



Det här verket har digitaliserats vid Göteborgs universitetsbibliotek och är fritt att använda. Alla tryckta texter är OCR-tolkade till maskinläsbar text. Det betyder att du kan söka och kopiera texten från dokumentet. Vissa äldre dokument med dåligt tryck kan vara svåra att OCR-tolka korrekt vilket medför att den OCR-tolkade texten kan innehålla fel och därför bör man visuellt jämföra med verkets bilder för att avgöra vad som är riktigt.

This work has been digitized at Gothenburg University Library and is free to use. All printed texts have been OCR-processed and converted to machine readable text. This means that you can search and copy text from the document. Some early printed books are hard to OCR-process correctly and the text may contain errors, so one should always visually compare it with the images to determine what is correct.



Rapport

R103:1978

**Utmattningsprovning av
betongsliprar**

**Utveckling av provnings- och
mätmetodik vid experimentell
utmattningsforskning**

Kent Gylltoft

Byggforskningen

Se

R103:1978

UTMATTNINGSPROVNING AV BETONGSLIPRAR

Utveckling av provnings- och mätmetodik
vid experimentell utmattningsforskning

Kent Gylltoft

V-BIBLIOTEKET BYGG
Lunds Tekniska Högskola
Box 118, 221 00 LUND

Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 770717-9
från Statens råd för byggnadsforskning till Avd. för
Konstruktionsteknik vid Högskolan i Luleå.

I Byggforskningsrådets rapportserie redovisar forskaren sitt anslagsprojekt. Publiceringen innebär inte att rådet tagit ställning till åsikter, slutsatser och resultat.

Nyckelord:
järnvägsbyggnad
sliprar
betong
spännbetong
utmattning
provningmetoder
mätmetoder

UDK 620.178.3
691.32:625

R103:1978

ISBN 91-540-2939-2
Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

LiberTryck Stockholm 1978 859413

INNEHÅLL	Sid
FÖRORD	5
SAMMANFATTNING	7
BETECKNINGAR	9
1. INLEDNING	11
2. PROVKROPPAR	15
3. MATERIAL	17
3.1 Betong	17
3.2 Armering	19
4. STATISKA BERÄKNINGAR	23
5. FÖRSÖKSUTRUSTNING	29
6. GENOMFÖRANDE	33
7. MÄTMETODER OCH MÄTINSTRUMENT	39
7.1 Last	39
7.2 Nedböjning	39
7.3 Töjning och sprickbredd	40
7.4 Jämförelse mellan mekaniska och elektriska mätmetoder	45
7.5 Allmänna synpunkter	50
8. FÖRSÖKSRESULTAT	53
8.1 Allmänt	53
8.2 Primära resultat från statistiska försök	54
8.3 Jämförelse med statistiska beräkningar Modifierad beräkning	56
8.4 Primära resultat från utmattnings- försök	57
8.5 Brottets karaktär	59
8.6 Töjningar	61
8.7 Spänningar	64
8.8 Jämförelse med tidigare under- sökningar Livslängd för spännlina	70

	Sid
9. SLIPRARNAS ANVÄNDNING I JÄRNVÄG MED HÄNSYN TILL UTMATTNING	75
10. SLUTSATSER	79
11. REFERENSER	81
APPENDIX A STATISKA BERÄKNINGAR	
A.1 Inledande beräkningar	83
A.2 Beräkningsprogram	84
A.3 Beräkningsresultat	85
A.4 Modifierat beräkningsprogram	86
A.5 Beräkningsresultat med modifi- erat beräkningsprogram	87
APPENDIX B PROVKROPPAR EFTER BROTT	89

FÖRORD

Denna skrift behandlar utmattningsprovning av en ny typ av järnvägssliprar i förespänd betong. Syftet med projektet är dels att utveckla provnings- och mätmetodik vid experimentell utmattningsforskning dels att undersöka de aktuella betongsliprarnas utmattningsegenskaper, och dels att öka kunskapen vad gäller utmattningshållfasthet i spännbetongkonstruktioner.

Arbetet har genomförts vid Avdelningen för Konstruktionsteknik vid Högskolan i Luleå med stöd av Statens råd för byggnadsforskning och Statens Järnvägar. Professor Krister Cederwall och docent Lennart Elfgren har givit råd och anvisningar under arbetets gång. Vid provnings- och utvärderingsarbetet har bergsing Georg Danielsson, ing Ingvar Holm, ing Håkan Johansson och ing Jan-Olof Sundqvist medverkat. En av sliprarna (nr 10) är provad inom ramen för ett examensarbete som utförts av teknolog Nils-Erik Bergström. Figurerna har renritats av Monica Lövgren och maskinutskrift har utförts av Kerstin Gatu.

Sliprarna som tillhandahållits av SJ har tillverkats av A-Betong AB. Från SJ har övering Lennart Borup, ing Erik Rytter och ing Eric Svebring medverkat och från A-Betong ing Stig Thim och ing Sten Limmergård. Från Halmstads Järnverks AB har ing Ulf Gällstedt medverkat.

Synpunkter på rapportinnehållet har även lämnats av tekn dr Åke Holmberg vid Centerlöf & Holmberg AB.

Luleå i juni 1978

Kent Gylltoft

SAMMANFATTNING

Undersökningen omfattar utmattningsprovning av en ny typ av järnvägssliprar i förespänd betong.

Syftet med undersökningen var dels att utveckla provnings- och mätmetodik vid experimentell utmattningsforskning, dels att undersöka de aktuella betongsliprarnas utmattningsegenskaper, och dels att öka kunskapen vad gäller utmattningshållfasthet i spännbetongkonstruktioner.

Sammanlagt 14 sliprar provades. Sliprarna delades på mitten, varvid den ena halvan utsattes för statisk belastning (engångslast), och den andra halvan för utmattningsbelastning (flergångslast). Vid de statiska försöken förekom tre typer av brott: betongkrossbrott, skjuvbrott och vidhåftningsbrott. Vid utmattningsförsöken förekom endast en brottyp, utmattningsbrott i spännlinorna. Att olika brottyper förekom vid de statiska försöken respektive vid utmattningsförsöken torde främst bero på, att spänningsfördelningen i sliprarna var olika i de bägge fallen, p g a olika lastnivåer.

Den livslängd, (antal lastväxlingar till brott vid olika spänningsnivåer), som erhöles för spännlinorna vid försöken, överensstämmer rätt väl med resultaten från tidigare utförda utmattningsförsök på spännlinor. Försöksresultaten tyder på att spännlinan i sliprarna skulle ha en "praktisk" utmattningsgräns vid en maximispänning på 55% av linans brottspänning, förutsatt att minispänningen är 50% av brottspänningen. Reservation måste dock göras p g a det begränsade antalet försök.

Vid provningen användes både mekaniska och elektriska mätmetoder, varvid de olika metoderna jämfördes. Vid de sist genomförda utmattningsförsöken användes endast elektriska mätmetoder, vilka medgav ett helt automatiskt provningsförfarande. Vad gäller insamling och registrering av mätdata, bör emellertid i framtiden i ökad utsträckning datorbaserade mätdatainsamlingssystem användas. Härigenom ökas möjligheterna till övervakning och styrning av provningen och det fortsatta utvärderingsarbetet underlättas väsentligt.

Beträffande sliprarnas praktiska användning i järnvägar, tyder undersökningen på att säkerheten mot utmattningsbrott i sliprarna, utsatta för normal tågtrafikbelastning (20 tons axeltryck), skulle vara tillfredsställande. Reservation måste dock göras för ett antal miljöfaktorer, vars inverkan ej har kunnat beaktas i denna undersökning.

BETECKNINGAR

F	kraft	index c	betong
M	moment	s	lina (stål)
T	tvärkraft	o	överkant
P	spännkraft	u	underkant
F_u	brottlast	min	minimal
M_u	brottmoment	max	maximal
A	area	m	medelvärde
I	yttröghetsmoment	r	vidd
W	tvärsnittsmotstånd	p	av spännkraft
E	elasticitetsmodul	m	av moment (i fig 4.3)
N	antal lastväxlingar		

σ	spänning
ϵ	töjning
f	hållfasthet
f	(Hz) frekvens
$\alpha = E_s/E_c$	
φ	töjningsvinkel
w	sprickbredd
y	nedböjning
b	bredd
d	tryckzonshöjd
e	tyngdpunktsavstånd
h	höjd
l	spännvidd
x	avstånd

1. INLEDNING

Problem rörande utmattning i konstruktioner av armerad betong har fått ökad betydelse under senare år [1]. Detta beror bl a på att dimensionerings- och analysmetoderna succesivt förfinats och att materialkvaliteterna förbättrats alltmer. Dessa faktorer bidrar till att konstruktionerna blir lättare med större andel rörlig last som följd, varvid risken för utmattning ökar. Förbättrade materialkvaliteter innebär även att den statiska hållfastheten ökar mer än utmattningshållfastheten, varvid utmattningshållfastheten relativt sett blir lägre. Utvecklingen i samhället medför också att nya typer av konstruktioner byggs där utmattande laster uppträder i större omfattning än vad som tidigare varit vanligt, (se tex [2]).

Utmattningsforskning på byggnads- och anläggningskonstruktioner har i Sverige hittills förekommit i rätt begränsad omfattning. Forskningen inom detta område ökar dock. Härvid måste även kunskapen angående utmattningsprovningar förbättras.

Ett av syftena med denna undersökning, är att ge erfarenhet av utmattningsprovningar och att utveckla provnings- och mätmetodik vid experimentell utmattningsforskning. Målsättningen är att huvuddelen av de mätningar som genomförs vid utmattningsprovningar skall kunna utföras på elektronisk väg så att en hög grad av automatisering uppnås. Då kan försöken pågå dygnet runt, med ett minimum av kostsamma personella arbetsinsatser, och provutrustningen kan utnyttjas rationellt.

De här genomförda provningarna avser också att bidra till ett ökat vetande angående utmattningshållfastheten hos armerad betong.

Som provkroppar användes den nya typ av betongsliper som sedan år 1977 är standard vid SJ. (I denna undersökning har sliprar med beteckningen B 10 använts.) Detta är en konstruktion som i sin användning i spår är utsatt för utmattande laster från tågtrafik. Utmattningshållfastheten är här direkt avgörande för konstruktionens livslängd. Sliprarna är armerade med förspända linor och är dimensionerade så att sprickor i betongen normalt ej skall uppkomma. Emellertid visar erfarenheten att sliprarna får betongsprickor orsakade av vissa okontrollerbara "överlaster". Frågan uppstår då hur länge dessa "spruckna" sliprar klarar fortsatt järnvägstrafik. De provningar som redovisas i denna rapport avser ge ökad kunskap om detta.

Belastningen vid provningen har så långt det är rimligt efterliknat belastningen från normal järnvägstrafik, se fig 1.1. Härvid ges även möjlighet till en framtida resultatuppföljning i praktisk användning.

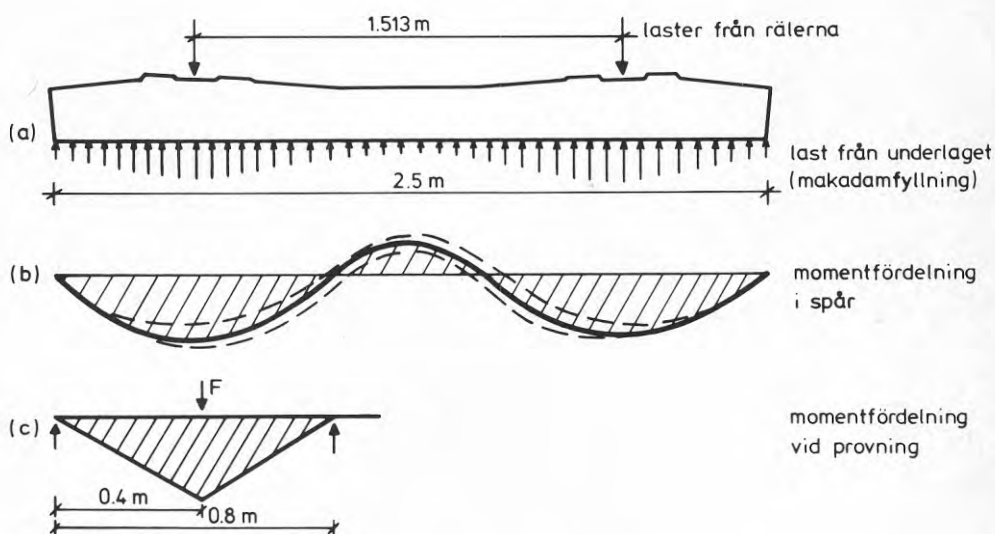


Fig 1.1 Belastningar på slipern (a) samt momentfördelning i slipern i dess tillämpning i spår (b) och vid provning (c).

Det svenska järnvägsnätet dimensioneras för närvarande normalt för ett axeltryck på 20 ton (200 kN), dvs 100 kN från varje räl. Denna last ökas av bl a dynamiska tillskott, snedbelastningar, och minskas av bl a rärens lastfördelade verkan. Storleken på dessa lastförändringar varierar men grovt sett är lasten från varje räl fortfarande av storleksordningen 100 kN. Emellertid uppstår ibland vissa oförutsedda laster orsakade av ojämnheter i vagnshjulen, ojämna sättningar o dyl. Inverkan av dessa faktorer är mycket svårbestämbara men kan ibland öka den påverkande lasten väsentligt [3].

2. PROVKROPPAR

Provningen omfattade totalt 14 sliprar. Sliprarnas utformning visas i fig 2.1.

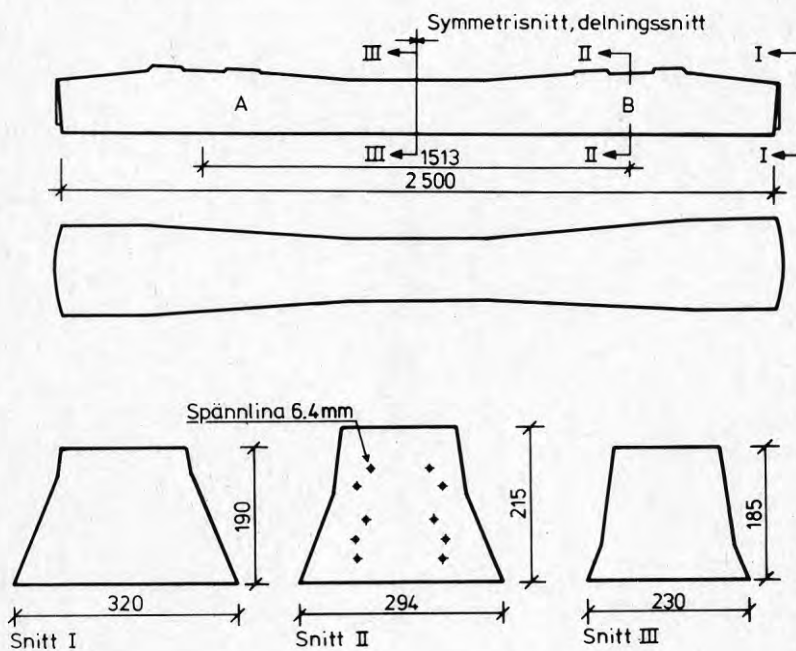


Fig 2.1 Provkroppsutformning

Sliprarna delades på mitten varvid ena halvan provades vid statisk belastning (engångsbelastning) och den andra halvan vid utmattningsbelastning (flergångsbelastning). Delningen av sliprarna gjordes dels för att få en jämförelse mellan statisk hållfasthet och utmattningshållfasthet, dels för att på ett enkelt sätt få en väldefinierad momentfördelning längs slipern som också relativt väl överensstämmer med verkligheten, se fig 1.1.

Sliprarna numrerades 1-14 varvid den statistiskt belastade halvan benämns A och den utmattningsbelastade halvan benämns B. Sliper nr 10 har provats inom ramen för ett examensarbete[3]. På sliper nr 11-14 har endast "utmattningshalvan" provats.

Provkropparna tillverkades vid A-Betongs produktionsanläggning i Vislanda. De uttogs från den normala slipersproduktionen. Provkropparnas ålder vid provningstillfället varierade mellan 2-5 månader.

3. MATERIAL

De materialstorheter som använts baseras till stor del på provningsvärden framtagna vid den löpande produktkontrollen som slipertillverkaren (A-Betong AB) och spännlinetillverkaren (Halmstads Järnverks AB) utför. Tillverkningsprocessen är i båda fallen högradigt standardiserad och en omfattande materialprovning utförs fortlöpande. Härigenom är materialstorheterna väl kända och spridningen hos dem är liten.

3.1 Betong

Betong K600 klass I användes vid tillverkningen av sliprarna. Hållfastheten efter 28 dygn för normenligt lagrade provkuber var i medeltal 68,3 Mpa med en standardavvikelse på 2,3 Mpa.

Provserien omfattade 270 kuber och utgjorde samtliga provkuber uttagna under år 1977 vid aktuell produktionsanläggning. Vid tillverkningen av sliprarna sker värmehärdning i spännbädden varefter sliprarna förvaras utomhus. Provningar tidigare utförda vid produktionsanläggningen visade att 28-dygns hållfastheten för kuber lagrade på samma sätt som betongsliprarna är 18% lägre än hållfastheten hos normenligt lagrade kuber. Detta innebär att hållfastheten för kuber lagrade på samma sätt som sliprarna i medeltal är 56,0 Mpa med standardavvikelsen cirka 2,3 Mpa. Detta förutsätter dock att spridningen är lika för de båda lagringsförfarandena.

En statistisk utvärdering av ovanstående ger att nedre och övre 5% fraktilen blir 52,0 respektive 60,0 Mpa, bestämda på 75% konfidensnivå.

Provkropparnas ålder vid provning varierade mellan 2-5 månader. Eftersom SH-cement användes vid tillverkningen så är ej skillnaden stor mellan 28 dygns-hållfastheten och hållfastheten vid 2-5 månader. Ökningen i hållfasthet torde vara mindre än 5% för den längsta tiden varför inverkan av den tidsberoende hållfasthetsökningen försummas.

Tidigare provningar som utförts bl a vid CTH [4] visar att spännings- töjningssambandet för betong vid engångsbelastning har formen av en parabel där lutningen på kurvan vid brott approximativt kan sättas till 0 (se fig 3.1).

Om brottspänningen 56,0 Mpa används tillsammans med ett antaget värde på brottstökningen på 3,5 ‰, kan spänningstöjningssambandet enligt fig 3.1 uppritas.

Analytiskt fås sambandet enligt ekv 3.1, (se fig 3.1).

$$\sigma_c = 32,0 \epsilon_c - 4,57 \epsilon_c^2 \quad (3.1)$$

Elasticitetsmodulen vid kurvans nedre del i fig 3.1 blir omkring $E_c = 30\ 000$ Mpa.

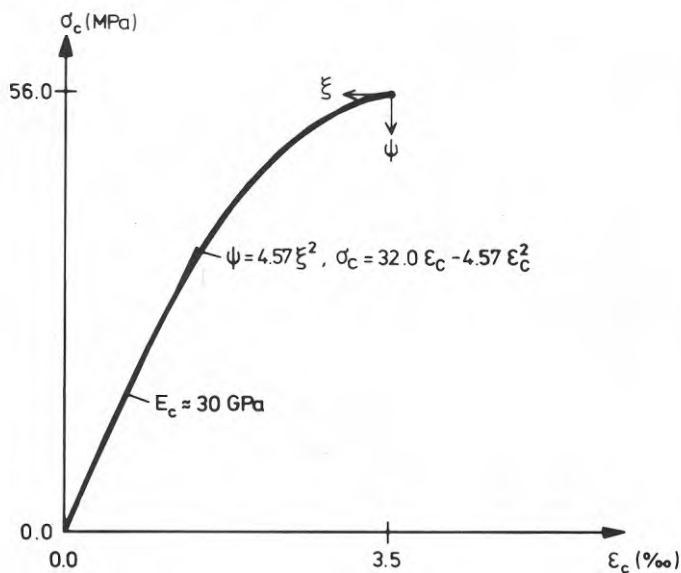


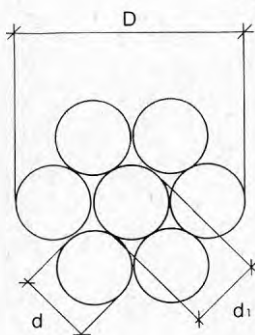
Fig 3.1 Spännings- och töjningssamband för betong

Förutom spännings- töjnings sambandet enligt fig 3.1 används senare även ett modifierat spännings- töjningsdiagram i de statistiska beräkningarna p g a att treaxligt spänningstillstånd råder i tryckzonen under lasten samt p g a den speciella konstruktions- utformningen i detta område, se avsnitt 8.3.

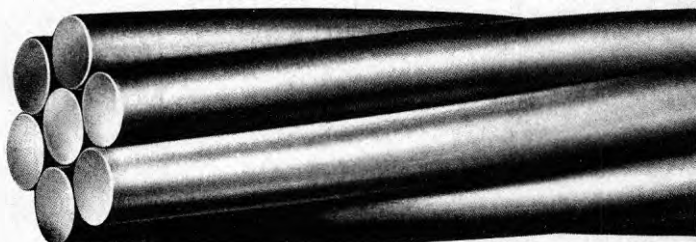
3.2 Armering

Provkropparna var armerade med 10 st 7-trådiga spänn- linor som hade en yttre diameter av 6,4 mm. Utseende och vissa allmänna data för linan framgår av tabell 3.1.

Tabell 3.1 Utseende och produktdata för spännlina.
(Hämtad från [6]).



d_1 minst 2% > d



SPÄNNLINA 1757-07 uppfyller fordringar enligt SIS 141757-07 och SIS 213615.

Diameter D mm	Tolerans mm	F ¹⁾		R ²⁾		F _m ³⁾		R _m ⁴⁾		ε _g ⁵⁾ %	Nom tväryta mm ²	Vikt kg/m
		kN min	Mp min	N/mm ² min	kp/mm ² min	kN min	Mp min	N/mm ² min	kp/mm ² min			
6,4	+0,4 -0,2	37,9	3,86	1550	158	44,5	4,54	1820	186	3,5	24,5	0,194

¹⁾ Belastning vid 1% total töjning (= 0,85 F_m)

²⁾ Påkänning vid 1% total töjning (= 0,85 R_m)

³⁾ Maximal belastning

⁴⁾ Påkänning vid maximal belastning.

⁵⁾ Gränstöjning. Se SIS 112137

ELASTICITETSMODULEN beräknas som sekantmodul enligt SIS 112138: 2.3.2 f) och är för LINA 194000 ± 5900 N/mm² (19800 ± 600 kp/mm²).

RELAXATIONEN, bestämd enligt SIS 112324, är efter 1000 timmar vid en initialspänning av 0,7 × F_m 5–7 %. SPÄNNLINA kan även erhållas behandlad så att relaxationen ej överstiger 2,5% efter 1000 timmar.

SPÄNNLINA enligt BS 3617:1971, amerikansk standard ASTM A 416-74 eller enligt specificerade krav på andra dimensioner och hållfasthetsegenskaper kan tillverkas.

Linan är av normalrelaxerande typ, och är ytsträv-
hetsbehandlad genom en kontrollstyrd kemisk ytbehand-
ling. Tillverkaren (Halmstads Järnverk) anger beträff-
ande ytsträvheten att medelytavvikelsen R_a (enligt
ISO 221 [5]) är lika med $1,8 \pm 0,7$. (Detta kan jäm-
föras med obehandlad yta där R_a är $0,33 \pm 0,15$.)

Halmstads Järnverk utför fortlöpande en omfattande
provtagning på spännlinorna och anger som erfaren-
hetsvärden ett normalutfall vid kontrollprovningarna
under år 1977 följande:

Brottlast $F_m = 48,5 \pm 0,1$ kN

Last vid 1% töjning $F_{1\%} = 43,5 \pm 0,1$ kN

Elasticitetsmodulen $E_s = 198 \pm 8$ GPa

Gränstöjning $\epsilon_g = 5,8 \pm 1,0\%$

Vid Högskolan i Luleå har 4 linor provdragits. Prov-
bitarnas längd var 0,30 m och provdragningarna gjor-
des i en 200 kN servohydraulisk belastningsmaskin.
Lasten mättes med elektrisk lastgivare och töjningen
mättes dels med en elektrisk extensiometer med 25 mm
mätlängd och dels med en pålimmad trådtöjningsgivare
(på en av trådarna). Överensstämmelsen både mellan
de olika provbitarna och mellan de båda mätmetoder-
na var mycket god och resultatet av provningarna har
inritats som en kurva i fig 3.2. I figuren är också
inritad en typisk spännings- töjningskurva utförd vid
Halmstads Järnverk. En medelvärdeskurva för resultaten
erhållna vid de båda provningarna har också inritats
och har använts vid utvärderingen av provningsresul-
taten. I fig 3.2 är spännings- töjningssambandet även
approximativt angett i analytisk form.

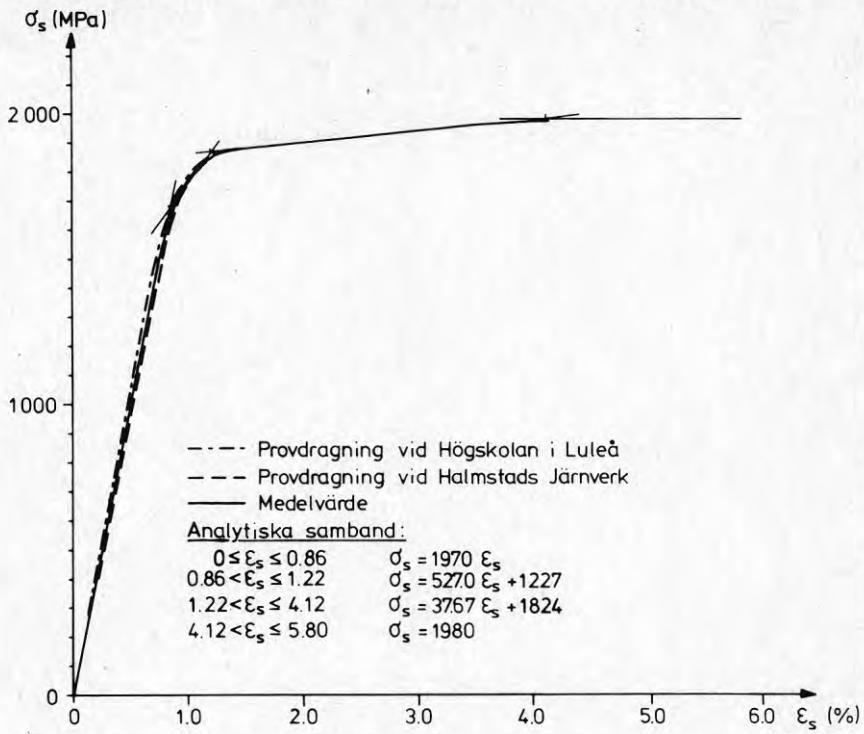


Fig 3.2 Spännings- töjningssamband för spännlina

4. STATISKA BERÄKNINGAR

Provkroppars statiska verkningssätt visas i fig 4.1, (egenvikten försummas).

Momentet har sitt maximala värde i fältmittsnittet. Tvårsnittet har i detta snitt utseende enligt fig 4.2 (se även snitt II i fig 2.1)

Sliprarna gjuts i stålformar och formmåttan på provkropparna ligger därför mycket nära nominella värden. Stickprovskontroller med uppmätta värden visar att avvikelsen mellan uppmätta tvärsnittsstorheter och de nominella oftast är mindre än 1%. Däremot ligger linorna lite högt i sektionen. I medeltal ligger linornas tyngdpunkt vid uppmätning cirka 10 mm högre än nominell angivelse. De nominella värdena har därför korrigerats (med 10 mm) i beräkningarna.

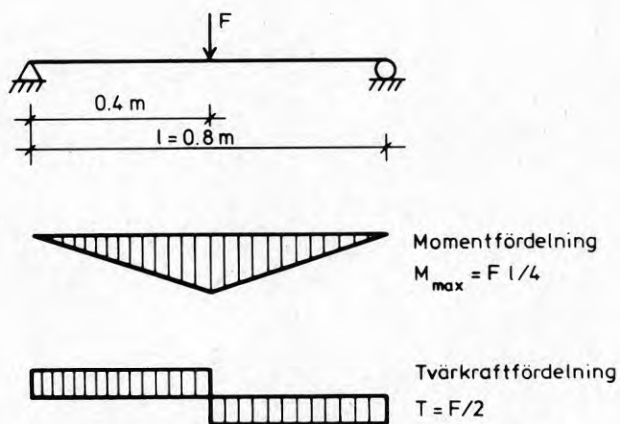


Fig 4.1 Provkropparnas statiska verkningssätt.

Nedan har tvärsnittsstorheterna för tvärsnittet enligt fig 4.2 beräknats. Vid beräkningen av ekvivalent betongarea har förhållandet mellan armeringens och betongens elasticitetsmoduler satts till 6,5 ($\alpha = E_s / E_c = 198/30 \approx 6,5$).

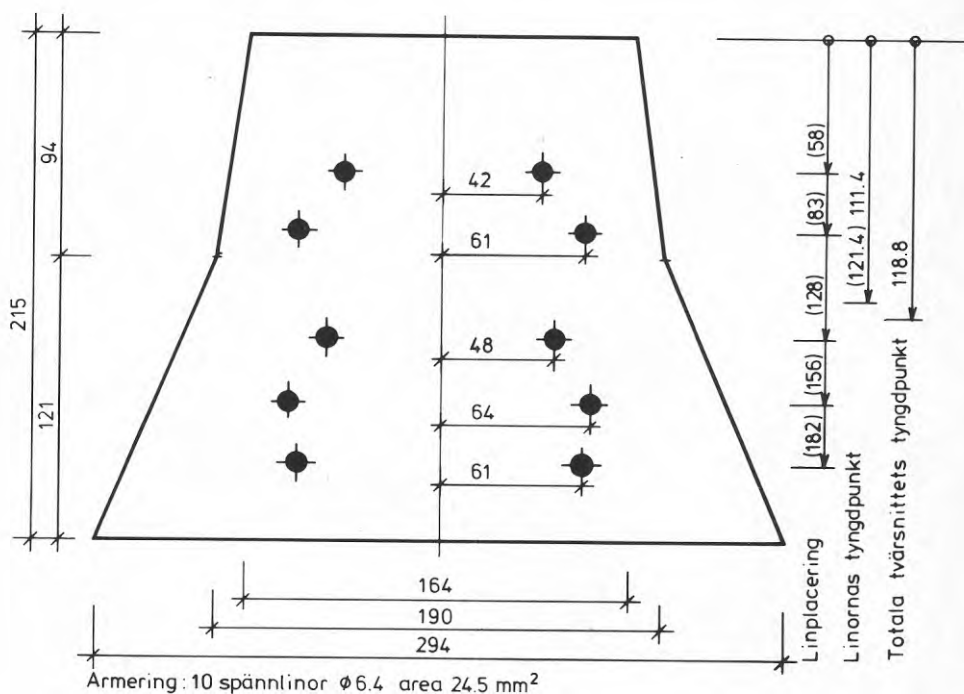


Fig 4.2 Tvärsnitt i fältmitt, osprucket tillstånd. Alla mått är i mm. Måtten är nominella med undantag av måttet till linornas tyngdpunkt som korrigerats med hänsyn till uppmätta värden, se nedan. Nominella mått för linornas placering har satts inom parentes.

Tvårsnittstorheter (osprucket tillstånd)

$$\text{Betongarea } A_C = 45\,920 \text{ mm}^2$$

$$\text{Armeringsarea } A_S = 245 \text{ mm}^2$$

$$\text{Ekvivalent betongarea } A_{C,S} = 47\,270 \text{ mm}^2$$

Tyngdpunktsavstånd för armeringen från överkant

$$e_S = 111,4 \text{ mm}$$

Tyngdpunktsavstånd för totalarean från överkant

$$e_{C,S} = 118,8 \text{ mm}$$

$$\text{Ytttröghetsmoment } I_{C,S} = 180\,200\,000 \text{ mm}^4$$

$$\text{Tvårsnittsmotstånd överkant } W_{C,SO} = 1\,517\,000 \text{ mm}^3$$

$$\text{Tvårsnittsmotstånd underkant } W_{C,SU} = 1\,873\,000 \text{ mm}^3$$

Vid tillverkningen av sliprarna spänns linorna upp till en kraft av 30 kN i vardera linan. Sedan sker gjutning och efter betongens härdning kapas linorna av (avspänning). Spännkraften tas då upp i sliprarnas ändrar genom vidhäftning mellan lina och betong.

Kraftöverföringssträckans längd är enligt sliperstillverkaren cirka 0,5 m, dvs full spännkraft råder i maximalmomentsnittet. Emellertid sker förluster i spännkraften vid och efter avspänning. Dessa spännkraftsförluster orsakas av elastisk sammantryckning i betongen, av betongens krympning och krypning, samt av linornas relaxation. Spännkraftsförlusterna är störst i början och avtar sedan succesivt. Som slutligt värde på spännkraften anger sliperstillverkaren 75% av uppspänningskraften.

De sliprar som provades i denna undersökning hade en ålder vid provningstillfället på mellan 2-5 månader. En jämförelse med en beräkning som gjorts av Holmberg [7] ger att spännkraften vid provningstillfället kan bedömmas vara ca 82% av uppspänningskraften, dvs $0,82 \cdot 30 = 24,6$ kN.

Nedan görs en beräkning där spänningen i linorna, spänningen i betongen, samt neutrala lagrets läge för maximalmomentnittet kan erhållas vid olika värden på yttre lasten F . Plan töjningsfördelning enligt fig 4.3a förutsätts (Bernoullis hypotes). Med hjälp av spänningstöjningssambanden för betongen och för linorna enligt fig 3.1 och fig 3.2 erhålls en spänningsfördelning enligt fig 4.3b. (Här tas således ingen hänsyn till effekten av excentrisk belastning i tryckzonen (jämfört med kubprovningen), eller av treaxliga spänningstillstånd under den yttre lasten. Dessa lastförhöjande effekter är mycket svåra att bestämma. De diskuteras i samband med försöksresultaten i kap 8). Jämviktsvillkoret att den resulterande tryckkraften i betongen F_c skall vara lika med den resulterande dragkraften i linorna F_s ger spänningsfördelningen vid olika värden på yttre lasten F .

Beräkningsgången anges i flödesplanen i fig 4.4.

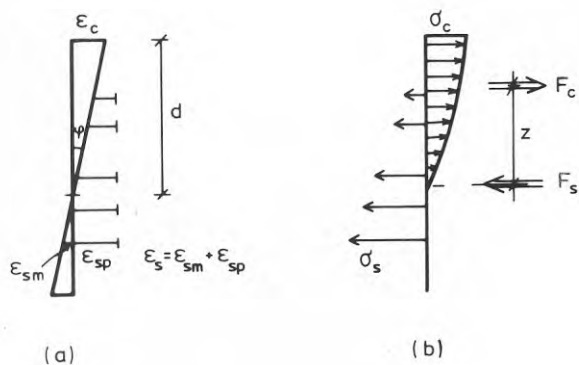


Fig 4.3 Töjningsfördelning (a) och spänningsfördelning (b) vid böjning (momentpåverkan)

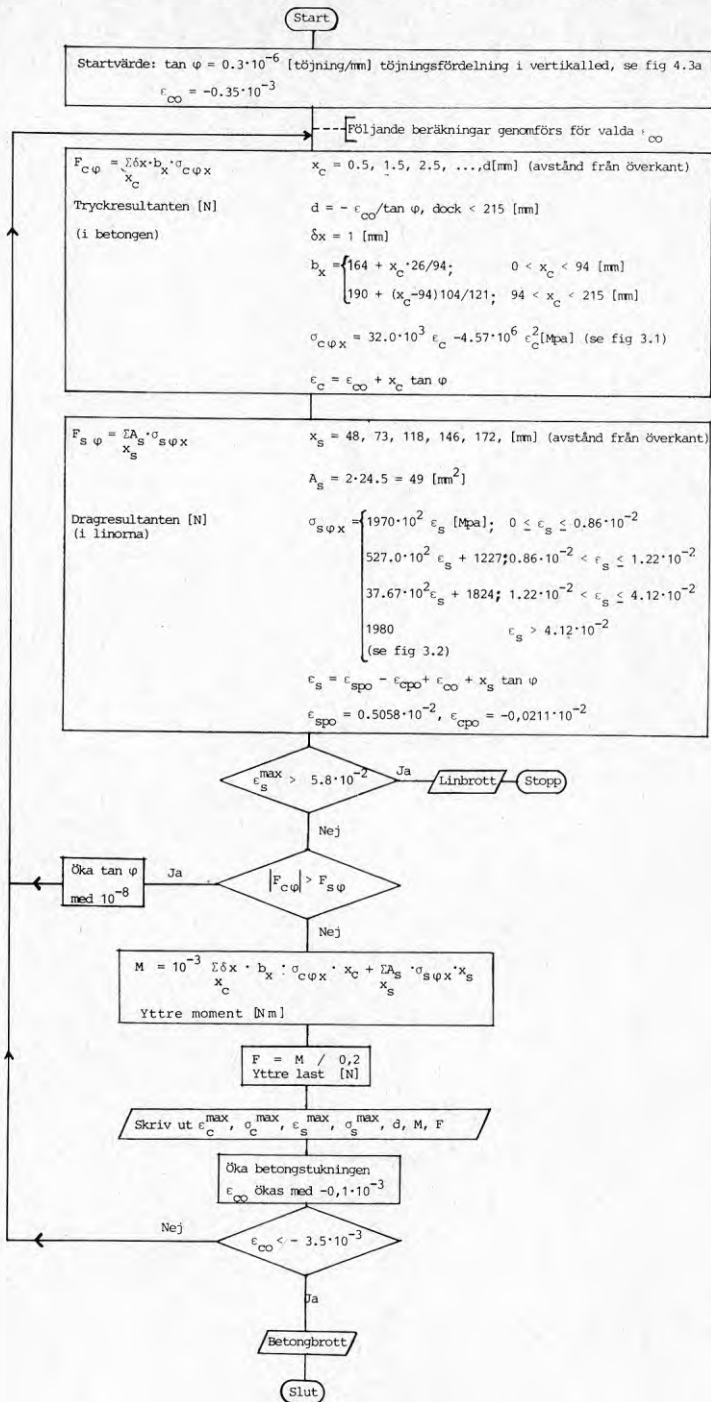


Fig 4.4 Flödesplan för beräkningen

Beräkningen görs på dator. Beräkningsprogram och beräkningsresultat finns redovisade i appendix A.1-A.3. (Där finns också vissa inledande beräkningar medtagna). De viktigaste beräkningsresultaten redovisas i diagramform i fig 4.5.

I avsnitt 8.3 diskuteras en modifierad beräkningsmetod där inverkan av treaxligt spänningstillstånd under punktlasten beaktas.

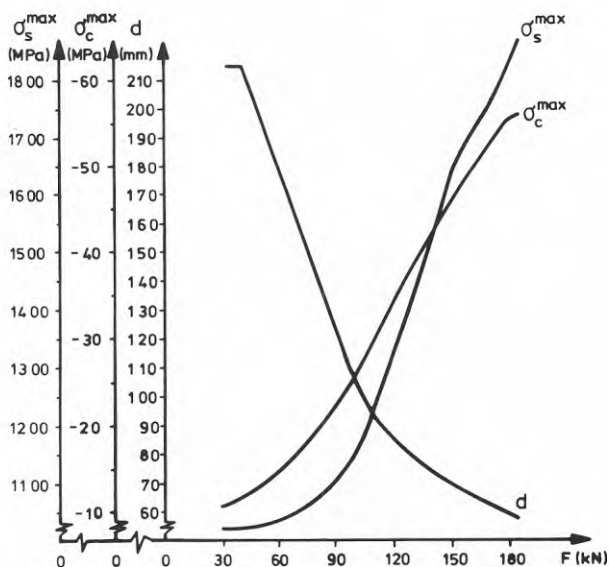


Fig 4.5 Beräkningsresultat. Maximal spänning i lina σ_s^{\max} , maximal spänning i betongen σ_c^{\max} , samt neutrala lagrets läge från ovankant d , som funktion av yttre pålagd last F .

5. FÖRSÖKSUTRUSTNING

Försöksuppställningen visas i fig 5.1. Slipern är upplagd på ett fastlager i ena änden och ett rullager i andra änden. Mellan dessa ställager och slipern finns ett mellanlägg av kork för lastfördelning. Som lastfördelning mellan slipern och belastningscyllindern finns ett plastmellanlägg. Belastningscyllindern är i sin övre del ledat infäst i en provningsrigg och är i sin nedre del styrd mot sliperns rätkoppling med en stålplatta. I övrigt hålls slipern på plats endast genom friktionskraften i upplagen. På belastningscyllindern finns en lastgivare. Uppställningen är gjord så, att det finns möjlighet att prova två slipershalvor samtidigt.

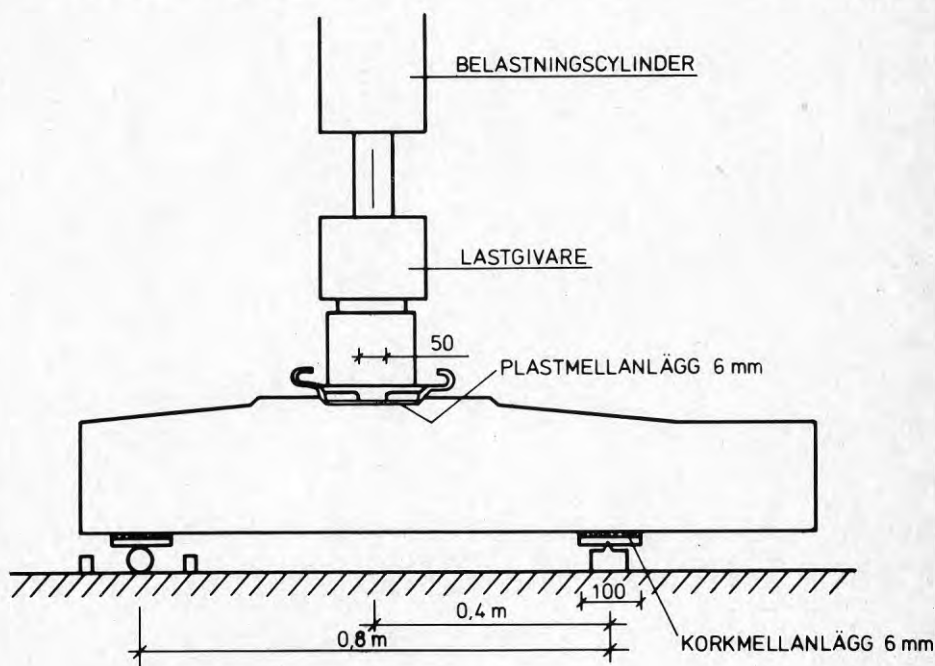


Fig 5.1 Försöksuppställning

Som belastningscylinder användes en servohydraulisk belastningscylinder av märket Instron. Maximal möjlig last vid statisk belastning är 270 kN och vid dynamisk belastning 220 kN. Maximal slaglängd är 400 mm.

Maximalt möjlig frekvens beror på rörelseamplituden och är \approx 5 Hz vid en rörelseamplitud på ± 1 mm.

Belastningscylindern kan med hjälp av elektronisk kringutrustning styras efter last, förskjutning eller töjning och kan fås att variera efter en i princip godtycklig kurvform. Systemet innehåller gränsvärdesfunktioner som kan stanna cylindern, slå av oljetrycket eller dylikt om en gräns uppnås.

Lasten mättes (och styrdes) med en elektronisk 500 kN lastgivare. Nedböjning, töjning och sprickbredd mättes både på mekanisk och elektronisk väg, vilket redovisas närmare i följande kapitel.

Fig 5.2 visar en översiktspild av provningsplatsen.

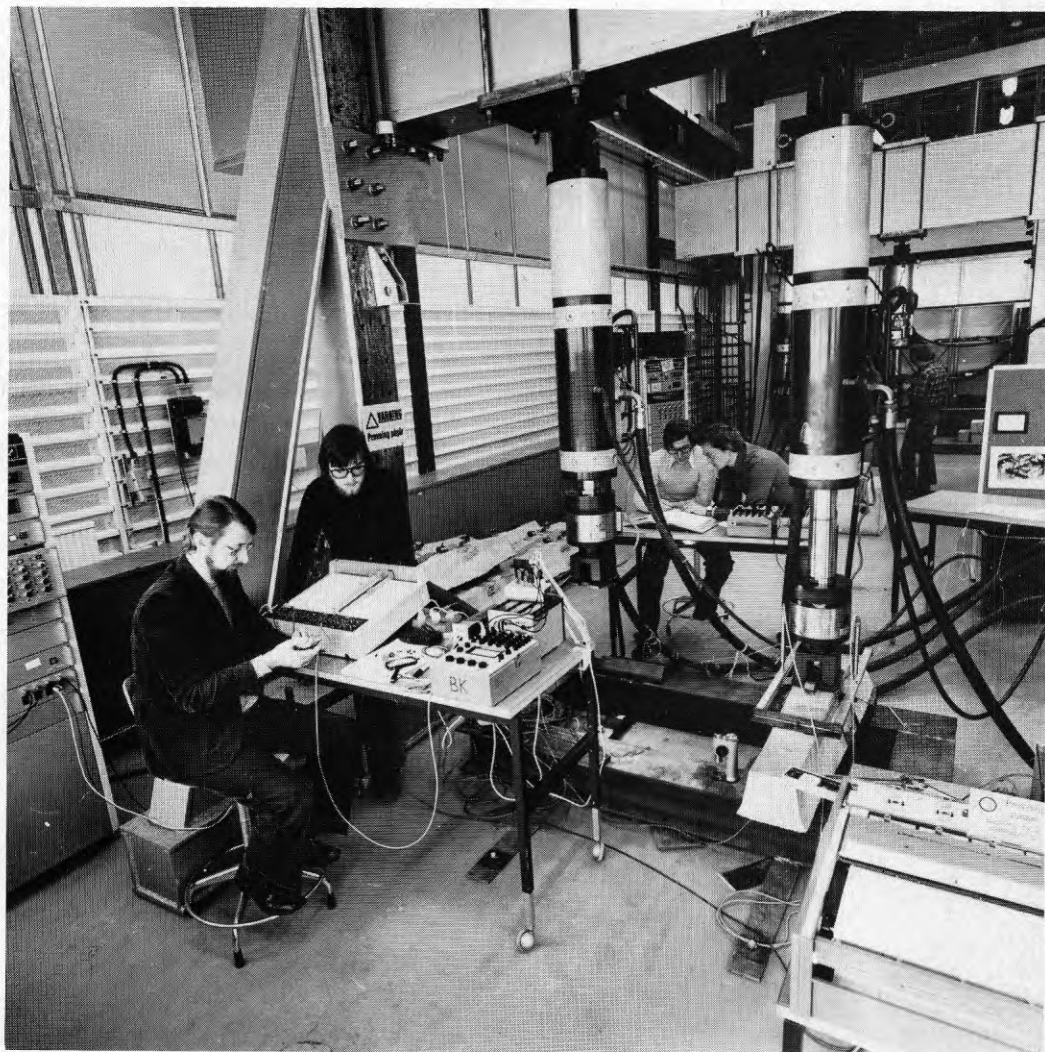


Fig 5.2 Översiktsbild över försöksutrustningen.
Ett statistiskt belastningsprov pågår.

6. GENOMFÖRANDE

Försöksuppställningen visas i fig 6.1.
Försöken genomfördes i laboratoriemiljö. Tvär-
snittsstorheterna uppmättes stickprovsmässigt
och jämfördes med nominella värden, se kap 4.

Pålastningen gjordes både vid de statistiska för-
söken och vid utmattningsförsöken genom last-
styrning. Lasten mättes med en elektrisk last-
givare, som i sin tur påverkade elektroniken
som styrde belastningscyllindern. Vid de statiska
försöken ökades lasten kontinuerligt upp till
brott med en hastighet av i storleksordningen
5 kN/min.

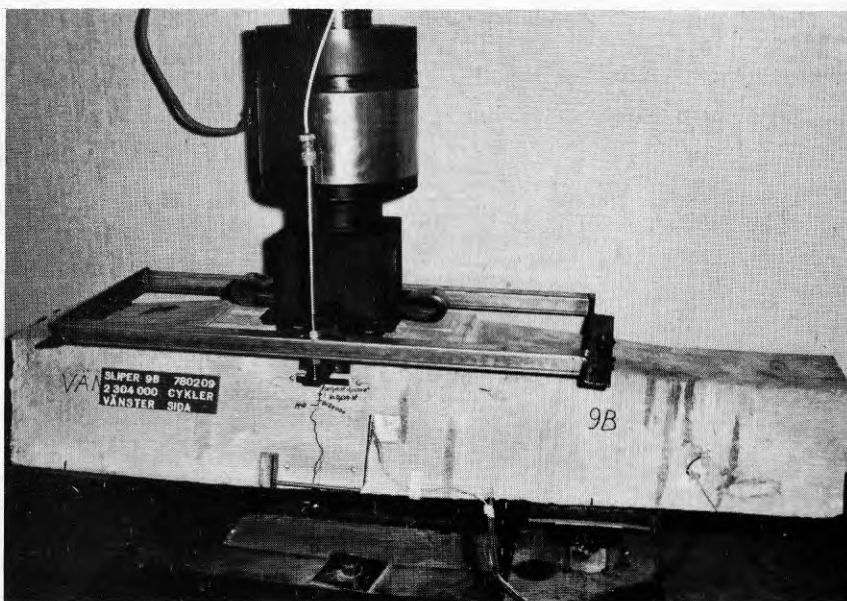


Fig 6.1 Försöksuppställning

Vid utmattningsförsöken gjordes först en pålastning upp till spricklast (omkr 100 kN) varefter belastningen varierades mellan två nivåer efter en sinuskurva (konstantamplitudförsök). Sliper nr 8 B utgör här ett undantag där två belastningsnivåer användes. Minimilasten sattes i flertalet försök till 30 kN. Den valdes så att tryckspänning skulle råda i hela sektionen hos provkroppen vid minimilast. Maximilasten varierades mera för att få en Wöhlerkurva men sattes i flertalet försök till mellan 100 och 120 kN. Belastningsfrekvensen varierade mellan 4 och 18,8 Hz men var vid de flesta försök 6,3 Hz. Detta bestämdes med hänsyn till belastningscylinderns kapacitet och till egenfrekvenser i hela belastningsanordningen.

Utmattningsprovningarna pågick dygnet runt under veckans alla dagar. Gränsvärdesfunktionen i belastningssystemet var inställd så att belastningscylindern **stoppade** då deformationen (belastningskolvens utslag) uppnådde ett visst gränsvärde. På så sätt avbröts försöken då utmattningsbrott inträffade. Sliparna belastades med mellan 5 000 och $20 \cdot 10^6$ lastväxlingar. En sammanställning av vissa uppgifter beträffande påförd belastning vid utmattningsförsöken finns i tabell 6.1

Tabell 6.1 Sammanställning av påförd belastning
vid utmattningsförsöken

Prov nr	Belastningsnivåer	Belastningsfrekvens
	F kN	f Hz
(1)	(2)	(3)
1 B	10 - 130	7,0
2 B	10 - 70	18,8
3 B	a)	
4 B	30 - 100	6,3
5 B	30 - 100	6,3
6 B	30 - 110	6,3
7 B	30 - 110	6,3
8 B	30 - 110, 30 - 120 ^{b)}	6,3
9 B	30 - 120	6,3
10 B	30 - 110	6,3
11 B	30 - 150	6,3
12 B	30 - 170	4,0
13 B	30 - 190	4,0
14 B	30 - 210	4,0

a) Försöket avbrutet i slutskedet p g a tekniskt fel
i belastningsutrustningen

b) 30 - 110 kN under $12,62 \cdot 10^6$ lastväxlingar och där-
efter 30 - 120 kN till brott

Nedböjningar, töjningar och sprickbredder mättes mekaniskt och elektriskt, se kapitel 7.

På prov 1 A gjordes mätningar på linornas eventuella inglidning i slipersändarna. Mätningarna utfördes med mätur graderade i 1/1000 mm. Mätturen anbringades mot betongytan i slipersändarna och mätte mot mittråden i linorna. Emellertid kunde ingen signifikant inglidning av linan registreras före brott. (Detta kan vara naturligt eftersom vidhäftningsbrott i denna sliper endast inträffade som sekundärbrott).

Sprickor och sprickbildning registrerades bl a med hjälp av ett ljusmikroskop med 20 ggr förstoring. Försök att på sliper 8 B använda ultraljudteknik för att upptäcka sprickbildning misslyckades. Detta torde bero på svårigheten att anbringa de båda mätsonderna på ett sådant sätt att ljudvågorna ej i huvudsak följde armeringen.

Vid avslutad belastning undersöktes vilka linor som hade gått av genom en mätning av resistansen mellan linornas ändar. Denna metod var dock något osäker då ibland endast vissa av linans sju lintrådar hade erhållit brott. En rätt god bild av vilka grupper av linor som brustit kunde dock erhållas.

Sliper 7 B slogs sönder efter provning och linornas brottytor studerades. På en lintråd på en av de undre linorna såg ytan ut som om ett utmattningsbrott hade ägt rum (en slät yta). De andra ytorna hade en grövre yta där troligen ett statistiskt "restbrott" hade inträffat.

Några av de utmattningsbelastade sliperarna erhöles ej utmattningsbrott (genomlöpare). Dessa provades då statistiskt till brott (efter utmattningsbelastningen). Detta gäller prov nr 2B, 4B och 5B.

Flera av de mätningar som utfördes under belastningsprovningen fordrade att pålastningen stoppades vid själva mätningen. Detta gällde främst de mekaniska mätningar som utfördes. Vid de statiska försöken gjordes mätningarna vid varje belastningssteg på cirka 20 kN, (glesare vid låga laster och tätare vid höga laster). Vid utmattningsförsöken utfördes mätningar vid i princip två tillfällen under varje 10-potensökning av antalet lastväxlingar. Vid varje tillfälle gjordes mätningar både vid minlast och maxlast. Dessa mätningar inpassades så att även körning nattetid i stor utsträckning var möjlig.

Vid de båda sist provade sliprarna, där automatiserad mätning utfördes i full omfattning (prov nr 8B och 9B), pågick mätningarna kontinuerligt under hela provningstiden. Här gjordes all mätning och registrering på elektrisk väg. Den skedde helt automatiskt.

En sammanställning av utförda mätningar på olika sliprar finns i tabell 6.2 för de statiska försöken, och i tabell 6.3 för utmattningsförsöken.

Tabell 6.2 Sammanfattning av utförda mätningar för statistiska försök.
(Mätningar i huvudsak)

Mätning	1A	2A	3A	4A	5A	6A	7A	8A	9A	10A	2B ^a	4B ^a	5B ^a
Last, elektrisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nedböjning, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x	x			x		x	x
Nedböjning, elektrisk mätning								x	x		x		
Töjning, betong, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Töjning, betong, elektrisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
Sprickbredd, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Sprickbredd, elektrisk mätning								x	x				

a) Statiska försök utförda efter utmattningsbelastning (genomlöpare)
Sliper nr 11A - 14A provades ej statistiskt

Tabell 6.3 Sammanställning av utförda mätningar för utmattningsförsök.
(Mätningar i huvudsak)

Mätning	a												
	1B	2B	4B	5B	6B	7B	8B	9B	10B	11B	12B	13B	14B
Last, elektrisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Nedböjning, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x			x				
Nedböjning, elektrisk mätning							x	x					
Töjning, betong, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x			x				
Töjning, betong, elektrisk mätning	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
Töjning, spännlina, elektrisk mätning							x	x					
Sprickbredd, mekanisk mätning	x	x	x	x	x	x			x				
Sprickbredd, elektrisk mätning						x	x	x	x				

a) Prov nr 3B avbrutet

7. MÄTMETODER OCH MÄTINSTRUMENT

I detta avsnitt beskrivs de viktigaste av de metoderna och instrument som användes vid mätningarna.

7.1 Last

För mätning av last användes en elektrisk lastgivare av märket Instron, med kapaciteten 500 kN. Givaren satt fast monterad på belastningscylinderns kolvstång. Elektroniken till givaren var inbyggd i belastningssystemets elektronik. Givarens utslag kunde registreras med en digital voltmeter eller med skrivare. Felet i avläst mätvärde var cirka 1,2%.

7.2 Nedböjning

Nedböjningen mättes på vissa sliprar på mekanisk väg med mätklockor och på vissa sliprar på elektrisk väg med förskjutningsgivare. De mätklockor som användes var av märket MAKO. De hade en slaglängd på 50 mm, och var graderade i 100-dels mm. Klockorna fästes i en särskild rigganordning med magnetfötter och placerades ovanpå respektive sliper. En mätklocka placerades ovanpå vardera upplaget och två mätklockor placerades ovanför fältmittsnittet (en på varje sida om slipern).

Den nedböjning som skulle uppmätas var liten, en bråkdel av en mm, varför vissa svårigheter vid användningen av denna metod fanns. Önskade rörelser i provkroppen och i klockornas fastsättningsanordningar orsakade i vissa fall störningar i mätningarna. Detta var särskilt uttalat vid utmattningsförsöken.

Till nedböjningsmätningarna på elektrisk väg användes två förskjutningsgivare av differentialtransformatortyp. De två givarna var fästade i en stålram som i sin tur var fastsatt i slipern ovanför upplagspunkterna. Givarna anbringades mot provkroppen i fältmittsnittet, se fig 6.1.

Givarna var av fabrikat Schaevitz och hade en slaglängd på 50 mm. Signalen från givarna registrerades på en skrivare. Vid de statistiska försöken användes en x-y-skrivare, Servogor, och vid utmattningsförsöken en "tidsskrivare" av märket Watanabe. Även medelvärdet av signalerna från de båda givarna registrerades. Nedböjningen mättes på detta sätt med en ungefärlig noggrannhet av 1%.

7.3 Töjning och sprickbredd

Mätning av töjningar (i sliprarnas längdriktning) och sprickbredder gjordes både på mekanisk och elektrisk väg. Töjningen erhöles vid försöken dels genom direkt yttöjningsmätning (pålimmade trådtöjningsgivare) och dels genom mätning av förskjutningen mellan två punkter på ett visst avstånd (mätlängd) från varandra. Sprickbredden bestämdes genom att mäta förskjutningen mellan två punkter, en på vardera sidan om sprickan. (Härvid försummas de elastiska töjningarna i betongen inom mätområdet.)

Till de mekaniska mätningarna av töjningar och sprickbredder i betongen användes en förskjutningsgivare av fabrikat Staeger. Mätningarna gjordes på betongytan mellan fastlimmade mätpunkter med ett inbördes avstånd av 100 mm. Mätningar gjordes på sliprarnas båda sidor i nivå med den övre och den nedre linan (gäller linornas nominella placering). (På den nedre nivån mättes efter uppsprickning sprickbredden).

Vid de första statiska försöket (prov nr 1A) mättes töjningarna längs hela provkroppens längd. Resultatet av dessa mätningar visade att den huvudsakliga töjningen skedde i spricksnittet (fältmitt), se kap 8. På de efterföljande sliprarna mättes därför endast töjningarna i fältmittsnittet.

Maximalt mätbar förskjutning med denna mekaniska mätmetod var 1 mm (10 000 μ strain) och noggrannheten i instrumentet var $\pm 0,5 \mu\text{m}$ ($\pm 5 \mu\text{strain}$). Avläsningsfelet kunde uppgå till $\pm 5 \mu\text{strain}$ (på mätlängden 100 mm). Det sammanlagda mätfelet var således omkring 10 μstrain . Vid utmattningsförsöken var uppmätt töjningsvidd endast omkring 100 μstrain i sliperens ovankant (i nivå med övre linlagret) och omkring 500 μstrain i underkanten (undre linlagret). Detta innebär att noggrannheten var $\pm 10\%$ för uppmätt betongtöjning och $\pm 2\%$ för sprickvidden. Noggrannheten vid de statiska försöken var av samma storleksordning.

De elektriska mätningarna av töjningar gjordes med pålimmade trådtöjningsgivare. På betongen användes givare av märket HBM typ LP21 (givarstorlek 0,5·60 mm). De limmades med ett tvåkomponentlim X60S (beteckning enligt ELIT [8]). Mätningar med denna metod gjordes i samma punkter som för de mekaniska mätningarna. Därför valdes givarlängden till den maximala standardlängd som fick plats mellan de mekaniska mätningarnas mätpunkter (c/c 100 mm). På sliper nr 8 och 9 limmades också trådtöjningsgivare precis vid sliperens ovankant (9 mm under överytan).

För mätning av töjningar i spännlinorna limmades vid två av utmattningsförsöken (sliper nr 8B och 9B) trådtöjningsgivare (egentligen folietöjningsgivare) på de två undre spännlinorna. En givare per lina sattes dit i fältmittsnittet (på linans "undersida"). Detta gjordes vid produktionen av sliprarna och skedde efter linornas uppspänning.

Mycket smala givare användes, HBM typ LY51 (givarstorlek 0,4·3,0 mm), så att givarna fick plats på en av de ingående trådarna i linan. Vid appliceringen användes ett enkomponentlim Z70 (beteckning enligt ELIT). Givarna fuktskyddades med ett täckmedel AK22 (beteckning enligt ELIT) av modellerbar konsistens. Slutligen lindades hela mätstället med isoleringsband av plast. Den elektriska anslutningen gjordes med 4 st enkelledare per givare.

Mätningarna registrerades vid de statistiska försöken med en töjningsindikator av märke märket Peekel. Detta var en bryggförstärkare av bärfrekvenstyp. Vid utmattningsförsöken registrerades mätvärden på UV-skrivare, (där det skrivande organet är en ljusstråle). Delvis användes en Honeywell med 8" pappersbredd och delvis en ABEM med 12" pappersbredd. Antalet registrerande kanaler var 6 respektive 8 st. Som enheter mellan givarna och UV-skrivarna användes bryggförstärkare (bl a av fabrikat HBM).

De faktorer som påverkar mätfelets storlek vid töjningsmätningar med trådtöjningsgivare är bl a toleransen i givarens resistans och givarfaktor, hysteres i givaren, kalibreringsfel, temperaturinverkan, krypningar i limfogen, onoggrannhet i den registrerande elektroniska utrustningen, samt avläsningsfel. En bedömning av storleksordningen på dessa mätfel ger ett totalfel på cirka 3% för de statistiska försöken och cirka 4% för utmattningsförsöken. Skillnaden beror främst på olika noggrannhet i den registrerande elektroniska utrustningen.

Vid utmattningsförsöken utsattes trådtöjningsgivarna för en töjningsvidd på omkring 600 μ strain vad gäller de mest utsatta betonggivarna och cirka 1 000 μ strain vad gäller givarna limmade på spännlinorna. Antalet lastväxlingar var i regel mindre än 10^7 .

Givarfabrikanten anger en nollpunktsdrift mindre än 30 μ strain vid en töjningsvidd på 2 000 μ strain och antal lastväxlingar större än 10^7 . Givarna var således gjorda för att kunna uthärda här aktuell utmattningspåverkan.

Elektrisk mätning av sprickbredden i betongen gjordes med en speciell bladfjäderanordning, se fig 7.1.

I princip bestod anordningen av en bladfjäder av stål på vilken trådtöjningsgivare var limmade. Anordningen limmades fast på slipern så att de båda fastsättningspunkterna hamnade på ömse sidor om sprickan. Vidgningen av betongsprickan påverkade töjningen i bladfjädern, och därmed de på bladfjädern pålimmade givarna. Denna mätning utfördes på sliper nr 6B, 7B, 8A och B, 9A och B och gjordes på en nivå 20 mm under det undre linlagret. På sliper 6B och 7B mättes endast ena slipersidan medan båda mättes på de övriga sliparna.

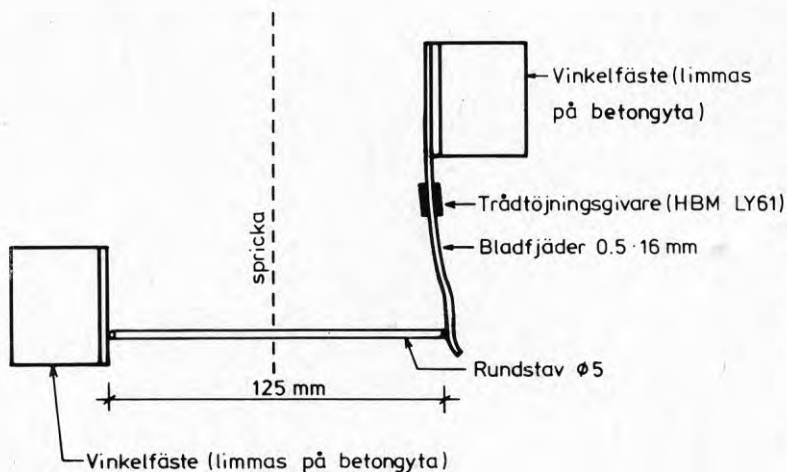


Fig 7.1 Bladfjäderanordning för mätning av sprickbredd

Anordningen kalibrerades före och efter mätningarna med hjälp av en mikrometerskruv. Noggrannheten i mätningarna påverkas av samma faktorer som påverkar noggrannheten i trådtöjningsgivarmätningarna. En faktor som dessutom kan inverka är de materialförändringar som kan ske i bladfjädern vid upprepad belastning. En uppfattning om det totala felet kan erhållas från den kalibrering som gjordes före och efter mätningarna. En skillnad på mellan 2-8% av sprickbredden kunde konstateras. Givarna blev "vekare", dvs samma mätresultat före och efter provning betydde i verkligheten 2-8% större sprickbredd efter provningen jämfört med före. Givarna utsattes mellan kalibreringarna för cirka $2-2,5 \cdot 10^7$ lastväxlingar med en töjningsvariation på cirka 60-80 μ strain vilket är mindre än de krav som ställs på givarnas utmattningsegenskaper, se ovan. Eftersom töjningsvariationen är liten kan emellertid även en liten nollpunktsavdrift orsaka rätt stora procentuella variationer.

Som en ytterligare "sprickbreddsmätare" inlades vid tillverkningen i sliper 8B och 9B en 500 mm lång stålstång "silverstål", $\phi 5$ på vilken trådtöjningsgivare var pålimmade (2 st i mittnitt). Stången placerades mitt emellan de två undre linorna och var förankrad med ändkrokar i båda ändarna och isolerad längs hela sin längd med isoleringsband för att upphäva vidhäftningen längs stången. Det som mättes var således förskjutningen mellan stångens båda ändpunkter vilket approximativt var lika med sprickbredden. Stålet var ett slipat rundstål (silverstål) från Sandvik och materialets 0,2-gräns var 540 N/mm^2 och brottgränsen var 740 N/mm^2 . Pålagd spänningsvariation vid utmattningsförsöken var cirka 80 N/mm^2 och maximi-spänningen var cirka 100 N/mm^2 .

Gemensamt för de båda elektriska sprickbredds-
mätningarna, "bladfjäders" och "silverstålet"
var att de innehöll trådtöjningsgivare vars
resistansändring skulle registreras. Denna
registrering gjordes vid utmattningsförsöken
på samma sätt med bryggförstärkare och skriva-
re som ovan beskrivits för töjningsmätningarna.
Vid de statistiska försöken användes en X-Y1-Y2-
skrivare av märket Hewlett-Packard.

7.4 Jämförelse mellan mekaniska och elektriska mätmetoder

En jämförelse mellan mekaniska och elektriska
mätmetoder görs i fig 7.2 - 7.4. I fig 7.2 jäm-
förs töjningsmätningar på betong utförda dels
med trådtöjningsgivare och dels med mekaniska
givare, för några sliprar.

Summan av mätfelen för de båda mätmetoderna kan
enligt tidigare uppskattas till $10 + 3 = 13\%$ vid
de statistiska mätningarna. Differensen i fig 7.2 a
är också följdriktigt mindre än detta. Maximala
mätfelssumman vid jämförelsen enligt fig 7.2 b
och fig 7.2 c kan enligt tidigare uppskattas till
 $2(10 + 4) = 28\%$ respektive $10 + 4 = 14\%$. Detta
underskrids klart åtminstone i fig 7.2 b. All-
mänt sett är töjningarna små i den här aktuella
mätpunkten (cirka 100 μ strain) vilket kan för-
klara de relativt stora avvikelserna mellan de
båda mätmetoderna.

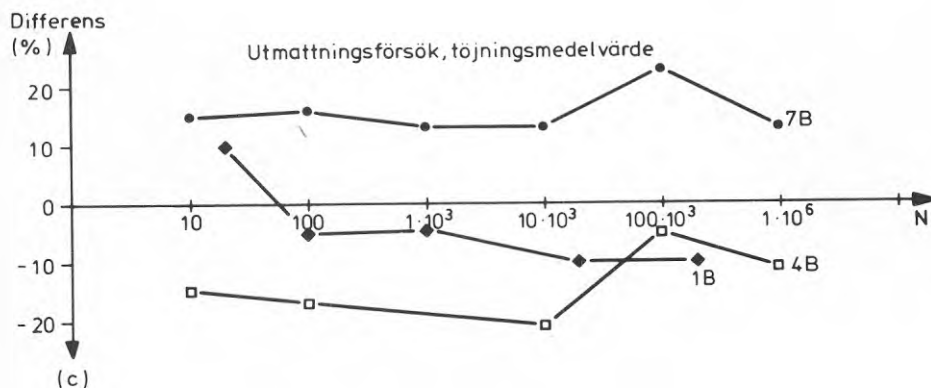
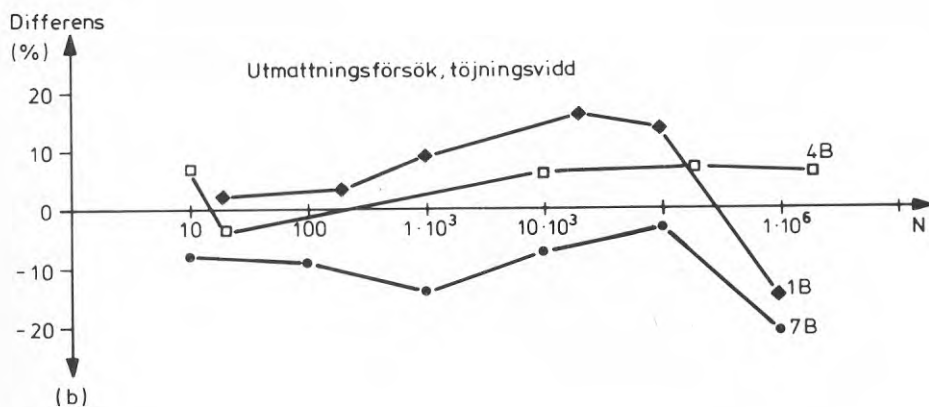
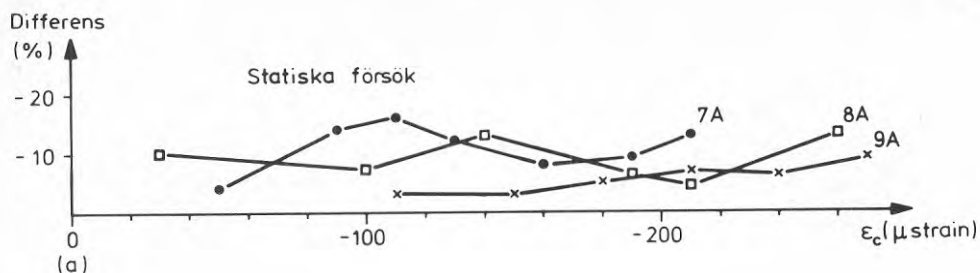


Fig 7.2 Jämförelse mellan töjningsmätningar på betong. Skillnad i mätresultat vid mätning med trådtöjningsgivare och mekanisk mätning, uttryckt i procent av mätvärde för mekanisk mätning. Fig (a) avser statiska försök på sliplarna nr 7A, 8A och 9A vid olika töjningar (ϵ_c). Fig (b) och (c) avser utmattningsförsök på sliplarna nr 1B, 4B och 7B vid olika antal lastväxlingar (N). Fig (b) avser töjningsvidden och fig (c) töjningsmedelvärdet. Figurerna gäller en av mätpunkterna i höjd med övre linlagret.

I fig 7.3 visas relationen mellan sprickbreddsmätningar mätt med den speciella elektriska sprickbreddsmätaren (bladfjäders) och med mekanisk givare vid två statistiska försök, sliper 8A och 9A. Differensen på i medeltal cirka 7% kan förklaras av att mätningarna görs på något olika nivåer (bladfjäders 20 mm lägre) samt i någon mån av olika mätlängd (125 mm för bladfjäders och 100 mm för den mekaniska mätningen). Att olika mätlängder och nivåer användes berodde på praktiska utrymmeskrav för att kunna utföra mätningarna.

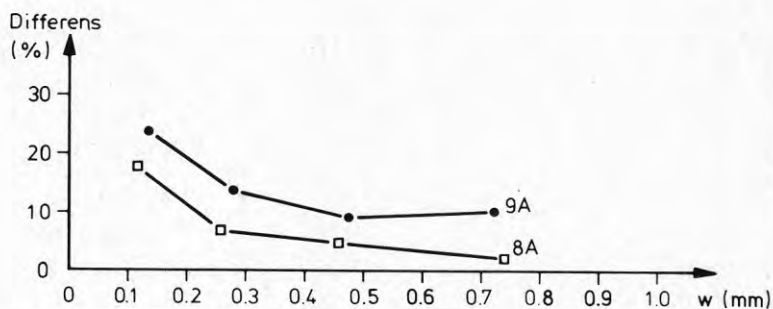


Fig 7.3 Relation mellan sprickbreddsmätningar på betong. Skillnad i mätresultat vid mätning med "bladfjäders" enligt fig 7.1 och mekanisk mätning, uttryckt i procent av mätvärde för mekanisk mätning. Mätningarna avser statistiska försök på sliper nr 8A och 9A vid olika sprickbredder (w). Den mekaniska mätningen är gjord på samma nivå som undre linlagret och bladfjädersmätningen är gjord 20 mm lägre.

I fig 7.4 anges relationen mellan linornas töjning mätt med trådtöjningsgivare och sprickbredden mätt med "bladfjädern". Även en jämförelse mellan sprickbreddsmätningarna med "silverstålet" och "bladfjädern" är inlagd i figuren.

Relationen mellan spännlina och bladfjäder enligt fig 7.4 kan sättas till omkring 0,5. Detta värde skulle kunna användas till att beräkna en fiktiv längd på vilken vidhäftningen mellan lina och betong helt upphört ($125/0,5 = 250$ mm). Detta är dock ej särskilt intressant.

Det kan konstateras både i fig 7.4 a och b att relationen minskar vid ökande antal lastväxlingar. Detta kan förklaras av att den fiktiva längd, på vilken vidhäftningen mellan spännlinan och betongen upphört, ökade under utmattningsbelastningen. En annan bidragande orsak kan vara att töjningshärdning, (ev även i samband med sprickbildning), sker i linan vid givaren, varvid andra delar av linan "övertar" töjningen.

Differensen i sprickbreddsmätvärdena enligt fig 7.4 a kan förklaras av att bladfjädern låg på en nivå 20 mm lägre än silverstålet, samt av eventuellt "glapp" i silverstålets ändkrokar. Den ökade differens som uppträdde vid ökande antal lastväxlingar, kan förklaras av att "glappet" i silverstålets ändkrokar ökade successivt. Töjningshärdning i silverstålet, på samma sätt som i spännlinan, kan också vara en bidragande orsak. För alla tre fallen enligt fig 7.4 gäller att händelseutvecklingen enligt ovan skedde snabbare för sliper nr 9B vilket är naturligt, eftersom pålagd belastning här var högre.

De relationer som anges i fig 7.3 och 7.4 användes i utvärderingsarbetet för att på mätteknisk väg få fram töjningen i spännlinorna i de sliprar där endast mekanisk mätning av sprickbredd utförts.

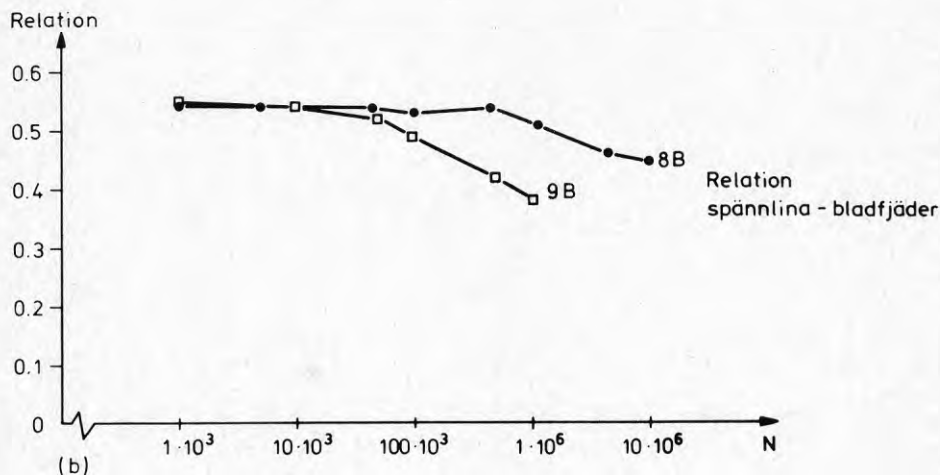
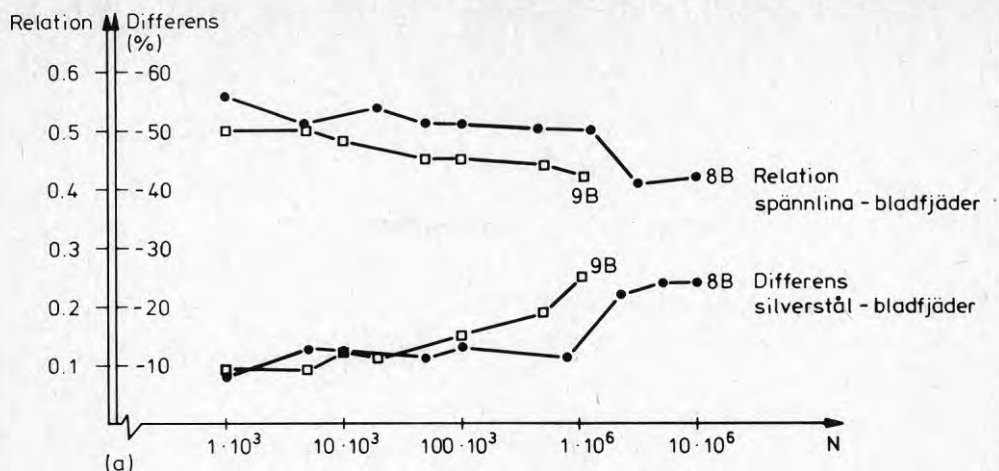


Fig 7.4 Relation mellan töjningar i de undre spännlinorna mätt med trådtöjningsgivare och sprickbredd (omvandlat till töjning på aktuell mätlängd) mätt med "blad fjädern". (Blad fjädern mätningen är gjord på en nivå 20 mm lägre än linorna). Mätningarna gäller utmattningsförsök på sliprarna nr 8B och 9B. Fig (a) avser töjningsvidd och fig (b) avser töjningsmedelvärde vid olika antal lastväxlingar (N).

I fig (a) är även en jämförelse mellan sprickbreddsmätningarna med "silverstål" respektive "blad fjäder" inlagd. Skillnaden mellan mätningarna uttryckt i % av mätvärde för blad fjädern är inlagd för olika antal lastväxlingar (N).

7.5 Allmänna synpunkter

Allmänt sett måste mätmetoderna vid utmattningsprovningar av bl a kostnadsskäl inriktas mot att utföras på ett automatiskt sätt med ett minimum av manuellt arbete. Därför måste elektriska mätmetoder användas. Att använda elektriska lastgivare och förskjutningsgivare för att mäta last respektive nedböjning är väl kända tillvägagångssätt. Denna provning visar också att töjningsmätningar med trådtöjningsgivare fungerar bra även vid utmattningspåverkan på både spännlina och betong.

Den speciella anordning enligt fig 7.1 (bladfjäders) som användes för sprickbreddsmätningen kan säkerligen utvecklas till att uppnå en bättre mät noggrannhet. Ett alternativ till detta kan också vara att använda färdigtillverkade förskjutningsgivare, antingen av samma typ (med bladfjäder) eller av differentialtransformatortyp.

Registreringen av signalen från trådtöjningsgivarna gjordes vid dessa utmattningsförsök med UV-skrivare via bryggförstärkare. Nackdelen med UV-skrivarna är att skriften på det UV-känsliga filmpapperet är relativt ohållbar. Dessutom är papperet relativt kostsamt. En allmän svårighet vid registrering av mätdata på papper är dessutom att utvärderingsarbetet blir mödosamt, särskilt vid utmattningsprovningar som vanligen fordrar stora mängder mätdata.

Ett bättre sätt att registrera mätdata vid utmattningsprovningar är att använda datorer och att registrera mätdata digitalt på ett massminne av typen magnetband, skivminne eller dylikt.

Härvid kan stora datamängder lagras på ett lätt-
hanterligt medium och det fortsatta utvärderings-
arbetet, som ju normalt sker med hjälp av datorer,
underlättas väsentligt. Dessutom kan redan vid
mätningen visst utvärderingsarbete utföras, varvid
möjligheten till övervakning och styrning av prov-
ningsförloppet ökas kraftigt.

8 FÖRSÖKSRESULTAT

8.1 Allmänt

Vid de statiska försöken uppstod vissa brott som betongkrossbrott, vissa som skjuvbrott, och vissa som vidhäftningsbrott. Vid utmattningsförsöken skedde alla brott som linbrott. Fig 8.1 visar exempel på de olika brottyperna. I appendix B visas dessutom utseendet efter brott för samtliga försök. En sammanställning av primära försöksresultat finns för de statiska försöken i tabell 8.1, och för utmattningsförsöken i tabell 8.2.

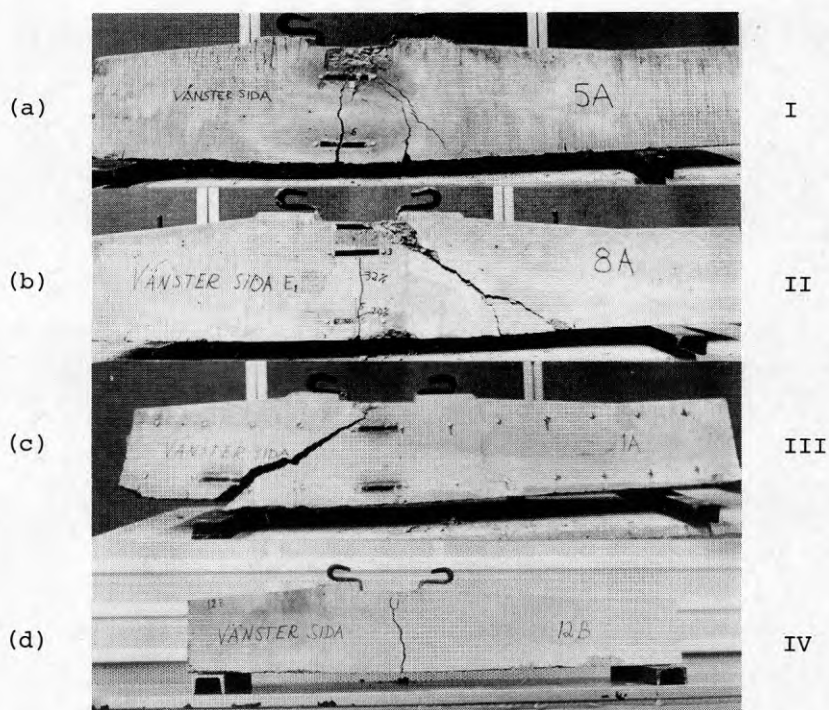


Fig 8.1 Exempel på de olika brottyperna. Betongbrott (a), skjuvbrott (b), vidhäftningsbrott (c) alla vid statiska försök, och linbrott (d) vid utmattningsförsök.

8.2 Primära resultat från statistiska försök

Vid de statiska försöken som redovisas i tabell 8.1 ligger spricklasten på omkring 90 - 100 kN. Detta utgör den last vid vilken en böjspricka i fältmittsnitt först upptäcktes (med hjälp av förstoringsglas). Viss jämförelse kan göras med den "spricklast" på 40 kN som beräkningsmässigt kan framtas genom interpolation mellan beräkningsresultaten i appendix A. Här försummas dock helt betongens draghållfasthet. Dessutom måste ju sprickorna uppnå en viss storlek för att upptäckas. (Ytterligare en beräkning med mindre steglängd omkring 40 kN har gjorts, vilken också bekräftar siffran 40 kN).

En skjvspricka uppstod vid alla de statiska försöken vid en last F på i medeltal 200 kN. Denna utbildade sig vid två försök, nr 3A och 8A till tydliga skjubrott. Vid tre försök, nr 1A, 6A och 7A utbildade sig skjvsprickan på ett sådant sätt att en alltför kort förankringssträcka för spännlinan erhöles, varvid vidhäftningsbrott uppstod vid i medeltal 210 kN. Vid de övriga statistiska försöken nr 2A, 4A, 5A, 9A och 10A inträffade betongkrossbrott vid i medeltal 238 kN, i vissa fall möjligen med störning från den uppträngande skjvsprickan. I samtliga försök inträffade linbrott som sekundärt brott.

I tabell 8.1 finns även redovisat resultaten från de statistiska försök nr 2B, 4B och 5B, vilka tidigare utmattningsbelastats, men som då ej gick till brott, (genomlöpare). Ingen märkbar skillnad i brottlast kunde urskiljas. Detta är i överensstämmelse med tidigare undersökningar som redovisats i litteraturen, se t ex [1]. För våra prov är det särskilt naturligt, eftersom linan var den del som var mest påverkad vid utmattningsförsöken, medan brottet vid de efterföljande statistiska provningarna uppstod som betongkrossbrott respektive skjubrott.

Tabell 8.1 Sammanställning av resultat från statiska försök

Prov	Sprick- ^a last	Sprick- ^b moment	Brott- last	Brott- ^b moment	Brotttyp ^c	Ann
	F_w	M_w	F_u	M_u		
nr	kN	kNm	kN	kNm		
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1A	100	20	190	38	III	Vidhäftningsbrott ^e
2A	90	18	240	48	I	Skjuvspricka vid 190 kN
3A	90	18	246	49	II	"- 237 kN
4A	100	20	240	48	I	"- 170 kN
5A	110	22	255	51	I	"- 210 kN
6A	90	18	215	43	III	"- 190 kN och 215 kN
7A	90	18	235	47	III	"- 190 kN
8A	90	18	240	48	II	
9A	80	16	240	48	I	"- 200 kN
10A	90	18	230	47	I	Betongkross vid 230 kN Skjuvspricka vid 190 kN
2B ^d	-	-	230	46	I	"- 226 kN
4B ^d	-	-	225	45	I	
5B ^d	-	-	240	48	II	"- 235 kN

a Pålagd last då sprickan först upptäcktes (med förstoringsglas)

b $M = Fl/4 = F \cdot 0,2$

c Beteckning: I betongkrossbrott
 II skjuvbrott
 III vidhäftningsbrott
 IV linbrott

d Statiska försök utförda efter utmattningsbelastning (genomlöpare)

e Vidhäftningsbrott uppstod då en skjuvspricka precis slagit upp

8.3 Jämförelse med statistiska beräkningar Modifierad beräkning

Den statistiska beräkningen enligt kap 4 gav till resultat att betongbrott skulle inträffa vid en last $F = 184$ kN för de statistiska försöken. Detta skall jämföras med den medellast (vid betongbrott) på 238 kN som erhöles vid provningen. Denna stora skillnad torde främst stå att finna i att betongspänningen vid brott, p g a treaxligt spänningstillstånd under punktlasten, är mycket högre än de 56 Mpa som angetts i fig 3.1. Den lite speciella utformningen vid rälläget skulle också kunna spela in. Dessutom antyder de töjningsmätningar, som utfördes (se bl a fig 8.4), att betongens brottöjning precis i överkant sektion är högre än de 3,5‰ som antagits i fig 3.1 och i beräkningen i kap 4. Om istället brottöjningen 5‰ hos betongen används och brottspänningen σ_C^{brott} varieras, till beräknad brottlast blir lika med uppmätt brottlast (238 kN vid betongkrossbrott), fås en brottspänning hos betongen på 160 Mpa. Detta innebär en brottspänning på ca tre gånger "kubhållfastheten" vilket dock är en fullt trolig siffra, se [15]. Spännings- töjningssambandet hos betongen antas fortfarande ha formen av en parabel, och får det analytiska sambandet enligt ekv 8.1, (jfr ekv 3.1).

$$\sigma_C = 64,0 \epsilon_C - 6,40 \epsilon_C^2 \quad (8.1)$$

Sambandet gäller det fiktiva fall då omgivande fleraxliga spänningar hela tiden ligger på sin högsta nivå, varför sambandet utgör en övre begränsning. Beräkningsprogram och beräkningsresultat där sambandet enligt ekv 8.1 används, redovisas i appendix A.4 - A.5.

Ovanstående modifierade beräkning ger en beräknad lin-spänning som rätt väl överensstämmer med uppmätt lin-spänning vid utmattningsförsöken, se fig 8.7 nedan.

8.4 Primära resultat från utmattningsförsök

Resultaten från utmattningsförsöken redovisas i tabell 8.2. Alla utmattningsbrott uppstod genom utmattning i spännlinorna. I prov 13B och 14B där maximilasten var 190 kN eller större uppstod emellertid skjavsprickor som dock ej ledde till brott. I prov nr 14B där maximilasten var 210 kN uppstod linbrott på "vänster" sida och betongbrott på "höger" sida. Betongbrottet förmodas dock ha uppstått efter linbrottet. I de flesta utmattningsförsöken uppstod också betongkrossbrott som sekundärbrott p g a att relativt stora deformationer oftast uppstod innan belastningskolven stannade på ett gränsvärde.

Tre prov 2B, 4B och 5B erhöll ej utmattningsbrott (genomlöpare), varvid de belastades statistiskt till brott. Resultatet av detta redovisas i tabell 8.1. I ett försök, nr 8B, ökades maximilasten efter $12,62 \cdot 10^6$ lastväxlingar varvid brott uppstod efter $1,46 \cdot 10^6$ lastväxlingar med den högre lasten.

Tabell 8.2 Sammanställning av resultat från utmattningsförsök

Prov nr	Belastnings- variation		Antal last- växlingar till brott $N \cdot 10^6$	Brotttyp ^a	Anm
	Last F kN	Moment M kNm			
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1B	10-130	2-26	0,48	IV	
2B	10-70	2-14	(20, 21) ^b	-	
3B	c				
4B	30-100	6-20	(10, 55) ^b	-	
5B	30-100	6-20	(10, 55) ^b	-	
6B	30-110	6-22	9,11	IV	
7B	30-110	6-22	2,39	IV	
8B	30-110 ^d	6-22	12,62	IV	
	30-120	6-24	1,46		
9B	30-120	6-24	2,30	IV	
10B	30-110	6-22	2,70	IV	
11B	30-150	6-30	0,0761	IV	Två böjsprickor
12B	30-170	6-34	0,0251	IV	
13B	30-190	6-38	0,0123	IV	Skjuvsprickor
14B	30-210	6-42	0,0054	IV ^e (I) ^f	Skjuvsprickor

a Beteckning I betongkrossbrott
 II skjuvbrott
 III vidhäftningsbrott
 IV linbrott

Sekundär brotttyp anges inom parentes.

b Provet erhöll ej brott vid utmattningsbelastningen. En efterföljande statisk belastning till brott gjordes, se tabell 8.1.

c Försöket avbrutet

d 30-110 kN under $12,62 \cdot 10^6$ lastväxlingar och därefter till brott 30-120 kN

e vänster sida

f höger sida

8.5 Brottets karaktär

Generellt sett anges ofta i litteraturen att utmattningsbrott har karaktären av ett sprött brott, medan statiska brott då skulle ha mera seg karaktär [1]. Detta beror då på att utmattningsbrott i huvudsak inträffar utan föregående plastiska töjningar vid en relativt liten deformation (nedböjning). I stort sett var detta fallet även vid denna undersökning. Fig 8.2a visar att maximal nedböjning till brott vid de statiska försöken var cirka 4-7 mm, medan fig 8.2 b och c visar en maximal nedböjning vid utmattningsförsöken på cirka 2-3 mm.

Allmänt sett kan karakterisering av brottet dock vara något tveksam eftersom även utmattningsförloppet i viss mån kan karakteriseras som "segt". Succesiv spricktillväxt sker ju under relativt lång tid. I här aktuell undersökning skedde det slutliga brottet vid de statiska försöken mycket plötsligt (betongkrossbrott, skjuvbrott eller vidhäftningsbrott). Utmattningsbrottet (linbrott) skedde däremot på ett lugnare sätt. Här började brottet med att en av de ingående trådarna i en lina gick av ("sprött brott"), varvid ett knäppljud kunde höras och deformationen ökade. Allteftersom fler lintrådar gick av ökade deformationen och det slutliga brottet inträffade först efter ett åtskilligt antal ytterligare lastväxlingar. Detta understryker tveksamheten i att karakterisera brotten som "sega" eller "spröda".

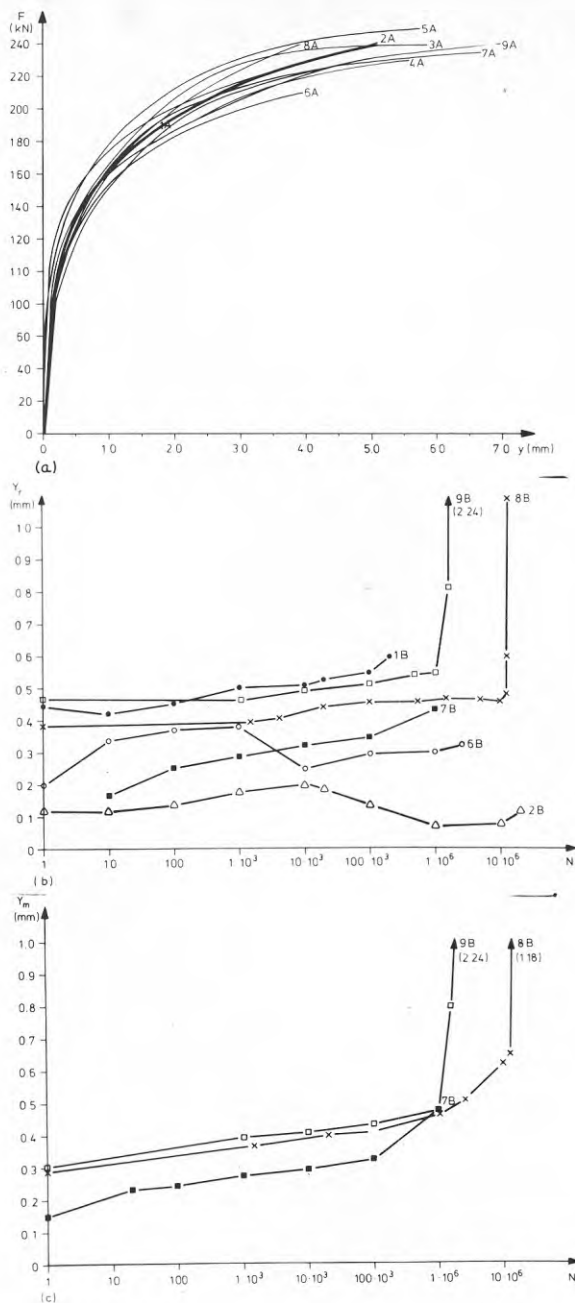


Fig 8.2 Nedböjning. Fig (a) avser nedböjningen vid de statistiska försöken som funktion av lasten. Här har även medelvärdet av alla provkropparna inritats (tjockare streck). Fig (b) och (c) avser utmattningsförsöken där (b) avser nedböjningsvidden y_r (vid lastvariationen) och där (c) avser nedböjningsmedelvärdet y_m för olika provkroppar som funktion av antalet lastväxlingar N . (Vid utmattningsförsöken (b) och (c) uppmättes endast sliper nr 8B och 9B ända till brott).

8.6 Töjningar

Vid det statiska försöket nr 1A uppmättes töjningen längs hela sliperssidan, se även kap 6. Resultatet av mätningarna visas i fig 8.3. Härav framgår att i stort sett all töjning sker i fältmittsnittet, efter det att böjsprickan slagit upp.

En viss uppfattning om töjningsutvecklingen i fältmittsnittet kan erhållas ur fig 8.4, både för de statiska försöken och för utmattningsförsöken.

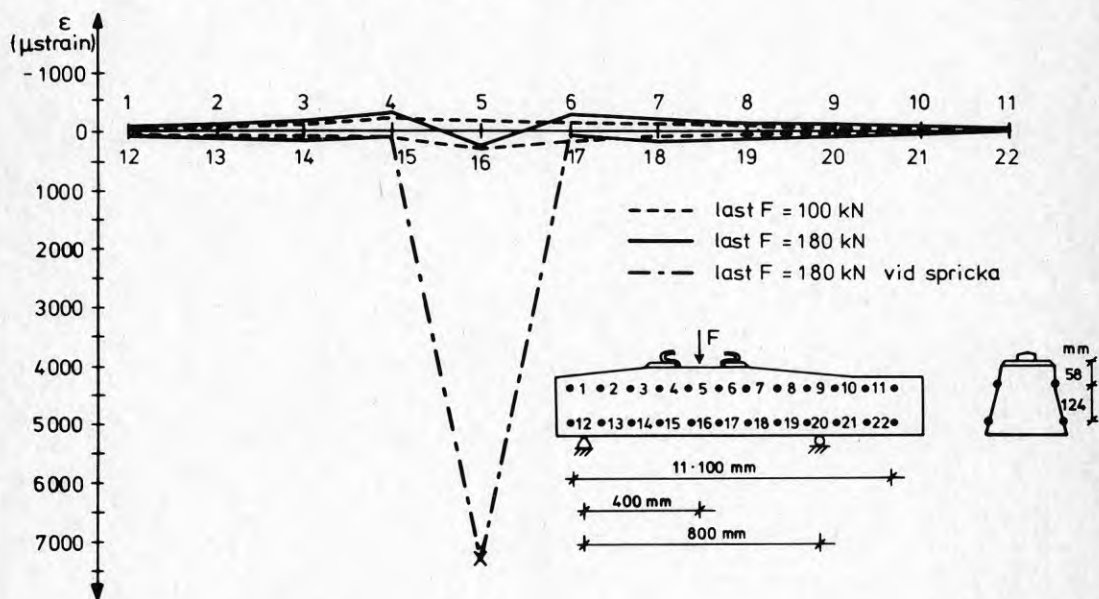


Fig 8.3 Töjning längs slipersidorna vid två lastnivåer $F = 100$ och 180 kN . ϵ avser töjningsmedelvärden för de båda sidorna. De prickstreckade linjerna mellan punkt 15 och 17 markerar att huvuddelen av töjningen sker i själva sprickan.

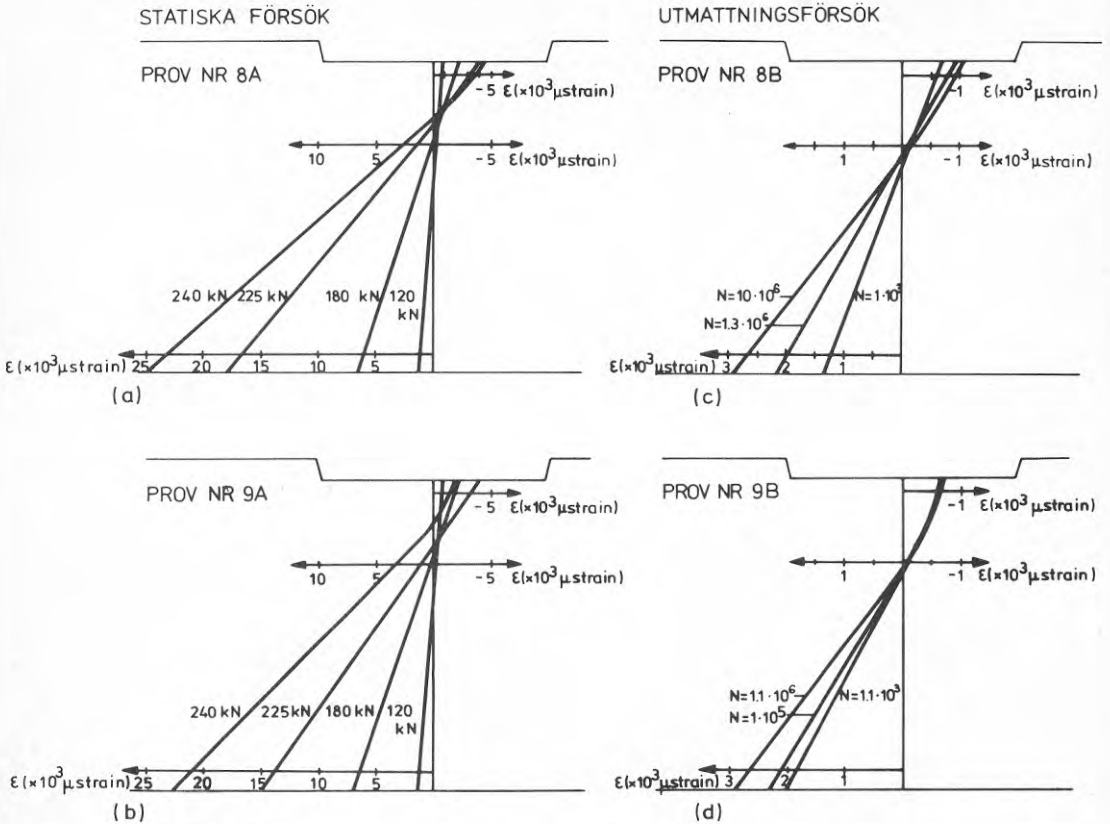


Fig 8.4 Töjningsutvecklingen i fältmittsnittet, (sliper nr 8 och 9). Fig (a) och (b) avser statiska försök vid några lastnivåer och fig (c) och (d) avser utmattningsförsök vid några lastväxeltal. Töjningen av förspänningskraften är ej medtagen. Töjningen är mätt på tre nivåer, den övre med trådtöjningsgivare, den mittre (vid övre linlagret) med mekanisk givare, och den nedre med bladfjäder (se kap 7). Töjningen på de två nedre nivåerna avser förskjutning på en viss mätlängd varför direkt koppling till töjningen ej kan göras. Observera att skalan är olika i fig a-b respektive c-d. (I fig (b) har betongen i överkanten börjat krossas på ena sidan vid 230 kN.)

I fig 8.5 anges töjningen i både betongen och linan under utmattningsförloppet. Huvudtendensen är att töjningsvidden är relativt konstant medan töjningsmedelvärdet stiger p g a plastisk deformation.

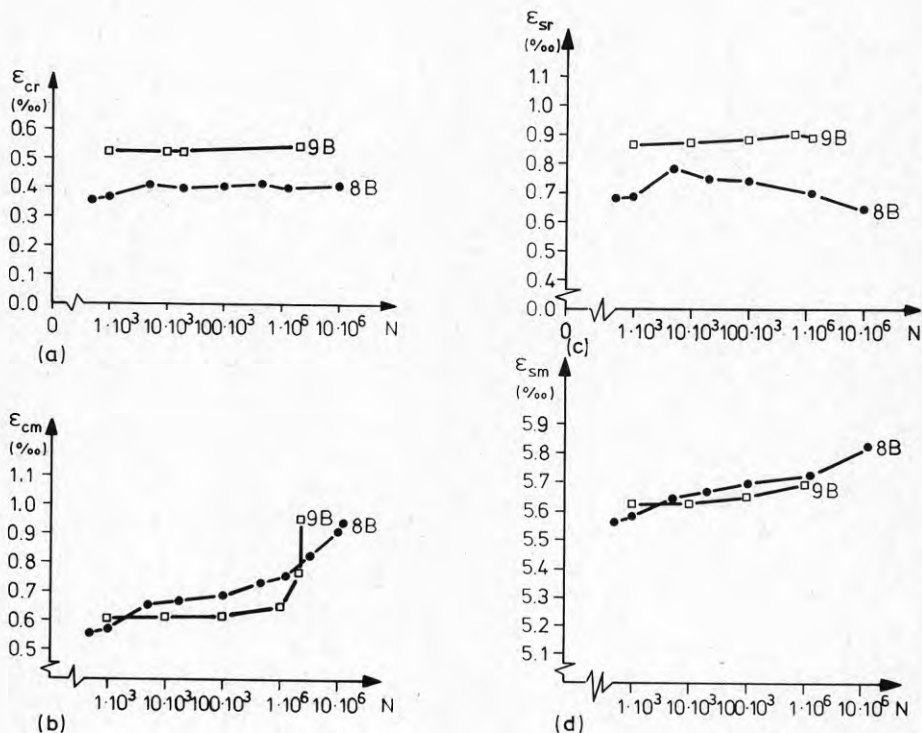


Fig 8.5 Uppmätt töjning på betong och lina under utmattningsförloppet för prov nr 8B och 9B (fältmittsnitt). Fig (a) anger töjningsvidden och fig (b) töjningsmedelvärdet för betongen i överkant (9 mm under). Fig (c) anger töjningsvidden och fig (d) töjningsmedelvärdet för linan (i undre linlagret). Mätningarna är utförda med trådtöjningsgivare limmade direkt på respektive material.

8.7 Spänningar

Allmänt kan spänningen i en konstruktion bestämmas, genom att bestämma töjningen samt spännings- töjnings-sambandet. Spännings- töjningssambandet måste bestämmas i en konstruktion där spänningsfördelningen av yttre last är enkel och väldefinierad. Så är emellertid inte fallet vid dessa slipersförsök. Generellt är dessutom kunskapen både om betongens och om linornas spännings-töjningssamband vid utmattning rätt begränsad [1].

Vad gäller utmattningsförsöken i denna undersökning har därför som en förenkling antagits att maximispänningen i betongen och i linorna är konstant under utmattningsförloppet med konstanta yttre belastningsnivåer. Dessa maximispänningar bestäms vid utmattningsförsökets början där det "statiska" spännings- töjningssambandet approximativt gäller. Minimispänningen bestäms genom att spänningsvidden rätt väl kan bestämmas. Här inverkar ju ej plastisk töjning. Detta förutsätter dock att "elasticitetsmodulen" är känd under hela förloppet. Denna förutsätts i denna undersökning vara approximativt konstant, vilket grovt sett styrkts av Aas-Jakobsen [9] för betongen och av Abeles et al [10] för linorna. Uppmätt töjningsvidd är enligt fig 8.5 relativt konstant både för betongen och stålet, varför även minimispänningen antas vara konstant under hela utmattningsförloppet. De plastiska deformationer som uppstår både i betongen och i linorna (samt den succesiva vidhäftningsupphävningen mellan lina och betong under utmattningsförloppet) skulle således ej inverka märkbart på spänningsnivåerna, utan endast ge upphov till succesivt ökande sprickbredder och nedböjningar i provkropparna.

I fig 8.6 anges den i tvärsektionen maximala betongspänningen som funktion av yttre last. Uppmätt kurva för de statiska försöken nr 8A och 9A har inlagts. Uppmätningen har gjorts med trådtöjningsgivare som var placerade med centrum 9 mm under sliprarnas överkant.

För övergång från töjning till spänning har sambandet enligt fig 3.1 använts, (vilket baserar sig på provtryckning av betongkuber). Därför har endast uppmätta töjningsvärden upp till 3,5⁰/₀₀ inritats i fig 8.6. (Maximalt uppmättes emellertid en töjning på upp till 4,0 ⁰/₀₀ vid lasten 235 kN.) I fig 8.6 har även uppmätta värden för utmattningsförsöken vid minimi- och maximilast inritats. Dessa värden är framtagna i enlighet med ovanstående förenklade antagande. Differensen mellan minimilastvärdena (vid 30 kN) uppmätta vid utmattningsförsöken och den uppmätta kurvan för de statistiska försöken står att finna i att betongen är uppsprucken i dragzonen vid utmattningsförsöken (men ej vid de statistiska försöken). Dessutom kan ej sprickan sluta sig helt vid avlastning p g a att viss icke återgående förskjutning mellan lina och betong har skett samt ev mellanliggande "gruskorn", vilket åstadkommer en viss kvarvarande spänning. (Minimilasten innebär tryckspänningar även i sektionens underkant.) I fig 8.6 är också beräknad kurva enligt kap 4 inlagd. Överensstämmelsen mellan beräknad kurva och uppmätta kurvor är mindre bra. Formen på kurvorna stämmer dock bra överens. Om således beräkningen modifierades så att beräknad töjning vid verklig (provad) brottl原因 överensstämde med uppmätt töjning, så skulle bra överensstämmelse erhållas. Detta har gjorts i avsnitt 8.3, varvid som max-töjning har använts värdet 5,0 ⁰/₀₀. Detta värde hade sannolikt erhållits, om uppmätning precis i ovankanten och vid brottl原因 hade kunnat ske, jfr fig 8.4. Beräkningarna enligt avsnitt 8.3 gav en brottspänning på 160 Mpa för att jämviktsvillkoren för sektionen skulle vara uppfyllda. Detta är således främst orsakat av treaxliga spänningar under punktlasten, och innebär att värdena längs ordinataxeln i fig 8.6 egentligen skulle multipliceras med faktorn 3, ($\approx 160/56$ Mpa). Dock får värdena på ordinataxeln kvarstå då de representerar mera normala värden på betongspänningarna (utan fleraxligt spänningstillstånd). Dessutom används kurvorna i fig 8.6 i fortsättningen endast för framtagning av relationer mellan spänningar på olika lastnivåer, varför absolutvärdena på ordinataxeln spelar mindre roll.

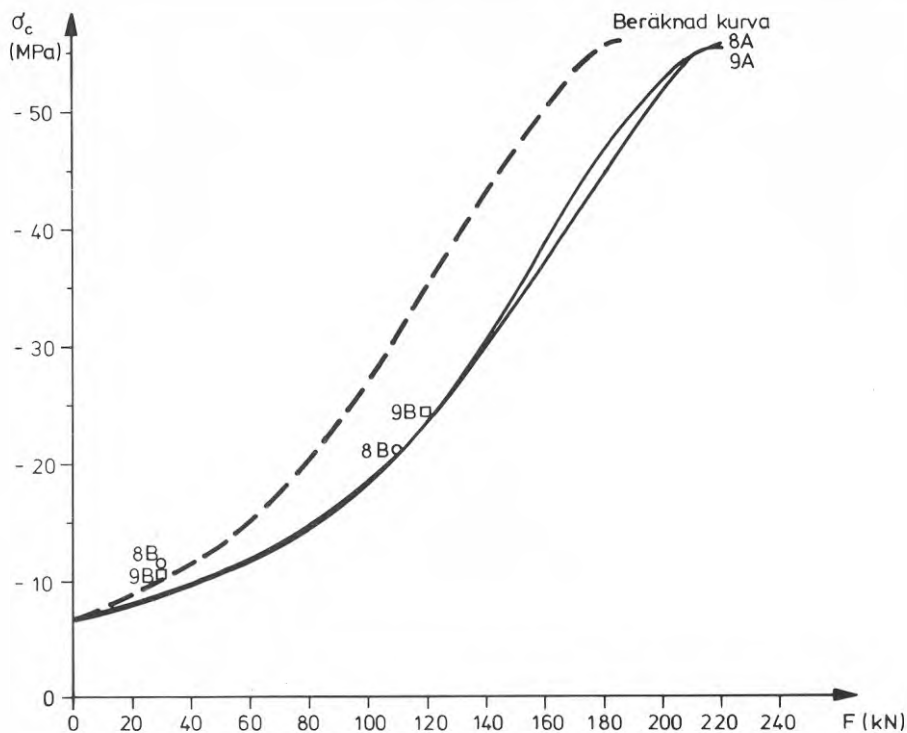


Fig 8.6 Betongspänning (σ_c) vid överkant som funktion av yttre last (F). De statistiska försöken nr 8A och 9A avser uppmätta värden (med trådtöjningsgivare). Spänningen har erhållits genom spänningstöjningssambandet enligt fig 3.1. Uppmätta värden för utmattningsförsöken nr 8B och 9B finns också inlagda. Uppmätningen är gjord med trådtöjningsgivare och har översatts till spänning i enlighet med förenklande antagande enligt avsnitt 8.7. Beräknad kurva enligt kap 4 är inlagd.

I figur 8.7 anges linspänningen (i undre linlagret) som funktion av yttre last. Uppmätta värden för de statistiska försöken nr 1A-9A samt för utmattningsförsöken nr 8B och 9B finns inlagda. Beräknad kurva enligt kap 4 finns inritad. Dessutom är inlagd den modifierade beräkningskurvan enligt avsnitt 8.3. Den modifierade beräkningskurvan är framtagen genom att betongens brottspänning och brotttöjning har justerats till överensstämmelse mellan beräknad och uppmätt brottlast för de statistiska försöken.

Den modifierade beräkningskurvan stämmer väl överens med uppmätta värden för utmattningsförsöken, nr 8B och 9B. Att inte uppmätta värden för de statistiska försöken nr 1A-9A stämmer lika bra, kan förklaras av att betongens draghållfasthet här inverkar. Dessutom är den mekaniska mätteknik som användes i dessa fall något osäker.

En sammanställning av spänningarna i betongen och i linorna för de olika utmattningsförsöken finns i tabell 8.3. Härvid har de uppmätta värden för prov nr 8B och 9B i fig 8.6 och 8.7 använts även för de övriga sliprarna, där lastnivåerna sammanfaller. För övriga försök har, vad gäller betongspänningen, uppmätt kurva i fig 8.6 för prov nr 8A och 9A använts. Vad gäller stålspänningen har modifierad beräknad kurva i fig 8.7 använts (där ej lastnivåerna sammanfaller med 8B och 9B). Observera att värdena på stålspänningen, framtagna vid den modifierade beräkningen, är rätt säkra trots problemet och osäkerheten i samband med fleraxliga spänningar under punktlasten i betongtryckzonen. Kurvan över stålspänningar överensstämmer ju här väl med direkt uppmätta värden på spännlinan för prov nr 8B och 9B. Uppmätningen har då gjorts genom att mäta lintöjningar med trådtöjningsgivare, varefter spännings-töjningssambandet enligt fig 3.2 använts. (Att beträffande betongspänningarna en så hög grad av osäkerhet kan accepteras beror på, att de slutligen endast används för att utreda huruvida utmattning i betongen är aktuell eller ej, se avsnitt 8.8.)

Förhållandet mellan spänningen i linan och antalet lastväxlingar till brott (livslängd), finns uppritad i fig 8.8 (avsnitt 8.8).

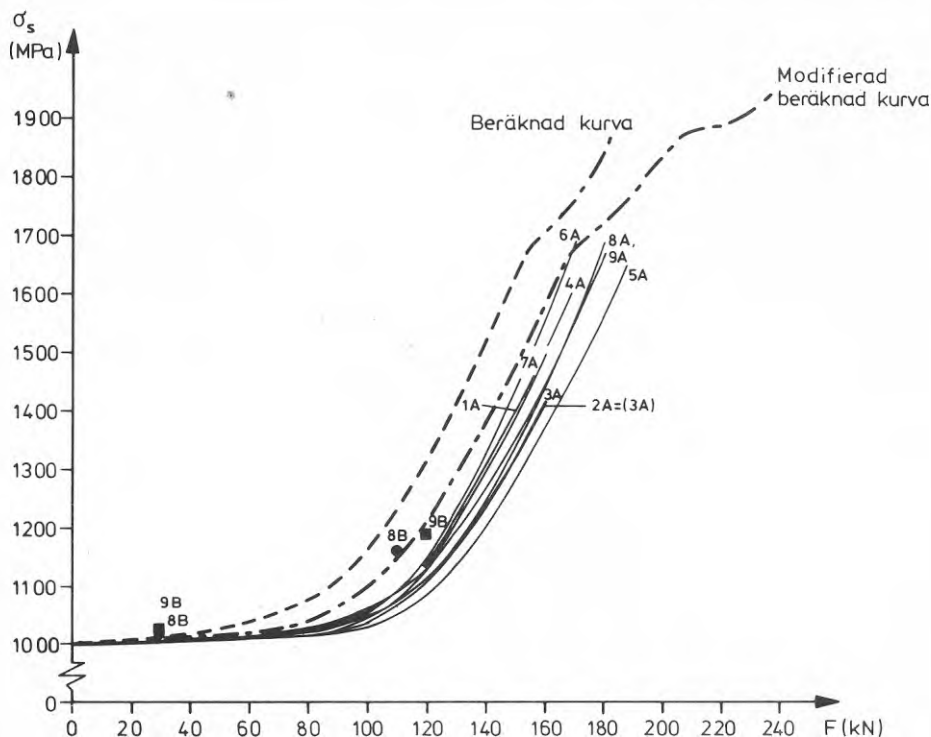


Fig 8.7 Linspänning (σ_s) i undre linlagret som funktion av yttre last (F). De statistiska försöken nr 1A-9A avser uppmätta värden. (Här har mekanisk givare på betongytan använts varvid de relationer som anges i kap 7 har utnyttjats). Uppmätta värden för utmattningsförsöken nr 8B och 9B finns också inlagda. Uppmätningen är gjord med trådtöjningsgivare limmade direkt på linorna och har översatts till spänning i enlighet med förenklande antagande enligt avsnitt 8.7 samt med hjälp av fig 3.2. Beräknad kurva enligt kap 4 och modifierad beräknad kurva enligt avsnitt 8.3 är inlagda.

Tabell 8.3 Spänning i betong och lina vid utmattningsförsöken.
 Värdena avser betongtryckspänning (σ_c) i överkant
 respektive lindragspänning (σ_s) i undre linlagret.

Prov nr (1)	Betongspänning				Linspänning			
	Min $\sigma_{c,min}$ Mpa (2)	Max $\sigma_{c,max}$ Mpa (3)	Vidd $\sigma_{c,r}$ Mpa (4)	Med $\sigma_{c,m}$ Mpa (5)	Min $\sigma_{s,min}$ Mpa (6)	Max $\sigma_{s,max}$ Mpa (7)	Vidd $\sigma_{s,r}$ Mpa (8)	Med $\sigma_{s,m}$ Mpa (9)
1B	7,2	26,6	19,4	16,9	1008	1287	279	1148
2B	7,2	13,0	5,8	10,1	1008	1026	18	1017
3B	a							
4B	9,2	18,5	9,3	13,8	1031	1091	60	1061
5B	9,2	18,5	9,3	13,8	1031	1091	60	1061
6B	9,2	20,5	11,3	14,8	1031	1158	127	1094
7B	9,2	20,5	11,3	14,8	1031	1158	127	1094
8B ^b	9,2	20,5	11,3	14,8	1031	1158	127	1094
	9,2	23,5	14,3	16,4	1031	1193	162	1112
9B	9,2	23,5	14,3	16,4	1031	1193	162	1112
10B	9,2	20,5	11,3	14,8	1031	1158	127	1094
11B	9,2	34,0	24,8	21,6	1031	1475	444	1253
12B	9,2	41,6	32,4	25,4	1031	1669	638	1350
13B	9,2	49,0	39,8	29,1	1031	1773	742	1402
14B	9,2	55,1	45,9	32,2	1031	1875	844	1453

a Försöket avbrutet

b $12,62 \cdot 10^6$ lastväxlingar vid den lägre spänningsnivån och
 $1,46 \cdot 10^6$ vid den högre

8.8 Jämförelse med tidigare undersökningar

Livslängd för spännlina

Alla utmattningsbrotten i sliprarna skedde som brott i spännlinorna. För att emellertid undersöka huruvida utmattning i betongen är aktuell kan ekv 8.2 användas. Här anges livslängden hos betong som funktion av pålagd spänning och av brotthållfastheten. Ekvationen har hämtats från Aas-Jakobsen [9] och är framtagen i överensstämmelse med ett flertal tidigare utmattningsundersökningar på betong.

$$\log N_c = [1,0 - \sigma_{c,max}/f_c] / [0,0634(1,0 - \sigma_{c,min}/\sigma_{c,max})] \quad (8.2)$$

Om de spänningsnivåer, framtagna enligt tabell 8.3, insätts i ekv (8.2) erhålls ett beräknat antal lastväxlingar till betongbrott. Detta redovisas i tabell 8.4 ($\log N_c$). I tabellen finns också uppställt förhållandet mellan verkligt antal lastväxlingar och beräknat antal (kolumn (4)). Här framgår klart att utmattning i betongen för flertalet sliprar ej är aktuell. (Dessutom gäller ekvation (8.2) för centriskt tryckt betong, vilket innebär att beräknad livslängd ($\log N_c$), i någon mån underskattar sliprarnas livslängd).

För försök nr 12 B - 14 B innebär dock ekv (8.2) att betongutmattning skulle kunna vara aktuell. Här ligger emellertid brottspänningen (eller egentligen brottöjningen) rätt nära de värden som angavs i fig 3.1 ($\sigma_c^{\text{brott}} = 56 \text{ Mpa}$, $\epsilon_c^{\text{brott}} = 3,5\%$). Då dessa värden troligen är för låga (se avsnitt 8.3) torde värdena på $\log N$ i tabell 8.4 för försök nr 12 B - 14 B vara behäftade med visst fel, varför de lämnas utan beaktande. Brottets utseende tyder ju dessutom på, att utmattningsbrott i linorna är brottorsaken.

Beträffande osäkerheten i framtagningen av betongspänningarna orsakat av fleraxligt spänningstillstånd under punktlasten hänvisas till diskussion i avsnitt 8.7. Spänningarna grundar sig emellertid på uppmätta töjningar i betongen, och det är endast relationer mellan olika spänningar som insätts i ekv 8.2, vilket gör att spänningarnas absolutbelopp har mindre betydelse. Som grund för brottspänningen f_c har dessutom använts $\epsilon_c^{\text{brott}} = 3,5\%$. Om värdet 5% istället används, (vilket styrks av gjorda mätningar), så kommer faktorn $\sigma_{c,\max}/f_c$ att minska, oberoende av vilken spännings- töjningsrelation som används. Härvid kommer $\log N_c$ att öka, varvid relationen i kolumn (4) i tabell 8.4 minskar, vilket ytterligare minskar faran för utmattningsbrott i betongen.

Frånsett de osäkerheter och ofullständigt genomarbetade frågeställningar som finns på grund av fleraxliga spänningar torde dock svaret på huvudfrågan kunna ges; att utmattning i betongen för flertalet sliprar ej är aktuell.

För utmattning i spännlinorna kan jämförelse göras med en beräkningsformel ekv 8.3 framtagen av Hilmes-Ekberg [13]. Formeln är empiriskt framtagen från en resultatsammanställning, bestående av försöksresultat från både [12] och [13].

$$N_s = [(16,4 f_s - 11,5 \sigma_{s,\min}) / (\sigma_{s,\max} - \sigma_{s,\min})]^{3,125} \quad (8.3)$$

för $40\ 000 \leq N \leq 400\ 000$

$$N_s = [(1,155 f_s - 0,78 \sigma_{s,\min}) / (\sigma_{s,\max} - \sigma_{s,\min})]^{8,67}$$

för $400\ 000 \leq N \leq 4\ 000\ 000$

då $0,4 \leq \sigma_{s,\min}/f_s \leq 0,6$

Beräknat antal lastväxlingar enligt ekv 8.3 ($\log N_s$) samt en jämförelse med verkligt antal lastväxlingar till brott, finns uppställd i tabell 8.4. (Här har således spänningarna enligt tabell 8.3 insatts i ekv 8.3).

Tabell 8.4 Livslängd. Jämförelse med beräknade värden

Prov	Livslängd vid försök	Betong Livslängd enl ekv (8.1)	Betong Förhåll- ande	Lina Livslängd enl ekv (8.2)	Lina Förhåll- ande
nr	log N	log N _c	(2)/(3)	log N _s	(2)/(5)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
1 B	5,68	11,35	0,50	6,33	0,90
2 B ^a	(7,31)	(27,14)	(0,27)	(16,59)	(0,44)
4 B ^a	(7,02)	(21,01)	(0,33)	(12,07)	(0,58)
5 B ^a	(7,02)	(21,01)	(0,33)	(12,07)	(0,58)
6 B	6,96	18,14	0,38	9,24	0,75 ^c
7 B	6,38	18,14	0,35	9,24	0,69 ^c
8 B	7,10	18,14	0,39	9,24	0,77 ^c
	6,16	15,04	0,41	8,33	0,74 ^c
9 B	6,36	15,04	0,42	8,33	0,76 ^c
10 B	6,43	18,14	0,36	9,24	0,70 ^c
11 B	4,88	8,50	0,58	5,21	0,94
12 B	4,40	(5,21)	(0,84) ^b	4,74	0,93
13 B	4,09	(2,43)	(1,68) ^b	4,51	0,91 ^c
14 B	3,73	(0,30)	(12,28) ^b	4,34	0,86 ^c

- a Dessa försök fick ej utmattningsbrott
- b Ej relevant värde, p g a felaktigt σ_c^{brott}
- c Utanför giltighetsområdet för ekv (8.3)

Förhållandet mellan maximispänningen i linorna och antalet lastväxlingar till brott, livslängden, finns inritad i fig 8.8. Maximispänningen är här relaterad till brottspänningen i linan vid engångslast. I figuren finns också inritat resultaten från andra utmattningsundersökningar av spännlina, vid olika minimilaster, (hämtad från [11]). Minimilasten för alla slipersförsöken är approximativt $0,5 \cdot f_s$. Kurvan enligt referens [13] i figuren överensstämmer helt med ekv 8.3.

Försöksresultaten från egna försök (slipersprovningarna) stämmer rätt väl överens med tidigare utförda utmattningsundersökningar, gjorda med samma minimispänning ($0,5 \cdot f_s$), se fig 8.8. Dessa undersökningar (åtminstone [12] och [13]) är också utförda på ingjutna spännlinor. Dock måste viss reservation göras beträffande egna försöksresultat p g a det begränsade antalet försök, varvid den statistiska spridningen i försöksresultaten är en osäker faktor.

Värdena för egna försök i fig 8.8 ligger konsekvent en aning lågt. En tänkbar orsak till detta, skulle kunna vara den vidhäftningsförbättrande "förrostning", som utförs vid tillverkningen av spännlinorna (se kap 3), och som skulle kunna ge viss reduktion av utmattningshållfastheten).

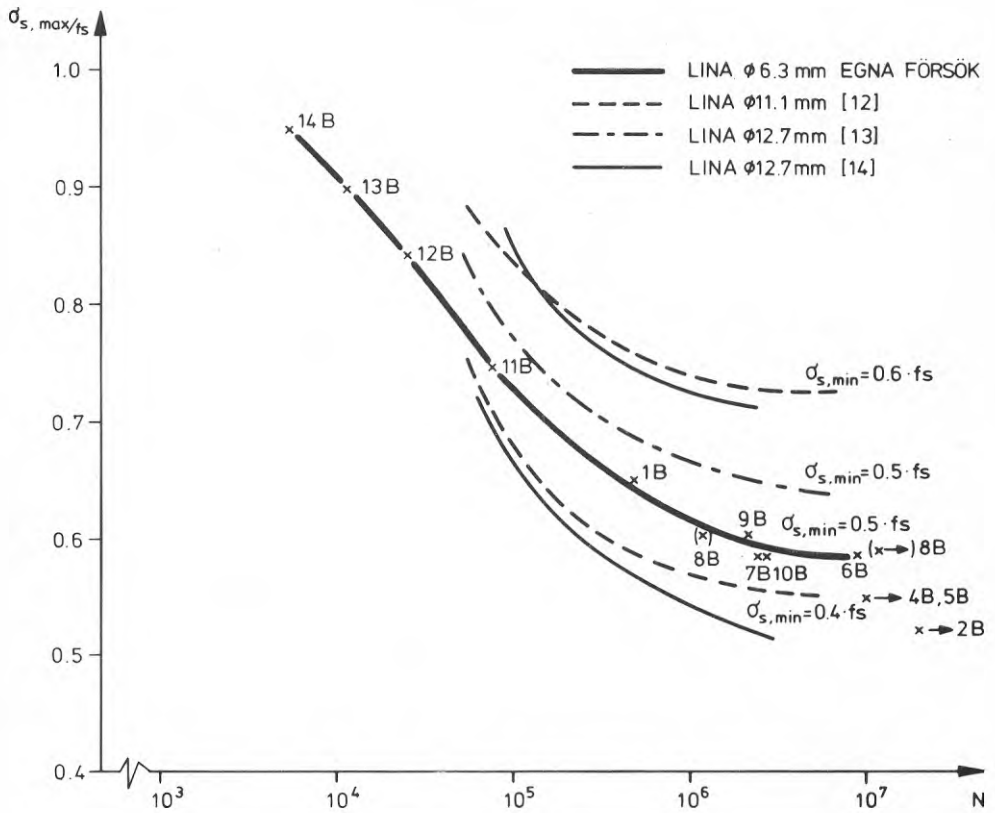


Fig 8.8 Livslängden (N) för spännlina som funktion av maximispänningen ($\sigma_{s,max}$), här relaterat till brottspänningen (f_s). ("Wöhlerkurva"). Minimispenningen $\sigma_{s,min}$ vid de egna försöken (slipersförsöken) är approximativt $0,5 \cdot f_s$. (Ekv (8.3) är empiriskt framtagen från försöksresultat enligt [12] och [13]. Försök nr 8 B är utsatt för två olika spänningsnivåer).

9. SLIPRARNAS ANVÄNDNING I JÄRNVÄG MED HÄNSYN TILL UTMATTNING

Undersökningen visar att brott i spännlinorna är den mest kritiska brottorsaken, då sliprarna utsätts för utmattningsbelastning på det sätt som skedde vid utmattningsförsöken. Ur fig. 8.8 kan förhållandet mellan pålagd spänning i linorna och antalet lastväxlingar till brott erhållas. Om dylika kurvor blir horisontella vid ett stort antal lastväxlingar, dvs om ett obegränsat antal lastväxlingar kan läggas på utan att brott sker, säges konstruktionen ha en "utmattningsgräns".

I vissa tidigare undersökningar, se [1], har angetts att spännlinor ej skulle ha någon utmattningsgräns, vilket innebär att brott skulle kunna ske vid vilken spänningsnivå som helst, bara antalet lastväxlingar vore tillräckligt stort. Orsaken anges vara nötning mellan de ingående lintrådarna. Praktiskt sett är dock hållfasthetsminskningen vid ökande antal lastväxlingar så liten att en "praktisk utmattningsgräns" ändå kan fastställas för spännlinorna i de allra flesta tillämpningar.

Enligt fig 8.8 kan då linan sägas ha en praktisk utmattningsgräns vid $\sigma_{s,max}/f_s = 0,55$, dvs för $\sigma_{s,max} = 0,55 \cdot 1980 = 1090$ Mpa. Detta motsvarar en brottlaster på 100 kN och ett brottmoment på 20 kNm. (Här används den enligt avsnitt 8.3 modifierade beräkningskurvan i fig.8.7).

Ovanstående förutsätter en minimispänning i linan $\sigma_{s,min} = 0,5 f_s$, vilket approximativt gäller även om minimilasten (yttre last) går ner till noll, se fig 8.7. Denna undersökning tyder således på att sliprarna skulle kunna belastas med ett yttre pålagt moment (i rälläget) på omkring 20 kNm under ett obegränsat antal lastväxlingar. Detta styrks även direkt av de primära försöksresultaten enligt tabell 8.2. Här har inget utmattningsbrott inträffat under provningstiden (10^7 lastväxlingar) vid de försök där maximilasten var 100 kN (20 kNm) eller lägre.

Aktuell påverkan i sliprarna, belastade med normal järnvägstrafik, har bl a studerats i [3]. Vid 20 tons axeltryck fås en last i vardera räälläget på omkring 110 kN. (Här tas hänsyn till dynamiska tillskottslaster och till räälernas lastfördelande verkan på flera sliprar; $100 \cdot 1,6 \cdot 0,7 \approx 110$ kN). Lastfördelningen under sliprarna är av naturliga skäl mera svårbestämbar, bl a pga oundvikliga variationer i underlagets (makadamens) funktionssätt. Om emellertid en jämnt utbredd last antas under hela sliperns bottenyta, med undantag för en sträcka i mitten av slipern på 0,4 meter, fås ett moment i räällägessnittet på omkring 11 kNm. Här är även hänsyn tagen till viss momentreduktion under räälerna [3].

Detta skulle innebära att säkerhetsfaktorn mot utmattning i sliprarna, (vid 20 tons axeltryck och oändlig livslängd), skulle bli cirka 1,8, ($20/11 \approx 1,8$). Osäkerheten särskilt vid framtagningen av aktuellt moment är dock stor, varför värdet på säkerhetsfaktorn får tas med stor reservation.

De enstaka överlaster som ibland kan förekomma, och som exempelvis kan orsakas av ojämnheter i vagnshjulen (se kap 1), uppkommer troligen i ett så litet antal, att de torde kunna försummas vad gäller faran för utmattningsbrott. Överlasterna innebär dock att sliprarna får en böjspricka i underkant i räällägessnittet, vilket ju också är förutsatt i denna utmattningsundersökning.

Mindre laster (än 20 tons axeltryck), som ju uppträder i ett stort antal, eftersom vagnarna ej alltid körs fullastade, torde ge mindre skadeinverkan än de större lasterna. För en bedömning av dessa mindre lasters skadeinverkan kan exempelvis Palmgren-Miners delskadehypotes ge viss vägledning, se bl a [10].

Frågan om eventuell korrosion i linorna pga uppsprickning, (och därmed sammanhängande "korrosionsutmattning"), har ej behandlats i denna undersökning. Sprickbredderna torde dock vara små eftersom spännkraften drar ihop sprickan, då slipern ej belastas. (Dessutom är ju spännlinorna "förrostade" redan vid tillverkningen, i vidhäftningsförbättrande syfte).

(I detta sammanhang kan nämnas att dimensioneringsförutsättningarna från SJ till tillverkarna för den här aktuella sliperstypen bl a anger, att momentet 15 kNm skall kunna upptas i maximalmomentsnittet med begränsningen av spänningarna till mellan 3 Mpa dragspänning och 20 Mpa tryckspänning samt med en säkerhetsfaktor mot statistiskt brott på 1,75).

10. SLUTSATSER

Brottet i sliprarna uppstod på olika sätt vid de statistiska försöken respektive vid utmattningsförsöken. Tre brottyper förekom vid de statistiska försöken; betongkrossbrott, skjuvbrott och vidhäftningsbrott. (Vidhäftningsbrott inträffade endast i de fall där en skjuvspricka slog upp på ett sådant sätt att linornas förankringslängd blev för liten). Vid utmattningsförsöken uppstod alla brott som utmattningsbrott i spännlinorna.

Att flera brottyper uppstod vid de statiska försöken visar att sliprarna var optimalt dimensionerade (för statisk last). Att en annan brotttyp uppkom vid utmattningsförsöken, berodde på att lastnivån vid utmattningsförsöken var relativt låg (jämfört med statistiska försök), vilket medförde att spänningsfördelningen i sliprarna blev annorlunda. Utmattningsbrott i betongen var inte aktuellt, eftersom betongtryckzonen vid lägre last var större än vid högre last, varför spänningsvariationen i betongen vid den lägre utmattningslasten blev liten. Detta förhållande accentuerades ytterligare av att konstruktionen var förspänd. (Under utmattningsförloppet minskade emellertid tryckzonen pga succesivt ökande sprickbredd i dragzonen, i sin tur orakat av plastiska deformationer och vidhäftningsupphävning mellan lina och betong. Detta fenomen verkar dock ha gett mindre inverkan än ovanstående).

Skjuvutmattningsbrott var ej aktuellt, eftersom förspänningskraften gav så stora tryckspänningar i det "kritiska skjuvområdet", att skjuvsprickor ej uppstod.

I och med att skjuvsprickor (och därmed sammanhängande böjsprickor nära upplag) ej slog upp, blev heller aldrig vidhäftningsbrott (förankringsbrott) aktuellt vid utmattningsbelastningen.

Generellt gäller att minimispänningen (eller medel-spänningen) i spännarmering jämfört med ospänd arme-ring är relativt hög (pga förspänningen). Den absoluta spänningsvariationen (spänningsvidden) är också rätt stor men blir dock relativt brottspänningen förhållan-devis liten (höghållfasta stål). I denna undersökning inträffade utmattningsbrott i linorna vid spänningsni-våer som rätt väl överensstämmer med resultaten från utländska försök, se fig 8.8. Ur figuren torde också kunna utläsas att linan i sliprarna skulle ha en "praktisk" utmattningsgräns vid $\sigma_{s,max}/f_s = 0,55$, (förutsatt att $\sigma_{s,min} = 0,5 \cdot f_s$). Reservation måste dock göras p g a det begränsade antalet försök.

Allmänt sett pekar ovanstående på att utmattning i spännarmeringen ofta skulle vara den mest kritiska brottorsaken vad gäller utmattning i spännbetongkon-struktioner, (förutsatt att uppsprickning tillåts).

Den här genomförda undersökningen tyder på att säker-heten mot utmattningsbrott i sliprarna vid dess använd-ning i järnvägar skulle vara tillfredsställande, se kap 9. Stor reservation måste dock göras särskilt för osäkerheten vid framtagningen av aktuell påverkan från tågtrafikbelastning. Dessutom har frågan om eventuell korrosion på spännlinorna vid uppsprickning och annan miljöpåverkan ej behandlats i denna undersökning.

I undersökningen användes både mekaniska och elektriska mätmetoder. Vid de sist genomförda utmattningsförsöken, användes elektriska mätmetoder, som medgav ett helt auto-matiskt provningsförfarande. Härvid användes kända mät-komponenter såsom lastgivare, förskjutningsgivare och trådtöjningsgivare, som utnyttjades på olika sätt, se kap 7. Insamling av mätdata gjordes i denna undersökning huvudsakligen genom registrering på skrivare (UV-skrivare med fotografiskt papper). Här bör dock i framtiden dator-baserade mätdatainsamlingssystem användas, där mätdata kan lagras i digital form på skiv- eller bandminne. Härigenom ökas kraftigt möjligheterna till övervakning och styrning av provningsförloppet och det fortsatta utvärderingsarbetet underlättas väsentligt.

11. REFERENSER

- [1] Kent Gylltoft, Lennart Elfgren: Utmattningshållfasthet för anläggningskonstruktioner. Byggforskningen, rapport R 68:1977, Stockholm 1977, 160 sid.
- [2] Kent Gylltoft, Lennart Elfgren: Utmattningshållfasthet för fundament i stål och betong. En kortfattad översikt. Högskolan i Luleå, Avd för Konstruktions teknik, Teknisk rapport 1977:22 T, Luleå 1977, 14 sid.
- [3] Nils-Erik Bergström: Hållfasthetsprovning av betongsliper. Examensarbete vid Högskolan i Luleå, Avd för Konstruktionsteknik, Examensarbete 1978:178 E, Luleå 1978, 45 sid.
- [4] Hjalmar Granholm: Allmän teori för beräkning av armerad betong. Med särskild hänsyn till betongens och armeringens egenskaper i brottstadiet. Transactions of Chalmers University of Technology, No 209, Göteborg 1959, 228 sid.
- [5] ISO 221 Steel tubes - wall thicknesses. International Organization for Standardization, Geneve 1976, 1 pp.
- [6] Halmstadsstål, produktkatalog. Halmstads Järnverks AB, Halmstad aug 1975.
- [7] Åke Holmberg: Provning av linspända sliprar typ SJ vid A-Betongs laboratorium i Vislanda under November 1974 till Januari 1975. Ingenjörbyrå Centerlöf & Holmberg AB.
- [8] Lagerkatalog 76-77 från ELIT, Elektriska instrument AB, Stockholm 1976, 512 sid.

- [9] Knut Aas Jakobsen: Fatigue of concrete beams and columns. Bulletin No 70-1, Institutt for Betongkonstruksjoner, Norges Tekniske Högskole, Trondheim september 1970, 148 sid.
- [10] Abeles PW, Brown II EI, Hu CH: Fatigue resistance of under-reinforced prestressed beams subjected to different stress ranges. Miner's hypothesis (pp 239-278). Behavior of underreinforced prestressed concrete beams subjected to different stress ranges (pp 279-300). Abeles Symposium: Fatigue of Concrete. ACI Publication SP-41, Detroit 1974, 350 pp.
- [11] ACI Committee 215: Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading. ACI Journal, Proceedings Vol 71, No 3, march 1974, pp 97-121.
- [12] Warner RF, Hulsbos CL: Probable fatigue life of prestressed concrete beams. Journal Prestressed Concrete Institute, Vol II, No 2, Aril 1966, pp 16-39. (Referensen hämtad från [11]).
- [13] Hilmes JB, Ekberg CE Jr: Statistical analysis of the fatigue characteristics of under-reinforced prestressed concrete flexural members. Iowa Engineering Experiment Station, Iowa State University, Ames 1965. (Referensen hämtad från [11]).
- [14] Tide RHR, Van Horn DA. A statistical study of the static and fatigue properties of high strength prestressing strand. Report No 309.2, Fritz Engineering Laboratory, Lehigh University, Betlehem, Pennsylvania 1966. (Referensen hämtad från [11]).
- [15] Per-Olov Östlund, Lennart Elfgrén: Inverkan av fler-axiell last och temperatur på betong, Högskolan i Luleå, Avd för Konstruktionsteknik, Forskningsrapport TULEA 1976:05, Luleå 1976, 92 sid.

APPENDIX A STATISKA BERÄKNINGAR

A.1 Inledande beräkningar

Spänningen i linorna av enbart förspänningskraften;

$$\sigma_{sp}^{medel} = P/A_s = 1004,08 \text{ Mpa} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{där } P = 246 \cdot 10^3 \text{ N}, A_s = 245 \text{ mm}^2$$

Motsvarande töjning fås enligt fig 3.2;

$$\epsilon_{sp}^{medel} = 5,097 \text{ ‰} \quad (\text{A.2})$$

Spänningarna i betongtvärsnittet av enbart förspänningskraften i över- och underkant tvärsnitt blir;

$$\sigma_{cpo} = -P/A_c - P(e_{c,s} - e_s)/W_{c,so} = -6,56 \text{ Mpa} \quad (\text{A.3})$$

$$\sigma_{cpu} = -P/A_c + P(e_{c,s} - e_s)/W_{c,su} = -4,39 \text{ Mpa}$$

$$\text{där } P = 246 \cdot 10^3 \text{ N}, A_c = 45,92 \cdot 10^3 \text{ mm}^2, e_{c,s} = 118,8 \text{ mm}$$

$$e_s = 111,4 \text{ mm}, W_{c,so} = 1517 \cdot 10^3 \text{ mm}^3, W_{c,su} = 1873 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Motsvarande töjningar fås enligt fig 3.1

$$\epsilon_{cpo} = -0,211 \text{ ‰} \quad (\text{A.4})$$

$$\epsilon_{cpu} = -0,140 \text{ ‰}$$

Detta motsvarar en töjningsvinkel φ i tvärsnittet av enbart förspänningskraften;

$$\tan \varphi_p = (\epsilon_{cpu} - \epsilon_{cpo}) / h = 0,33 \cdot 10^{-6} \text{ töjning/mm} \quad (\text{A.5})$$

Töjningen i linorna utgår i beräkningarna från överkanten där en fiktiv lintöjning blir;

$$\epsilon_{spo} = \epsilon_{sp}^{medel} + (\epsilon_{cpo} - \epsilon_{cpu}) e_{c,s} / h = 5,058 \text{ ‰} \quad (\text{A.6})$$

$$\text{där } h = 215 \text{ mm}$$

Datorberäkningarna startas med en betongstukning i överkant och en töjningsvinkel φ , som är större respektive mindre än de värden, som enbart spännkraften ger.

A.2 Beräkningsprogram

```

100 OPEN #1: FOR OUTPUT "L-P"
110 PRINT #1: "STATISK BERAKNING AV BETONGSLIPER" : PRINT #1: !
120 PRINT #1: "ECMAX";TAB(9);"SCMAX";TAB(20);"ESMAX";TAB(33);"SSMAX";
130 PRINT #1: TAB(43);"D";TAB(54);"M";TAB(65);"F"
140 PRINT #1: TAB(9);"MPA";TAB(33);"MPA";TAB(43);"MM";
150 PRINT #1: TAB(54);"NM";TAB(65);"N"
160 LET TANV=0.3E-6
170 LET ECO=-0.35E-3
180 DIM XS(5)
190 FOR I=1 TO 5
200 READ XS(I)
210 NEXT I
220 LET XC=0.5
230 LET FCV=0
240 LET FSV=0
250 LET D=-ECO/TANV
260 IF D>215 THEN LET D=215
270 IF XC>=D THEN 320
280 GOSUB 620
290 LET FCV=FCV+BX*SCVX
300 LET XC=XC+1
310 GO TO 270
320 FOR I=1 TO 5
330 GOSUB 670
340 LET FSV=FSV+49*SSVX
350 NEXT I
360 IF ES>5.8E-2 THEN PRINT #1: "LINBROTT" : GO TO 740
370 IF ABS(FCV)>FSV THEN LET TANV=TANV+1E-8 : GO TO 220
380 LET XC=0.5
390 LET M=0
400 IF XC>=D THEN 450
410 GOSUB 620
420 LET M=M+BX*SCVX*XC
430 LET XC=XC+1
440 GO TO 400
450 FOR I=1 TO 5
460 GOSUB 670
470 M=M+49*SSVX*XS(I)
480 NEXT I
490 M=M*1E-3
500 LET F=M/0.2
510 LET XC=0
520 GOSUB 620
530 LET I=5
540 GOSUB 670
550 PRINT #1: ECO;TAB(9);SCVX;TAB(19);ES;TAB(32);SSVX;
560 PRINT #1: TAB(42);D;TAB(53);M;TAB(64);F
570 IF ECO>=-3.9E-4 THEN LET ECO=ECO-1E-5 : GO TO 590
580 LET ECO=ECO-1E-4
590 IF ECO<-3.5E-3 THEN PRINT #1: "BETONGBROTT" : GO TO 740
600 GO TO 220
610 GO TO 740

```

```

620 IF XC<94 THEN LET BX=164+XC*26/94
630 IF XC>94 THEN LET BX=190+(XC-94)*104/121
640 LET EC=ECO+XC*TANV
650 LET SCVX=32E3*EC+4.57E6*ECU2
660 RETURN
670 ES=0.5269E-2+ECO+XS(I)*TANV
680 IF 0<=ES.AND.ES<=0.86E-2 THEN LET SSVX=1970E2*ES
690 IF 0.86E-2<ES.AND.ES<=1.22E-2 THEN LET SSVX=527E2*ES+1227
700 IF 1.22E-2<ES.AND.ES<=4.12E-2 THEN LET SSVX=37.67E2*ES+1824
710 IF ES>4.12E-2 THEN SSVX=1980
720 RETURN
730 DATA 48,73,118,146,172
740 CLOSE #1:
750 END

```

A.3 Beräkningsresultat

STATISK BERAKNING AV BETONGSLIPER

ECMAX	SCMAX MPA	ESMAX	SSMAX MPA	D MM	M NM	F N
-0.00035	-10.6402	5.177E-03	1019.87	215	6528.55	32642.7
-0.00036	-10.9277	5.18076E-03	1020.61	215	6898.91	34494.5
-0.00037	-11.2144	5.18624E-03	1021.69	215	7534.17	37670.9
-0.00038	-11.5001	0.00519	1022.43	215	7906.72	39533.6
-0.00039	-11.7849	5.19376E-03	1023.17	213.115	8273.71	41368.6
-0.0004	-12.0688	5.19924E-03	1024.25	208.333	8834.79	44174
-0.0005	-14.8575	5.26092E-03	1036.4	174.825	12216.8	61084.1
-0.0006	-17.5548	5.35184E-03	1054.31	151.133	14653.7	73268.3
-0.0007	-20.1607	5.46684E-03	1076.97	134.1	16444.1	82220.7
-0.0008	-22.6752	5.60764E-03	1104.71	120.846	17987.5	89937.3
-0.0009	-25.0983	5.76736E-03	1136.17	110.701	19283.9	96419.6
-0.001	-27.43	5.94428E-03	1171.02	102.669	20449.4	102247
-0.0011	-29.6703	6.13496E-03	1208.59	96.238	21520.8	107604
-0.0012	-31.8192	6.33768E-03	1248.52	90.978	22538.9	112694
-0.0013	-33.8767	6.549E-03	1290.15	86.6667	23505.8	117529
-0.0014	-35.8428	6.76892E-03	1333.48	83.0368	24451.1	122256
-0.0015	-37.7175	6.994E-03	1377.82	80	25363.1	126816
-0.0016	-39.5008	7.22252E-03	1422.84	77.4443	26245.1	131225
-0.0017	-41.1927	7.4562E-03	1468.87	75.2213	27122.2	135611
-0.0018	-42.7932	7.6916E-03	1515.25	73.3198	27977.3	139887
-0.0019	-44.3023	7.92872E-03	1561.96	71.6711	28817.5	144087
-0.002	-45.72	8.16756E-03	1609.01	70.2247	29648.3	148242
-0.0021	-47.0463	8.4064E-03	1656.06	68.9655	30462.2	152311
-0.0022	-48.2812	8.65556E-03	1683.15	67.734	31150.4	155752
-0.0023	-49.4247	8.91504E-03	1696.82	66.5317	31766	158830
-0.0024	-50.4768	9.1728E-03	1710.41	65.4843	32358.1	161790
-0.0025	-51.4375	9.43056E-03	1723.99	64.5494	32939.9	164699
-0.0026	-52.3068	9.70036E-03	1738.21	63.6038	33437.3	167186
-0.0027	-53.0847	9.97704E-03	1752.79	62.6886	33872.4	169362
-0.0028	-53.7712	1.02537E-02	1767.37	61.8643	34299	171495
-0.0029	-54.3663	1.05287E-02	1781.86	61.1293	34712.7	173564
-0.003	-54.87	1.08019E-02	1796.26	60.4717	35116.5	175583
-0.0031	-55.2823	1.10717E-02	1810.48	59.8918	35499.9	177499
-0.0032	-55.6032	1.13398E-02	1824.61	59.3692	35877.4	179387
-0.0033	-55.8327	1.16062E-02	1838.64	58.897	36244.6	181223
-0.0034	-55.9708	0.0119	1854.13	58.299	36506.2	182531
-0.0035	-56.0175	1.21802E-02	1868.89	57.8226	36786.3	183932

BETONGBROTT

A.4 Modifierat beräkningsprogram

```

100 OPEN #1: FOR OUTPUT "L-P"
110 PRINT #1: "STATISK BERÄKNING AV BETONGSLIPER" : PRINT #1: !
120 PRINT #1: "ECMAX";TAB(9);"SCMAX";TAB(20);"ESMAX";TAB(33);"SSMAX";
130 PRINT #1: TAB(43);"D";TAB(54);"M";TAB(65);"F"
140 PRINT #1: TAB(9);"MPA";TAB(33);"MPA";TAB(43);"MM";
150 PRINT #1: TAB(54);"NM";TAB(65);"N"
160 LET TANV=0.1E-6
170 LET ECO=-0.11E-3
180 DIM XS(5)
190 FOR I=1 TO 5
200 READ XS(I)
210 NEXT I
220 LET XC=0.5
230 LET FCV=0
240 LET FSV=0
250 LET D=-ECO/TANV
260 IF D>215 THEN LET D=215
270 IF XC>=D THEN 320
280 GOSUB 620
290 LET FCV=FCV+BX*SCVX
300 LET XC=XC+1
310 GO TO 270
320 FOR I=1 TO 5
330 GOSUB 670
340 LET FSV=FSV+49*SSVX
350 NEXT I
360 IF ES>5.8E-2 THEN PRINT #1: "LINBROTT" : GO TO 740
370 IF ABS(FCV)>FSV THEN LET TANV=TANV+1E-8 : GO TO 220
380 LET XC=0.5
390 LET M=0
400 IF XC>=D THEN 450
410 GOSUB 620
420 LET M=M+BX*SCVX*XC
430 LET XC=XC+1
440 GO TO 400
450 FOR I=1 TO 5
460 GOSUB 670
470 M=M+49*SSVX*XS(I)
480 NEXT I
490 M=M*1E-3
500 LET F=M/0.2
510 LET XC=0
520 GOSUB 620
530 LET I=5
540 GOSUB 670
550 PRINT #1: ECO;TAB(9);SCVX;TAB(19);ES;TAB(32);SSVX;
560 PRINT #1: TAB(42);D;TAB(53);M;TAB(64);F
570 IF ECO>=-3.9E-4 THEN LET ECO=ECO-1E-5 : GO TO 590
580 LET ECO=ECO-1E-4
590 IF ECO<=-5.0E-3 THEN PRINT #1: "BETONGBROTT" : GO TO 740
600 GO TO 220
610 GO TO 740

```



```

620 IF XC<94 THEN LET BX=164+XC*26/94
630 IF XC>94 THEN LET BX=190+(XC-94)*104/121
640 LET EC=ECO+XC*TANV
650 LET SCVX=64E3*EC+6.40E6*ECU2
660 RETURN
670 ES=0.5182E-2+ECO+XS(I)*TANV
680 IF 0<=ES.AND.ES<=0.86E-2 THEN LET SSVX=1970E2*ES
690 IF 0.86E-2<ES.AND.ES<=1.22E-2 THEN LET SSVX=527E2*ES+1227
700 IF 1.22E-2<ES.AND.ES<=4.12E-2 THEN LET SSVX=37.67E2*ES+1824
710 IF ES>4.12E-2 THEN SSVX=1980
720 RETURN
730 DATA 48,73,118,146,172
740 CLOSE #1:
750 END

```

A. 5 Beräkningsresultat med modifierat beräkningsprogram

STATISK BERÄKNING AV BETONGSLIPER

ECMAX	SCMAX MPA	ESMAX	SSMAX MPA	D MM	M NM	F N
-0.00011	-6.96256	5.10984E-03	1006.64	215	863.116	4315.58
-0.00012	-7.38784	5.1136E-03	1007.38	215	1590.75	7953.74
-0.00013	-8.21184	5.11908E-03	1008.46	215	2847.59	14238
-0.00014	-8.83456	5.12284E-03	1009.2	215	3578.29	17891.4
-0.00015	-9.456	5.12832E-03	1010.28	215	4839.07	24195.4
-0.00016	-10.0762	5.13208E-03	1011.02	215	5572.83	27864.1
-0.00017	-10.695	5.13584E-03	1011.76	215	6307.94	31539.7
-0.00018	-11.3126	5.14132E-03	1012.84	215	7574.37	37871.9
-0.00019	-11.929	5.14508E-03	1013.58	213.483	8308.83	41544.2
-0.0002	-12.544	5.15056E-03	1014.66	204.032	9352.94	46764.7
-0.00021	-13.1578	5.15604E-03	1015.74	196.262	10130.1	50650.7
-0.00022	-13.7702	5.16152E-03	1016.82	189.655	10714.9	53574.6
-0.00023	-14.3814	5.16872E-03	1018.24	182.54	11462	57309.9
-0.00024	-14.9914	5.17592E-03	1019.66	176.471	12040.4	60201.8
-0.00025	-15.6	5.18484E-03	1021.41	170.063	12730.6	63653.1
-0.00026	-16.2074	5.19376E-03	1023.17	164.557	13278.2	66391.1
-0.00027	-16.8134	5.20268E-03	1024.93	159.763	13715.5	68577.7
-0.00028	-17.4182	5.21332E-03	1027.02	154.696	14241.7	71208.5
-0.00029	-18.0218	5.22396E-03	1029.12	150.259	14670.8	73353.8
-0.0003	-18.624	5.2346E-03	1031.22	146.341	15023.6	75118.1
-0.00031	-19.225	5.24696E-03	1033.65	142.202	15446.9	77234.5
-0.00032	-19.8246	5.25932E-03	1036.09	138.528	15801.5	79007.4
-0.00033	-20.423	5.2734E-03	1038.86	134.694	16210.1	81050.7
-0.00034	-21.0202	5.28748E-03	1041.63	131.274	16557.3	82786.4
-0.00035	-21.616	5.30156E-03	1044.41	128.205	16854.2	84270.8
-0.00036	-22.2106	5.31736E-03	1047.52	125	17197.2	85985.9
-0.00037	-22.8038	5.33316E-03	1050.63	122.112	17494.6	87473.1
-0.00038	-23.3958	5.34896E-03	1053.75	119.497	17754.7	88773.6
-0.00039	-23.9866	5.36648E-03	1057.2	116.766	18053.2	90265.8
-0.0004	-24.576	5.38228E-03	1060.31	114.613	18250.6	91252.8
-0.0005	-30.4	5.58672E-03	1100.58	95.057	20525.7	102629
-0.0006	-36.096	5.8376E-03	1150.01	82.1913	22384	111920
-0.0007	-41.664	6.1246E-03	1206.55	73.2934	24033.7	120169
-0.0008	-47.104	6.44084E-03	1268.85	66.8337	25590.3	127951
-0.0009	-52.416	6.78116E-03	1335.89	61.9408	27112.2	135561

-0.001	-57.6	7.1404E-03	1406.66	58.1395	28619.1	143095
-0.0011	-62.656	7.5134E-03	1480.14	55.1378	30112.1	150561
-0.0012	-67.584	7.89844E-03	1555.99	52.7009	31608.5	158042
-0.0013	-72.384	8.29208E-03	1633.54	50.702	33102.2	165511
-0.0014	-77.056	8.70636E-03	1685.83	48.8998	34436.9	172184
-0.0015	-81.6	9.143E-03	1708.84	47.2441	35588.1	177940
-0.0016	-86.016	9.60372E-03	1733.12	45.7012	36621.8	183109
-0.0017	-90.304	1.00885E-02	1758.66	44.2593	37519.2	187596
-0.0018	-94.464	1.05802E-02	1784.58	43.0108	38409.8	192049
-0.0019	-98.496	1.10925E-02	1811.58	41.841	39232.5	196162
-0.002	-102.4	1.16324E-02	1840.03	40.7083	39955	199775
-0.0021	-106.176	1.21791E-02	1868.84	39.705	40672.3	203362
-0.0022	-109.824	1.27568E-02	1872.05	38.7119	41219.4	206097
-0.0023	-113.344	1.3343E-02	1874.26	37.8165	41755.4	208777
-0.0024	-116.736	1.39362E-02	1876.5	37.0085	42271.4	211357
-0.0025	-120	1.45586E-02	1878.84	36.2056	42667.5	213337
-0.0026	-123.136	1.51862E-02	1881.21	35.4803	43059.4	215297
-0.0027	-126.144	1.58223E-02	1883.6	34.8117	43446.6	217233
-0.0028	-129.024	1.64585E-02	1886	34.2131	43826.5	219132
-0.0029	-131.776	1.71153E-02	1888.47	33.6271	44154.6	220773
-0.003	-134.4	1.78546E-02	1891.26	32.9236	44349.1	221745
-0.0031	-136.896	1.8582E-02	1894	32.3152	44562	222810
-0.0032	-139.264	1.93196E-02	1896.78	31.746	44771.5	223858
-0.0033	-141.504	2.00607E-02	1899.57	31.2234	44975.3	224877
-0.0034	-143.616	2.08069E-02	1902.38	30.7336	45176	225880
-0.0035	-145.6	2.15566E-02	1905.2	30.2899	45372.6	226863
-0.0036	-147.456	2.23115E-02	1908.05	29.8705	45565.3	227827
-0.0037	-149.184	2.30594E-02	1910.86	29.4933	45753.9	228769
-0.0038	-150.784	2.38211E-02	1913.73	29.1277	45938.6	229693
-0.0039	-152.256	2.45777E-02	1916.58	28.795	46120.8	230604
-0.004	-153.6	2.53291E-02	1919.41	28.492	46300.1	231500
-0.0041	-154.816	2.60908E-02	1922.28	28.1981	46474.5	232373
-0.0042	-155.904	2.68474E-02	1925.13	27.9292	46646.6	233233
-0.0043	-156.864	2.75988E-02	1927.96	27.683	46812.6	234063
-0.0044	-157.696	2.83777E-02	1930.9	27.4246	46949.5	234748
-0.0045	-158.4	2.92168E-02	1934.06	27.1243	47062.1	235311
-0.0046	-158.976	3.00559E-02	1937.22	26.8441	47168.9	235845
-0.0047	-159.424	3.08865E-02	1940.35	26.5832	47272.9	236365
-0.0048	-159.744	3.17273E-02	1943.52	26.3389	47373.7	236869
-0.0049	-159.936	3.25716E-02	1946.7	26.1013	47472.2	237361
-0.005	-160	3.34055E-02	1949.84	25.8853	47567.5	237838

BETONGBROTT

APPENDIX B PROVKROPPAR EFTER BROTT

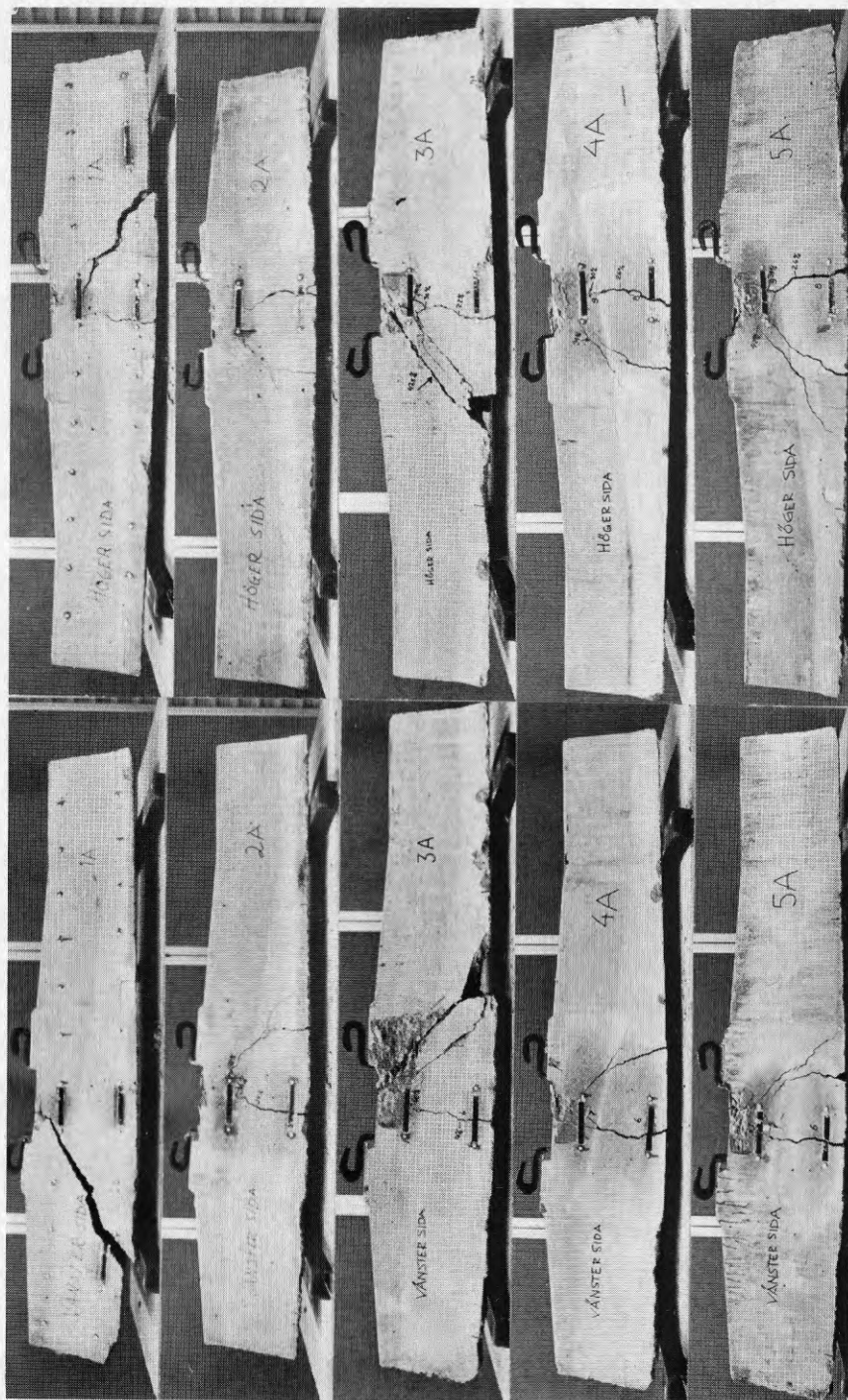


Fig B.1 Statiska försök. Prov nr 1A - nr 5A



Fig B.2 Statiska försök. Prov nr 6A - nr 10A



Fig B.3 Utmattningsförsök. Prov nr 1B, 2B, 6B. Prov nr 2B har ej erhållit brott. Prov nr 3B utsattes för kraftig statisk överlast till brott efter bara några cyklars utmattningsbelastning. Prov nr 4B och 5B erhöj ej utmattningsbrott utan belastades statiskt till brott (efter utmattningsbelastningen). Även prov nr 6B har utsatts för en kraftig statisk belastning efter utmattningsbrottet. (Prov nr 7B kunde ej fotograferas, då linorna uttogs för studium av dem i ett tidigt skede.

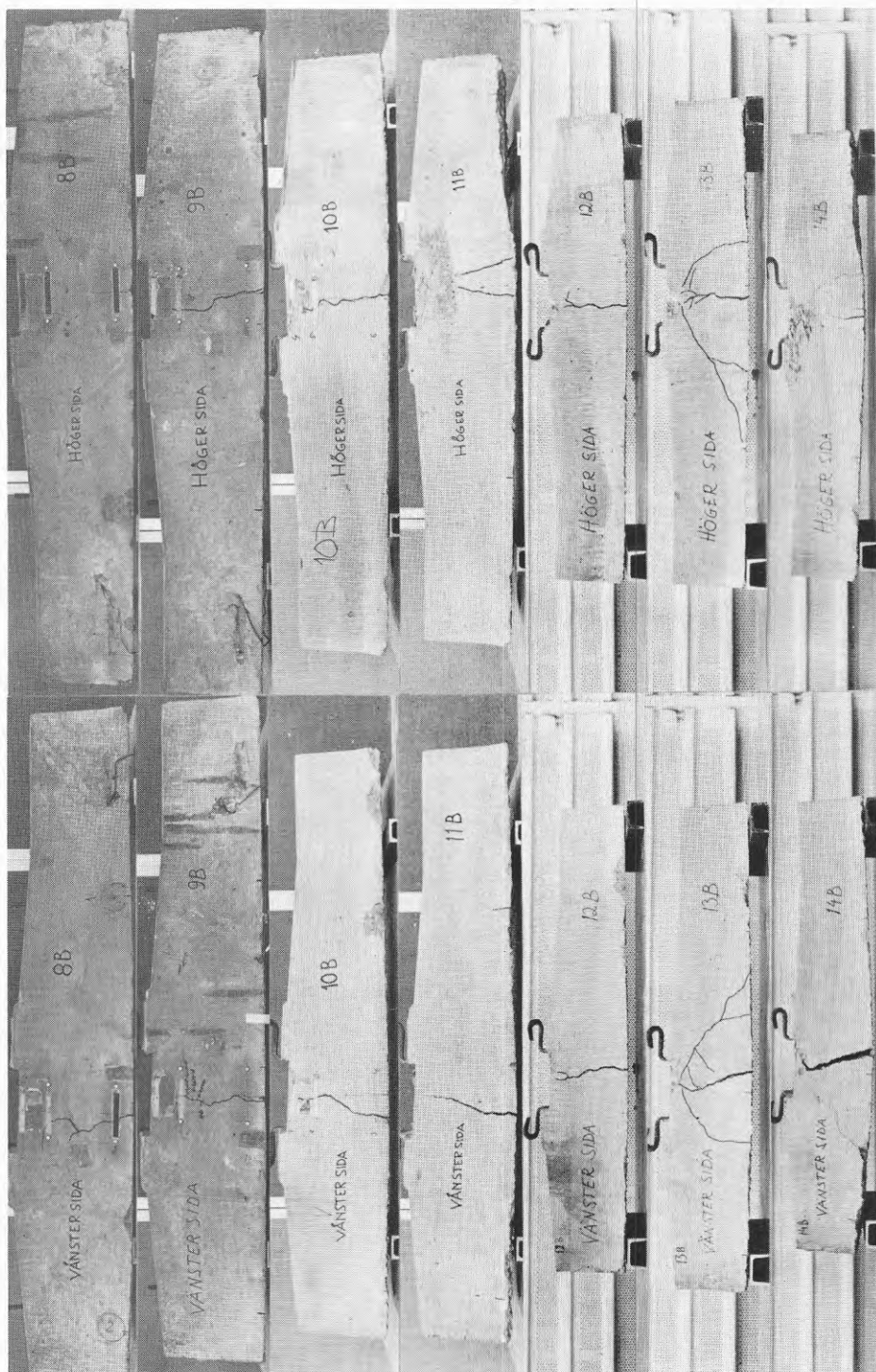
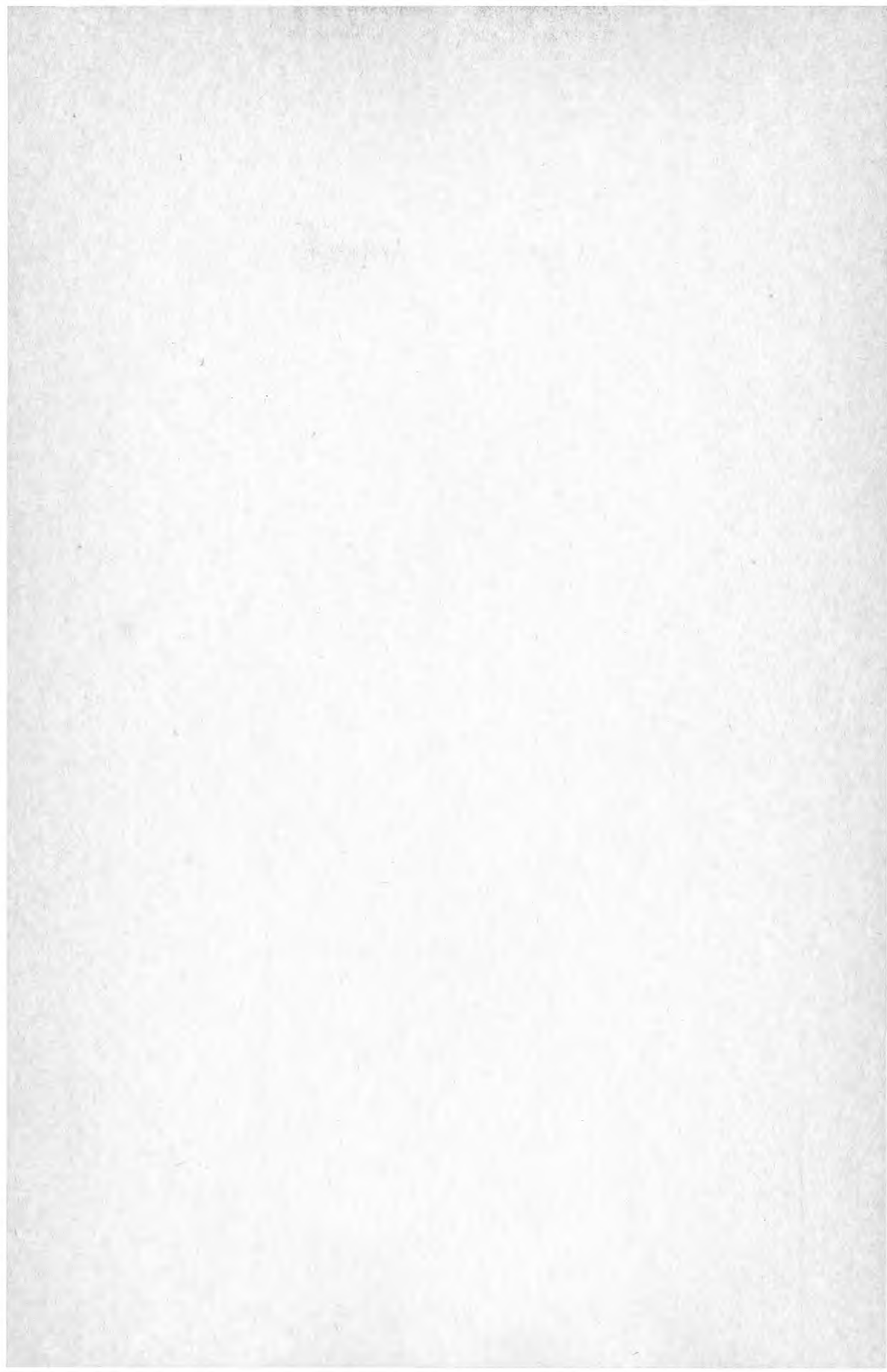


Fig B.4 Utmattningsförsök. Prov nr 8B - nr 14B



**Denna rapport hänför sig till forskningsanslag 770717-9 från
Statens råd för byggnadsforskning till Avd. för
Konstruktionsteknik vid Högskolan i Luleå.**

R103:1978

ISBN 91-540-2939-2

Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm

Art.nr: 6600803

**Abonnemangsgrupp:
Z. Konstruktioner o. material**

**Distribution:
Svensk Byggtjänst, Box 1403
111 84 Stockholm**

Cirka pris: 30 kr exkl moms