	74	141	244	451	716	1640	2579	3465	4288
-888	1	0	-2	2	51	118	196	293	389	524	630	1118	1922
	2	0	6	6	13	158	432	657	916	1198	1484	2305	
888	1	-2	-2	2	55	143	272	444	672	1027	1575	2842	4636
	2	-2	0	-10	0	187	341	526	792	1320	1960	2507	4690
-1063	1	0	-4	-11	36	234	467	730	1518	3310			
	2	0	-2	-6	10	61	158	444	653	733	1072	2672	
1063	1	-2	-2	0	30	202	570	964	1615	2181	2682	3234	3842
	2	0	-4	-4	-2	29	278	598	836	1194	1834	3423	
-1238	1	0	6	6	6	181	379	1103	1314	1697	2099	2674	
	2	-2	-2	-4	32	76	335	739	1994	2248	4189	5312	
1238	1	0	0	2	23	30	128	549			808	931	1488
	2	-4	-6	-13	-17	-17	19	59	107	175	272	432	1078
-1413	1	-4	-6	-8	-8	-10	-4	-2	10	32	82	225	659
	2	-2	-10	-19	-27	-21	34	131	387	575	810	1038	1270
1413	1	-2	-8	-13	-23	-21	-21	-25	-4	17	55	114	200
	2	-2	-8	-13	-23	-21	-21	-25	-4	17	55	114	200

Tabel IVc. T23. Tøjninger i bøjler. (Strain in stirrups).

P		0.2	1.2	2.4	3.6	4.8	6.0	7.2	8.4	9.6	10.8	12.0	13.2	14.2
x														
-525	1	-2	-12	-2	8	42	98	171	254	408	525	633	746	792
	2	0	-8	-12	31	142	254	367	481	679	810	925	1044	1098
525	1	-2	-8	-25	-12	17	54	100	146	208	262	312	367	442
	2	-4	-12	-25	8	73	163	254	335	435	519	587	667	773
-675	1	0	-2	10	31	83	127	225	348	748	958	1212	1717	2196
	2	0	-6	-4	40	169	213	275	354	531	733	1171	2750	5396
675	1	0	2	2	29	115	187	377	552	760	1088	1527	3127	4685
	2	4	2	29	117	223	288	410	594	815	1223	2604	3556	4304
-825	1	2	-4	-6	-2	106	350	558	813	1163	1875	5290		
	2	0	-2	10	96	512	779	977	1188	1523				
825	1	2	-4	-2	19	165	385	812	1256	1648	3088	5392		
	2	2	-2	4	33	152	327	715	1075	1338	2138	3658		
-975	1	2	-2	-6	23	167	344	456	667	1033	2215	3379	5198	
	2	0	-2	-2	8	131	342	406	592	927	1688	2340	3806	
-1125	1	2	-2	2	19	152	525	885	1242	1998	2681	4208		
	2	2	0	2	27	137	502	821	1112	1587	2058	3629		
1125	1	2	-2	-2	8	77	306	548	844	1069	1569	2612	5248	
	2	2	-2	-2	4	13	806	1281	1921	3200	4721			
-1275	1	0	-6	-12	-15	38	429	921	1333	2225	3413	4710		
	2	2	-4	-10	-13	-4	185	565	887	1363	1596	1819	2317	
1275	1	6	-2	-4	13	31	546	946	1387	2075	4052			
	2	0	-4	-4	2	181	394	679	1012	1158	1250	1415	2179	
-1425	1	4	-12	-23	-46	-58	-54	-6	69	196	323	502	792	1013
	2	2	-10	-17	-37	-44	-44	-48	-40	31	119	256	481	640
1425	1	0	-4	-6	-15	-13	13	81	185	319	498	700	1040	1188
	2	2	-2	-2	-10	-6	8	12	35	100	212	356	617	769

P In Mp, exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m.
 x in mm. Strain in μ -6 mm/mm.

Tabel Va. T21. Nedbøjning af træk- og trykside.
(Deflection of tension and compression flange).



P In Mp.
x In mm.
Deflec. in mm.

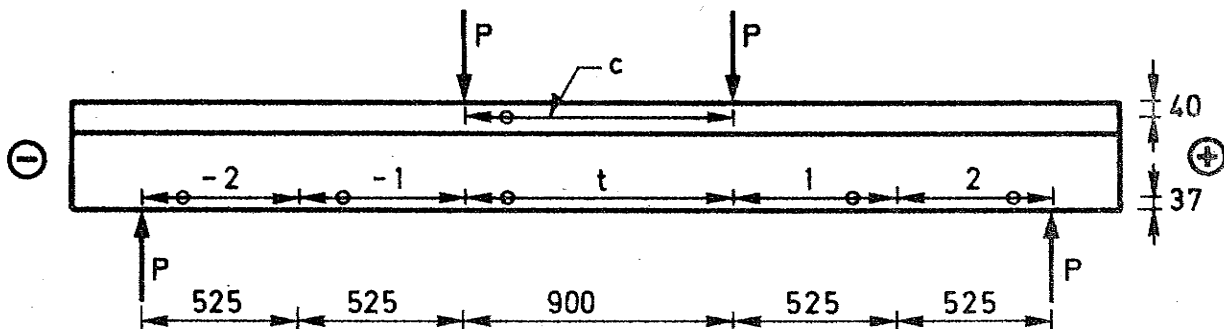
		P																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		x		1.3	2.6	3.9	5.2	6.5	7.8	9.1	10.4	11.7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
tension	1395	0.0	0.2	0.4	0.7	1.0	1.3	1.6	1.9	2.3	2.7	3.0	3.4	3.8	4.3	4.8	5.2	5.7	6.1	6.6	7.0	7.5	8.0	8.5	9.0	9.5	10.0	10.6	11.1	11.7	12.3	12.9	13.4	14.0	14.6	15.2	15.8	16.4	17.0	17.6	18.2	18.8	19.4	20.0	20.6	21.2	21.8	22.4	23.0	23.6	24.2	24.8	25.4	26.0	26.6	27.2	27.8	28.4	29.0	29.6	30.2	30.8	31.4	32.0	32.6	33.2	33.8	34.4	35.0	35.6	36.2	36.8	37.4	38.0	38.6	39.2	39.8	40.4	41.0	41.6	42.2	42.8	43.4	44.0	44.6	45.2	45.8	46.4	47.0	47.6	48.2	48.8	49.4	50.0	50.6	51.2	51.8	52.4	53.0	53.6	54.2	54.8	55.4	56.0	56.6	57.2	57.8	58.4	59.0	59.6	60.2	60.8	61.4	62.0	62.6	63.2	63.8	64.4	65.0	65.6	66.2	66.8	67.4	68.0	68.6	69.2	69.8	70.4	71.0	71.6	72.2	72.8	73.4	74.0	74.6	75.2	75.8	76.4	77.0	77.6	78.2	78.8	79.4	80.0	80.6	81.2	81.8	82.4	83.0	83.6	84.2	84.8	85.4	86.0	86.6	87.2	87.8	88.4	89.0	89.6	90.2	90.8	91.4	92.0	92.6	93.2	93.8	94.4	95.0	95.6	96.2	96.8	97.4	98.0	98.6	99.2	99.8	100.4	101.0	101.6	102.2	102.8	103.4	104.0	104.6	105.2	105.8	106.4	107.0	107.6	108.2	108.8	109.4	110.0	110.6	111.2	111.8	112.4	113.0	113.6	114.2	114.8	115.4	116.0	116.6	117.2	117.8	118.4	119.0	119.6	120.2	120.8	121.4	122.0	122.6	123.2	123.8	124.4	125.0	125.6	126.2	126.8	127.4	128.0	128.6	129.2	129.8	130.4	131.0	131.6	132.2	132.8	133.4	134.0	134.6	135.2	135.8	136.4	137.0	137.6	138.2	138.8	139.4	140.0	140.6	141.2	141.8	142.4	143.0	143.6	144.2	144.8	145.4	146.0	146.6	147.2	147.8	148.4	149.0	149.6	150.2	150.8	151.4	152.0	152.6	153.2	153.8	154.4	155.0	155.6	156.2	156.8	157.4	158.0	158.6	159.2	159.8	160.4	161.0	161.6	162.2	162.8	163.4	164.0	164.6	165.2	165.8	166.4	167.0	167.6	168.2	168.8	169.4	170.0	170.6	171.2	171.8	172.4	173.0	173.6	174.2	174.8	175.4	176.0	176.6	177.2	177.8	178.4	179.0	179.6	180.2	180.8	181.4	182.0	182.6	183.2	183.8	184.4	185.0	185.6	186.2	186.8	187.4	188.0	188.6	189.2	189.8	190.4	191.0	191.6	192.2	192.8	193.4	194.0	194.6	195.2	195.8	196.4	197.0	197.6	198.2	198.8	199.4	200.0	200.6	201.2	201.8	202.4	203.0	203.6	204.2	204.8	205.4	206.0	206.6	207.2	207.8	208.4	209.0	209.6	210.2	210.8	211.4	212.0	212.6	213.2	213.8	214.4	215.0	215.6	216.2	216.8	217.4	218.0	218.6	219.2	219.8	220.4	221.0	221.6	222.2	222.8	223.4	224.0	224.6	225.2	225.8	226.4	227.0	227.6	228.2	228.8	229.4	230.0	230.6	231.2	231.8	232.4	233.0	233.6	234.2	234.8	235.4	236.0	236.6	237.2	237.8	238.4	239.0	239.6	240.2	240.8	241.4	242.0	242.6	243.2	243.8	244.4	245.0	245.6	246.2	246.8	247.4	248.0	248.6	249.2	249.8	250.4	251.0	251.6	252.2	252.8	253.4	254.0	254.6	255.2	255.8	256.4	257.0	257.6	258.2	258.8	259.4	260.0	260.6	261.2	261.8	262.4	263.0	263.6	264.2	264.8	265.4	266.0	266.6	267.2	267.8	268.4	269.0	269.6	270.2	270.8	271.4	272.0	272.6	273.2	273.8	274.4	275.0	275.6	276.2	276.8	277.4	278.0	278.6	279.2	279.8	280.4	281.0	281.6	282.2	282.8	283.4	284.0	284.6	285.2	285.8	286.4	287.0	287.6	288.2	288.8	289.4	290.0	290.6	291.2	291.8	292.4	293.0	293.6	294.2	294.8	295.4	296.0	296.6	297.2	297.8	298.4	299.0	299.6	300.2	300.8	301.4	302.0	302.6	303.2	303.8	304.4	305.0	305.6	306.2	306.8	307.4	308.0	308.6	309.2	309.8	310.4	311.0	311.6	312.2	312.8	313.4	314.0	314.6	315.2	315.8	316.4	317.0	317.6	318.2	318.8	319.4	320.0	320.6	321.2	321.8	322.4	323.0	323.6	324.2	324.8	325.4	326.0	326.6	327.2	327.8	328.4	329.0	329.6	330.2	330.8	331.4	332.0	332.6	333.2	333.8	334.4	335.0	335.6	336.2	336.8	337.4	338.0	338.6	339.2	339.8	340.4	341.0	341.6	342.2	342.8	343.4	344.0	344.6	345.2	345.8	346.4	347.0	347.6	348.2	348.8	349.4	350.0	350.6	351.2	351.8	352.4	353.0	353.6	354.2	354.8	355.4	356.0	356.6	357.2	357.8	358.4	359.0	359.6	360.2	360.8	361.4	362.0	362.6	363.2	363.8	364.4	365.0	365.6	366.2	366.8	367.4	368.0	368.6	369.2	369.8	370.4	371.0	371.6	372.2	372.8	373.4	374.0	374.6	375.2	375.8	376.4	377.0	377.6	378.2	378.8	379.4	380.0	380.6	381.2	381.8	382.4	383.0	383.6	384.2	384.8	385.4	386.0	386.6	387.2	387.8	388.4	389.0	389.6	390.2	390.8	391.4	392.0	392.6	393.2	393.8	394.4	395.0	395.6	396.2	396.8	397.4	398.0	398.6	399.2	399.8	400.4	401.0	401.6	402.2	402.8	403.4	404.0	404.6	405.2	405.8	406.4	407.0	407.6	408.2	408.8	409.4	410.0	410.6	411.2	411.8	412.4	413.0	413.6	414.2	414.8	415.4	416.0	416.6	417.2	417.8	418.4	419.0	419.6	420.2	420.8	421.4	422.0	422.6	423.2	423.8	424.4	425.0	425.6	426.2	426.8	427.4	428.0	428.6	429.2	429.8	430.4	431.0	431.6	432.2	432.8	433.4	434.0	434.6	435.2	435.8	436.4	437.0	437.6	438.2	438.8	439.4	440.0	440.6	441.2	441.8	442.4	443.0	443.6	444.2	444.8	445.4	446.0	446.6	447.2	447.8	448.4	449.0	449.6	450.2	450.8	451.4	452.0	452.6	453.2	453.8	454.4	455.0	455.6	456.2	456.8	457.4	458.0	458.6	459.2	459.8	460.4	461.0	461.6	462.2	462.8	463.4	464.0	464.6	465.2	465.8	466.4	467.0	467.6	468.2	468.8	469.4	470.0	470.6	471.2	471.8	472.4	473.0	473.6	474.2	474.8	475.4	476.0	476.6	477.2	477.8	478.4	479.0	479.6	480.2	480.8	481.4	482.0	482.6	483.2	483.8	484.4	485.0	485.6	486.2	486.8	487.4	488.0	488.6	489.2	489.8	490.4	491.0	491.6	492.2	492.8	493.4	494.0	494.6	495.2	495.8	496.4	497.0	497.6	498.2	498.8	499.4	500.0	500.6	501.2	501.8	502.4	503.0	503.6	504.2	504.8	505.4	506.0	506.6	507.2	507.8	508.4	509.0	509.6	510.2	510.8	511.4	512.0	512.6	513.2	513.8	514.4	515.0	515.6	516.2	516.8	517.4	518.0	518.6	519.2	519.8	520.4	521.0	521.6	522.2	522.8	523.4	524.0	524.6	525.2	525.8	526.4	527.0	527.6	528.2	528.8	529.4	530.0	530.6	531.2	531.8	532.4	533.0	533.6	534.2	534.8	535.4	536.0	536.6	537.2	537.8	538.4	539.0	539.6	540.2	540.8	541.4	542.0	542.6	543.2	543.8	544.4	545.0	545.6	546.2	546.8	547.4	548.0	548.6	549.2	549.8	550.4	551.0	551.6	552.2	552.8	553.4	554.0	554.6	555.2	555.8	556.4	557.0	557.6	558.2	558.8	559.4	560.0	560.6	561.2	561.8	562.4	563.0	563.6	564.2	564.8	565.4	566.0	566.6	567.2	567.8	568.4	569.0	569.6	570.2	570.8	571.4	572.0	572.6	573.2	573.8	574.4	575.0	575.6	576.2	576.8	577.4	578.0	578.6	579.2	579.8	580.4	581.0	581.6	582.2	582.8	583.4	584.0	584.6	585.2	585.8	586.4	587.0	587.6	588.2	588.8	589.4	590.0	590.6	591.2	591.8	592.4	593.0	593.6	594.2	594.8	595.4	596.0	596.6	597.2	597.8	598.4	599.0	599.6	600.2	600.8	601.4	602.0	602.6	603.2	603.8	604.4	605.0	605.6	606.2	606.8	607.4	608.0	608.6	609.2	609.8	610.4	611.0	611.6	612.2	612.8	613.4	614.0	614.6	615.2	615.8	616.4	617.0	617.6	618.2	618.8	619.4	620.0	620.6	621.2	621.8	622.4	623.0	623.6	624.2	624.8	625.4	626.0	626.6	627.2	627.8	628.4	629.0	629.6	630.2	630.8	631.4	632.0	632.6	633.2	633.8	634.4	635.0	635.6	636.2	636.8	637.4	638.0	638.6	639.2	639.8	640.4	641.0	641.6	642.2	642.8	643.4	644.0	644.6	645.2	645.8	646.4	647.0	647.6	648.2	648.8	649.4	650.0	650.6	651.2	651.8	652.4	653.0	653.6	654.2	654.8	655.4	656.0	656.6	657.2	657.8

Tabel VI. Serie I. Tøjningsmålinger med spærmål. Revnenumre. (Strain along longitudinal reinforcement and compression flange, dial gauges. Numbers of cracks).

T21 P: exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m							
No.	P (Mp)	-2 o/oo	-1 o/oo	t o/oo	+1 o/oo	+2 o/oo	c o/oo
1	0.2	0.13	0.10	0.04	-0.04	-0.05	0.02
2	1.2	0.07	0.17	0.08	0.07	-0.12	-0.02
3	2.4	0.11	0.33	0.33	0.23	-0.15	-0.07
4	3.6	0.13	0.53	0.49	0.43	0.03	-0.12
5	4.8	0.28	0.79	0.66	0.59	0.03	-0.17
6	6.0	0.28	0.95	0.89	0.83	0.22	-0.19
7	7.2	0.42	1.14	1.12	0.93	0.29	-0.26
8	8.4	0.51	1.28	1.32	1.06	0.36	-0.36
9	9.6	0.72	1.55	1.46	1.31	0.59	-0.46
10	10.8	0.80	1.75	1.65	1.52	0.68	-0.52
11	12.0	0.98	1.98	1.84	1.78	0.89	-0.68

T22 P: exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m							
No.	P (Mp)	-2 o/oo	-1 o/oo	t o/oo	+1 o/oo	+2 o/oo	c o/oo
1	1.3	0.03	0.14	0.14	0.13	0.01	-0.05
2	2.6	0.12	0.30	0.28	0.30	0.04	-0.09
3	3.9	0.14	0.53	0.55	0.53	0.10	-0.15
4	5.2	0.29	0.74	0.76	0.76	0.23	-0.20
5	6.5	0.41	0.99	0.96	0.93	0.36	-0.27
6	7.8	0.55	1.23	1.18	1.18	0.56	-0.33
7	9.1	0.72	1.44	1.40	1.40	0.69	-0.40
8	10.4	0.85	1.72	1.62	1.59	0.85	-0.47
9	11.7	1.05	1.87	1.85	1.79	1.04	-0.55

T23 P: exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m + 0.2 Mp							
No.	P (Mp)	-2 o/oo	-1 o/oo	t o/oo	+1 o/oo	+2 o/oo	c o/oo
2	1.2	0.00	0.05	0.09	0.08	0.08	-0.08
3	2.4	-0.02	0.21	0.26	0.22	0.10	-0.13
4	3.6	0.03	0.33	0.46	0.44	0.12	-0.17
5	4.8	0.09	0.58	0.68	0.64	0.21	-0.21
6	6.0	0.21	0.68	0.90	0.80	0.31	-0.24
7	7.2	0.31	0.93	1.06	0.96	0.42	-0.37
8	8.4	0.41	1.07	1.23	1.19	0.63	-0.35
9	9.6	0.56	1.29	1.38	1.42	0.80	-0.43
10	10.8	0.74	1.51	1.62	1.62	0.94	-0.53
11	12.0	0.94	1.55	1.79	1.77	1.14	-0.55
12	13.2	1.17	1.84	2.04	2.08	1.29	-0.59



mål i mm

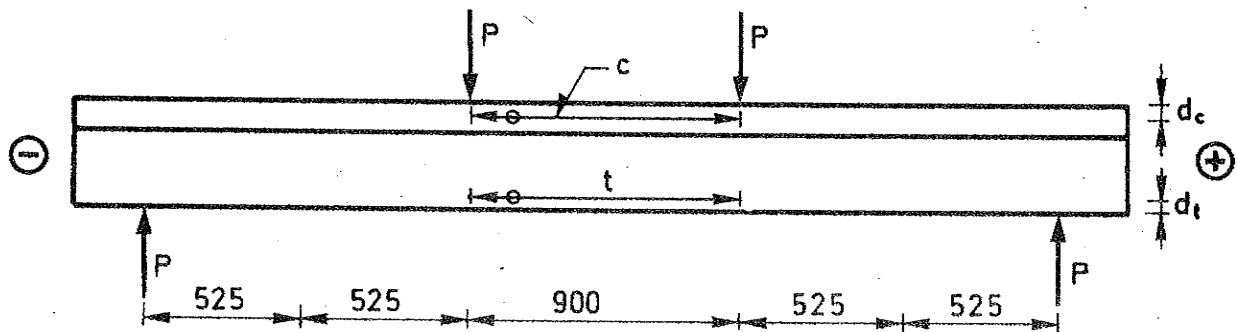
Tabel VII. Serie II. Tøjningsmålinger med spærmål. Revnenumre. (Strain along longitudinal reinforcement and compression flange, dial gauges. Numbers of cracks).

No.	P Mp	c o/oo	t o/oo
T1a			
	d	44	57
1	1.5	-0.05	0.12
2	3.0	-0.12	0.36
3	4.5	-0.18	0.59
4	6.0	-0.25	0.80
5	7.5	-0.32	1.07
6	9.0	-0.40	1.26
7	10.5	-0.50	1.49
8	12.0	-0.60	1.73
9	13.5	-1.06	7.18
T2a			
	d	43	57
1	1.3	-0.05	0.10
2	2.6	-0.10	0.31
3	3.9	-0.15	0.53
4	5.2	-0.21	0.72
5	6.5	-0.26	0.93
6	7.8	-0.32	1.12
7	9.1	-0.39	1.33
8	10.4	-0.47	1.54
9	11.7	-0.56	1.76
10	13.0	-0.66	2.10
11	13.6	-0.77	3.18
11	13.6	-0.85	4.41
11	13.9	-1.07	7.30
T3a			
	d	34	57
1	1.3	-0.05	0.11
2	2.6	-0.12	0.33
3	3.9	-0.17	0.51
4	5.2	-0.23	0.71
5	6.5	-0.30	0.91
6	7.8	-0.35	1.11
7	9.1	-0.42	1.31
8	10.4	-0.49	1.51
9	11.7	-0.60	1.73
10	13.0	-0.60	1.93

No.	P Mp	c o/oo	t o/oo
T4a			
	d	43	57
1	1.3	-0.05	0.12
2	2.6	-0.12	0.32
3	3.9	-0.17	0.51
4	5.2	-0.23	0.71
5	6.5	-0.27	0.90
6	7.8	-0.32	1.10
7	9.1	-0.40	1.29
8	10.4	-0.48	1.51
9	11.7	-0.55	1.71
10	13.0	-0.63	1.95
11	13.5	-0.64	2.06
T1b			
	d	32	57
1	1.2	-0.06	0.12
2	2.4	-0.10	0.27
3	3.6	-0.16	0.46
4	4.8	-0.21	0.65
5	6.0	-0.26	0.82
6	7.2	-0.32	1.00
7	8.4	-0.38	1.17
8	9.6	-0.45	1.37
9	10.8	-0.53	1.55
10	12.0	-0.64	1.72
T2b			
	d	36	57
1	1.2	-0.04	0.08
2	2.4	-0.12	0.26
3	3.6	-0.16	0.46
4	4.8	-0.23	0.65
5	6.0	-0.28	0.82
6	7.2	-0.35	1.01
7	8.4	-0.42	1.18
8	9.6	-0.50	1.36
9	10.8	-0.58	1.56
10	12.0	-0.68	1.75
11	13.2	-0.91	2.00

No.	P Mp	c o/oo	t o/oo
T3b			
	d	35	57
1	1.0	-0.03	0.07
2	2.0	-0.08	0.21
3	3.0	-0.12	0.37
4	4.0	-0.17	0.52
5	5.0	-0.21	0.67
6	6.0	-0.25	0.82
7	7.0	-0.30	0.96
8	8.0	-0.34	1.11
9	9.0	-0.40	1.27
10	10.0	-0.44	1.42
11	11.0	-0.51	1.57
12	11.8	-0.56	1.70
T4b			
	d	40	57
1	1.0	-0.04	0.07
2	2.0	-0.08	0.18
3	3.0	-0.15	0.36
4	4.0	-0.20	0.51
5	5.0	-0.25	0.68
6	6.0	-0.31	0.84
7	7.0	-0.35	0.99
8	8.0	-0.41	1.14
9	9.0	-0.47	1.29
10	10.0	-0.53	1.43
11	10.9	-0.58	1.58
T5			
	d	35	57
1	1.2	-0.04	0.09
2	2.25	-0.09	0.26
3	3.3	-0.14	0.45
4	4.4	-0.18	0.62
5	5.5	-0.24	0.79
6	6.6	-0.29	0.95
7	7.7	-0.36	1.12
8	8.8	-0.42	1.30
9	9.9	-0.47	1.49
10	10.4	-0.51	1.55

P: exclusive of weight of beam 0.15 Mp/m



mål i mm

Tabel VIII. Serie I. Maksimale revnevidder.
(Maximum width of cracks).

P (Mp)	Flexure (mm)	Shear + (mm)	Shear - (mm)
T21			
10.4	0.1	0.6	0.7
11.7	0.1	0.8	1.0
T22			
7.2	<0.05	0.05	0.15
9.6	0.2	0.25	0.3
10.8	0.1	0.3	0.35
12.0	0.25	0.8	0.9
T23			
7.2	<0.05	0.2	0.15
8.4	<0.05	0.25	0.15
9.6	0.1	0.3	0.3
10.8	0.1	0.55	0.55
12.0	0.1	0.9	1.1
13.2	0.15	1.5	1.5

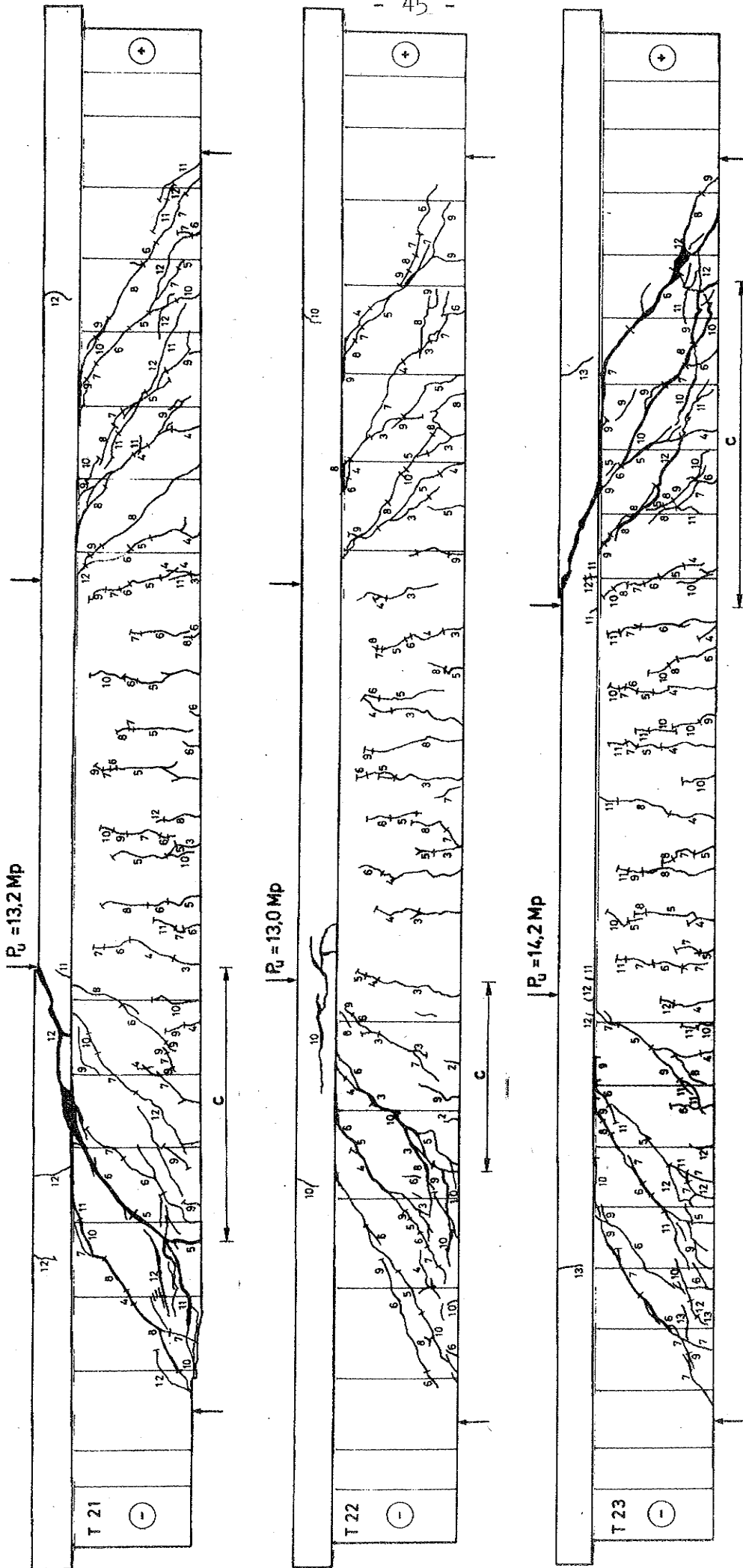


Fig. 2.9 Revneblillede efter brud for bjælkerne T21, T22 og T23

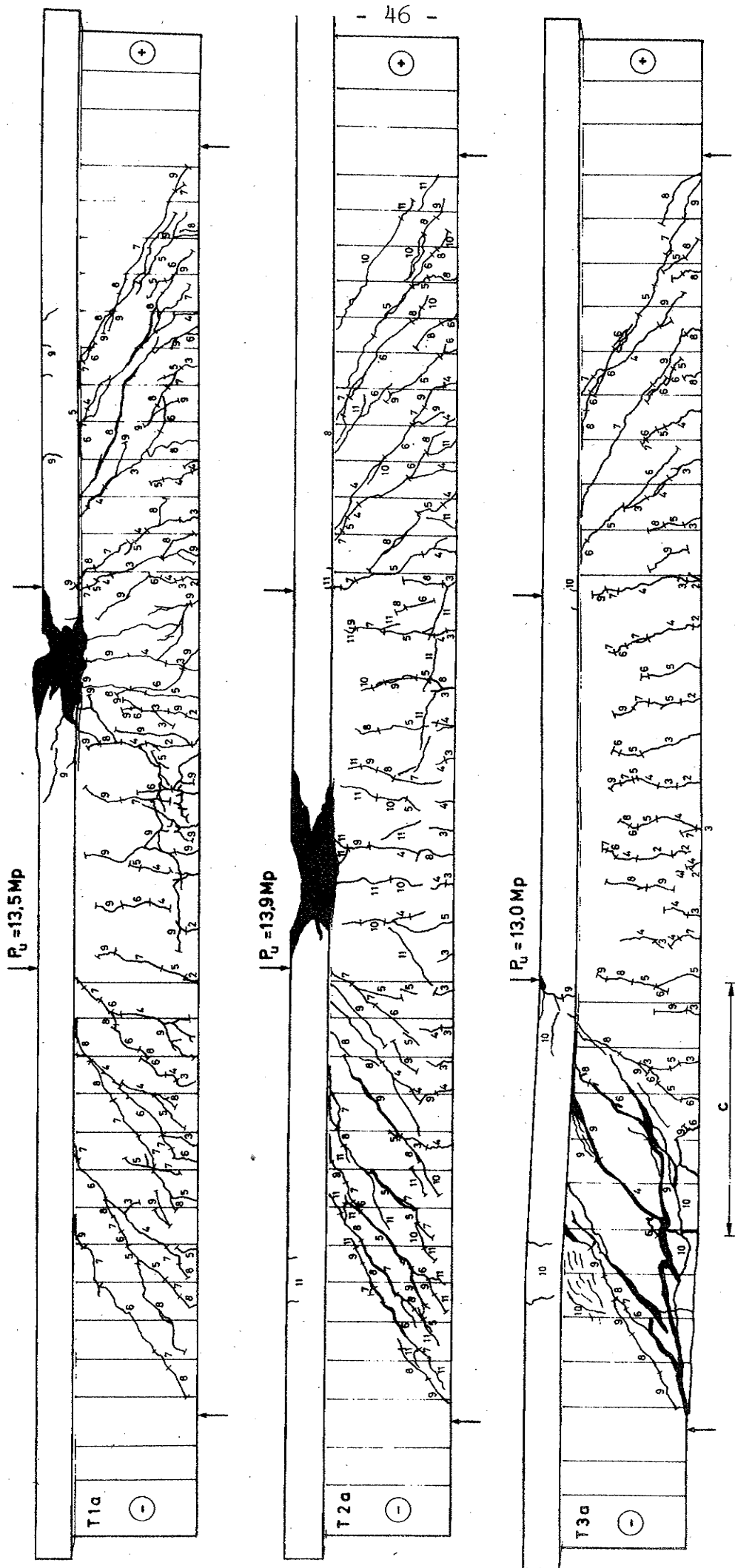


Fig. 2.9 Revnebllede efter brud for bjælkerne T1a, T2a og T3a

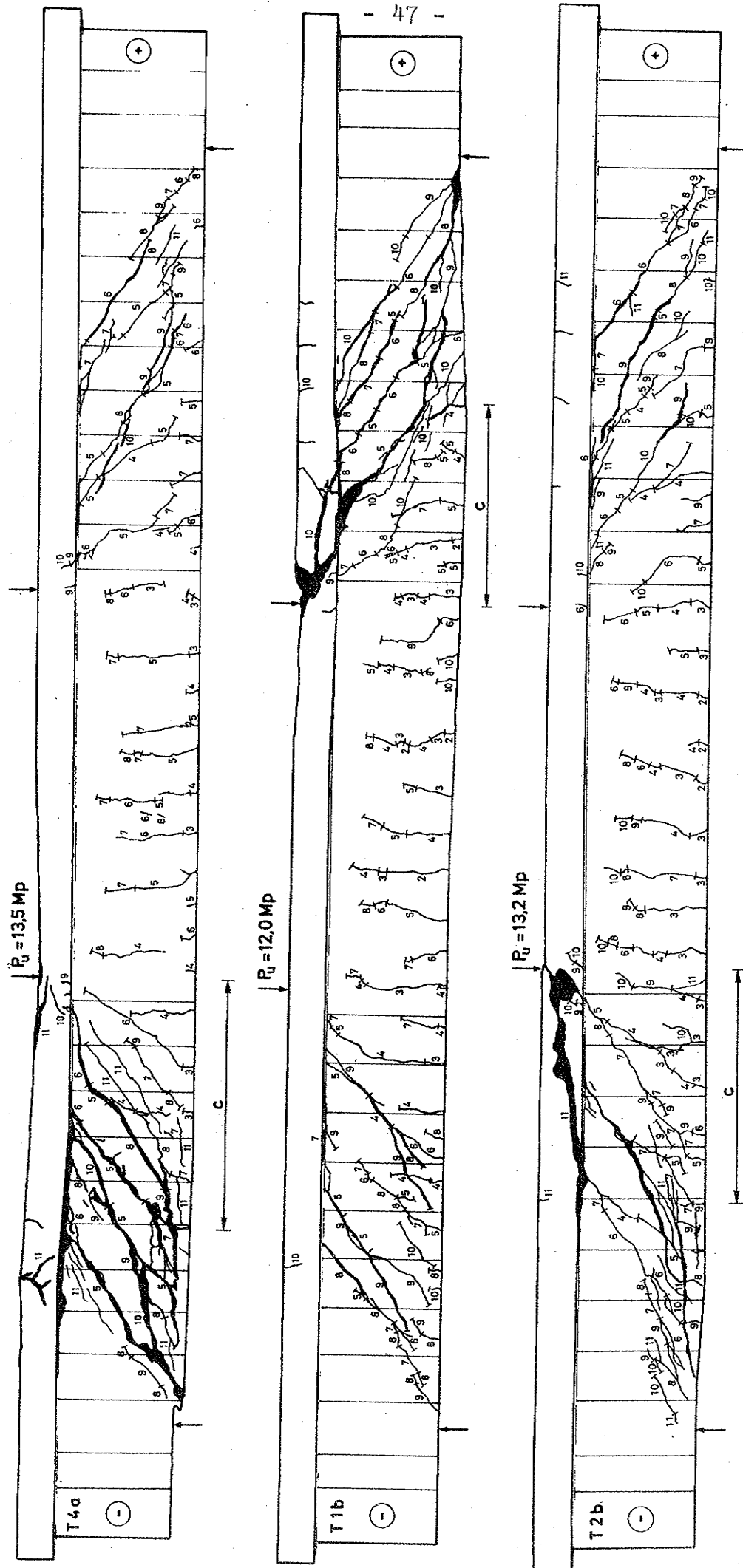


FIG. 2.9 Revnebilliede efter brud for bjælkerne T4a, T1b og T2b

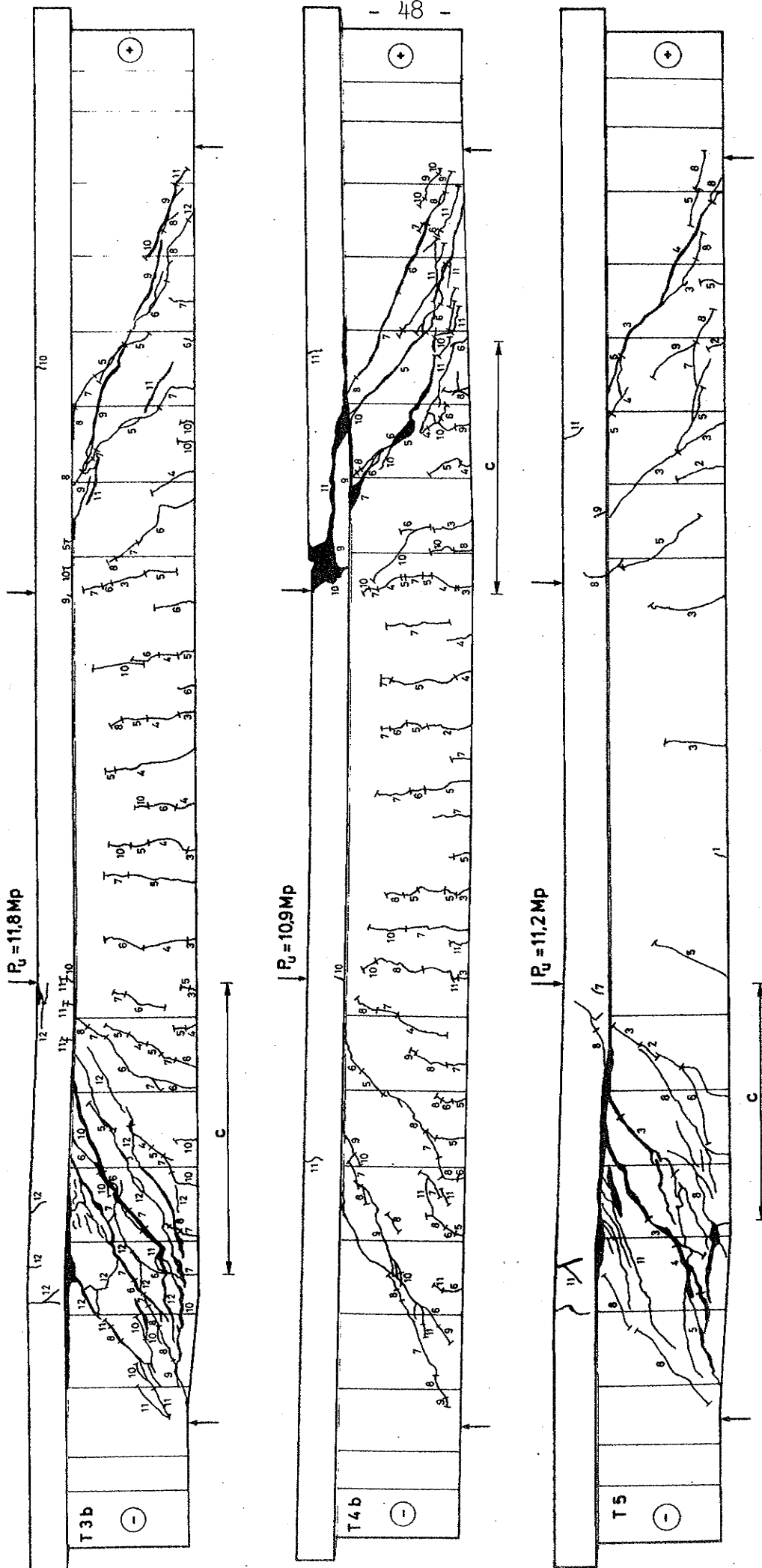


Fig. 2.9 Revnebillede efter brud for bjælkerne T3b, T4b og T5

Summary

This report treats test with 12 reinforced concrete T-beams subjected to combined bending and shear. The tests continue earlier tests performed in 1963-1965 by K Özden (litt. [67.1] p. 23).

All the beams have a shear span $\frac{M}{Th} = 3.5$, a longitudinal ratio $\bar{w}_o = 1.06\%$, and a concrete cylinder strength $\sigma_c = 250-330 \text{ kp/cm}^2$ (fig. 1.1, fig. 2.3, fig. 2.4 and table I). Only the shear reinforcement (vertical stirrups of mild plain bars) was varied (table I and fig. 1.2).

Strain measurements with 100-130 strain gauges were performed on 3 of the beams (series I: T21, T22 and T23). The measurements with strain gauges on the concrete compression flange (fig. 1.3 and table IIIa-c), together with the formation of cracks (fig. 2.9), demonstrate the presence of an arch action in the shear span. The measurements with strain gauges on the longitudinal reinforcement (fig. 1.5 and table IIIa-c) demonstrate a considerable dowel action even when the load was 60% of the ultimate load. The measurements with strain gauges on the stirrups (fig. 1.7 and table IVa-c), together with the measurements of the maximum width of cracks, indicate the possibility of using stirrups with a yield strength (0,2 per cent offset) of about 6000 kp/cm^2 .

The ultimate load (table I and fig. 1.2), compared with two typical formulae, shows that those of Hillerborg [68.1] are in good agreement with the test results, whereas those of ACI [62.1] underestimate the shear failure load by about 60%.

The notation in this report is mostly in accordance with that of CEB [69.3].



Structural Research Laboratory
Technical University of Copenhagen, Denmark

REPORTS

- R 1. Askegaard, Vagn and P. Thoft-Christensen: Spændingsoptiske lag og tøjningsmålere. 1967.
- R 2. Møllmann, H.: The Principle of Virtual Work for Continuous Systems Derived by a Direct Method. 1968.
- R 3. Askegaard, Vagn: Production and Application of Model Materials with Desired Physical Constants. 1968.
- R 4. Møllmann, H.: The Analysis of Shallow Cables. 1968.
- R 5. Dyrbye, Claës: Damped Vibrations of Slender Beams. 1968.
- R 6. Møllmann, H.: Analysis of Plane Prestressed Cable Structures. 1969.
- R 7. Nielsen, Leif Otto: Beregning af bjælker og rammer dynamisk påvirket ud over det elastiske område. 1968.
- R 8. Bræstrup, Mikael W.: On the Theory of Plastic Plates. 1969.
- R 9. Nielsen, Leif Otto: Uniqueness Problems and Minimum Principles in the Dynamic Theory of Plasticity. 1969.
- R 10. Byskov, Esben: Two Nearly Polygonal Holes. Mathematical Crack Problems. 1969.
- R 11. Bræstrup, Mikael W.: The Cosserat Surface and Shell Theory. 1970.
- R 12. Askegaard, Vagn: Anvendelse af modelanalyse. 1970.
- R 13. Solnes, Julius: The Spectral Character of Earthquake Motions.
- R 14. Bræstrup, Mikael W.: Yield Lines in Discs, Plates and Shells. 1970.
- R 15. Møllmann, H.: Beregning af hængekonstruktioner ved hjælp af deformationsmetoden. 1970.
- R 16. Byskov, Esben: The Calculation of Stress Intensity Factors Using the Finite Element Method with Cracked Elements. 1970.



- R 17. Askegaard, V.: Grundlaget for adhæsion. 1970.
- R 18. Summaries of Lecture Notes on Experimental Stress Analysis. 1970.
- R 19. Sørensen, Hans Christian: Forskydning i jernbetonbjælker. 1970.
- R 20. Sørensen, Hans Christian: Forskydningsforsøg med 12 jernbetonbjælker med T-tværsnit. 1970.

