



# LUND UNIVERSITY

## Armeringsståls mekaniska egenskaper vid höga temperaturer

Anderberg, Yngve

1978

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Anderberg, Y. (1978). *Armeringsståls mekaniska egenskaper vid höga temperaturer*. (Bulletin of Division of Structural Mechanics and Concrete Construction, Bulletin 61; Vol. Bulletin 61). Lund Institute of Technology.

*Total number of authors:*

1

### General rights

Unless other specific re-use rights are stated the following general rights apply:

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

Read more about Creative commons licenses: <https://creativecommons.org/licenses/>

### Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

LUND UNIVERSITY

PO Box 117  
221 00 Lund  
+46 46-222 00 00

LUND INSTITUTE OF TECHNOLOGY · LUND · SWEDEN · 1978  
DIVISION OF STRUCTURAL MECHANICS AND CONCRETE CONSTRUCTION · BULLETIN 61

YNGVE ANDERBERG

ARMERINGSSTÅLS MEKANISKA  
EGENSKAPER VID HÖGA TEMPERATURER



---

# Tekniska meddelanden Nr 36

HALMSTADS JÄRNVERKS AB

ARMERINGSSTÅLS  
MEKANISKA EGENSKAPER  
VID HÖGA TEMPERATURER

---

---

# ARMERINGSSTÅLS MEKANISKA EGENSKAPER VID HÖGA TEMPERATURER

Yngve Anderberg\*

---

\*Docent  
Tekniska Högskolan i Lund  
Byggnadsstatik

---

## FÖRORD

Denna undersökning har genomförts med stöd av medel från Halmstads Järnverks stipendium för år 1975.

Arbetet har utförts vid **institutionen för byggnadsstatik** vid LTH. I vissa delar har det blivit gjort som examensarbeten av dåvarande teknologerna Roland Carlsson, Pål Hansson, Sven Krakau, Claes Olsson och Lars Wohlström.

Jag framför här mitt tack till Halmstads Järnverk för stipendiet och till professor Ove Pettersson och tekn dr Åke Holmberg för synpunkter och värdefull hjälp i övrigt.

Lund i april 1978

Yngve Anderberg

## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

BETECKNINGAR	
1	INLEDNING
2	FÖRSÖKSBESKRIVNING
2.1	Belastning
2.2	Uppvärmning
2.3	Deformationsmätning
3	FÖRSÖKSOMFATTNING
3.1	Materialdata för undersökt stål
3.2	Försök
4	PÅKÄNNINGS-TÖJNINGSSAMBAND
4.1	Varmvalsat stål
4.2	Kallbearbetat stål
4.3	Analytiska samband
5	KRYPNING
5.1	Förenklade krypsamband
5.2	Försöksresultat enligt Dorn-Harmathy
5.3	Uppmätta och beräknade krypförlopp
6	DEFORMATIONER VID TRANSIENTA FÖRLOPP
7	SAMBAND MELLAN KARAKTERISTISK PÅKÄNNING OCH KRITISK TÖJNING
8	SAMMANFATTNING. SUMMARY
9	REFERENSER

APPENDIX I	Kompletterande försöksvärden avseende 4.1
APPENDIX II	Kompletterande försöksvärden avseende 4.2
APPENDIX III	Kompletterande försöksvärden avseende 5.1

## BETECKNINGAR

I huvudsaklig anslutning till SS 016610

$E$	elasticitetsmodul	$K$	koefficient
$E_{00^{\circ}\text{C}}$	elasticitetsmodulen vid $00^{\circ}\text{C}$	$p$	primär (som index)
$R$	allmänna gaskonstanten	$s$	sekundär (som index)
$T$	temperatur	$t$	tid
$W$	aktiveringsenergi vid krypning	$x$	koordinat i ett rätvinkligt system
$Z$	Zener-Hollmans parameter.	$y$	koordinat i ett rätvinkligt system
$e$	parameter i förenklat krypsamband	$\alpha$	temperaturutvidningskoefficient
	dimensionslös elasticitetsmodul, $E/f_y$	$\epsilon$	töjning
$f$	hållfasthet	$\epsilon_c$	kryptöjning
$f_y$	sträckgräns eller 0,2-gräns	$\theta$	temperaturkompenserad tid
$f_{y,00^{\circ}\text{C}}$	$f_y$ vid temperaturen $00^{\circ}\text{C}$	$\sigma$	påkänning

## 1 INLEDNING

Kunskap om armeringens beteende vid höga temperaturer utgör ett viktigt underlag vid en brandteknisk dimensionering av armerade betongkonstruktioner. Denna redogörelse för armeringsståls mekaniska egenskaper avser olika armeringsståls (Ks 40, Ks 40 SE, Ks 60, Ps 50 och Ss 50) påkännings-töjningssamband och kryp-egenskaper vid höga temperaturer. Redogörelsen innefattar bland annat resultat från två examensarbeten utförda av Sven Krakau, Claes Olsson och Lars Wohlström (1975) respektive Roland Carlsson och Pål Hansson (1977). Den behandlar också sambandet mellan karakteristisk påkänning och kritisk töjning på basis av studier rörande brandpåverkade betongkonstruktioners verknings sätt.

## 2 FÖRSÖKSBESKRIVNING

För dragprovning av armeringsstål vid förhöjda temperaturer användes en försöksuppställning enligt fig. 2.1. I utrustningen ingick en universalprovningssmaskin, en cylindrisk ugn med temperaturregulator och en för ändamålet specialtillverkad deformationsmätutrustning med tillhörande x-y- och linjeskrivare.

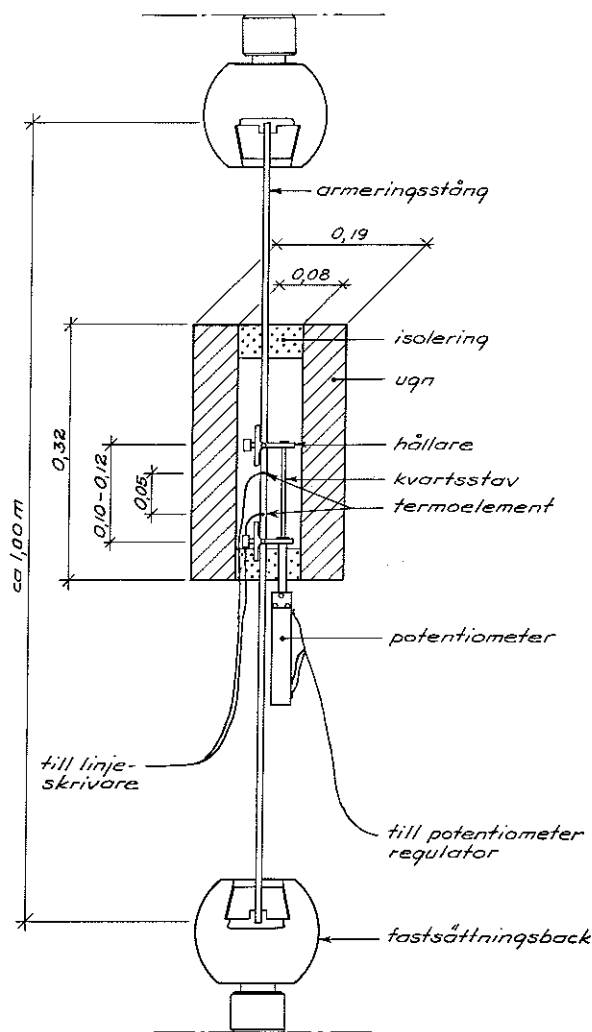


Fig. 2.1 Försöksuppställning.  
Testing facilities.

### 2.1 Belastning

Vid dragprovningen inmonterades provstycket, en 1 m lång armeringsstång, i en universalprovningssmaskin typ Alwetron F 5000, till vilken en lastcell på 50 kN var kopplad för mätning av lasten. Normalt arbetar en maskin av denna typ med deformationshastigheten hos provföremålet som inställbar variabel. Emellertid eftersträvades en möjlighet att i stället styra belastningshastigheten, varför en utbyggnad genomfördes. Denna utbyggnad utnyttjade maskinens möjligheter att automatiskt uppsöka och konstanthålla en last, preciserad genom inställning av ett reglage. En eldriven motor, inställbar för olika hastigheter, fick driva en potentiometer, som i sin tur med konstant hastighet ökade inställningen på detta reglage. Detta möjliggjorde en enkel och noggrann konstanthållning av lasten vid krypförsöken samt en tillförlitlig styrning av belastningshastigheten vid påkännings-töjnings försöken,  $\sigma$ - $\epsilon$ -försöken.

### 2.2 Uppvärmning

En cylindrisk ugn, typ Amoler EO 1090 med elektrisk uppvärmning erhållen genom två spiralsystem, ett för den övre och ett för den undre delen av ugnen, monterades på provningssmaskinens dragenhet för att värma upp ca 0,25 m av provstycket (se Fig. 2.1). Ugnens höjd är 0,32 m, medan ytter- och innerdiametererna är 0,19 m respektive 0,08 m. Ugnen har en maximal arbetstemperatur av 1200°C och en mätnoggrannhet av  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Den är kopplad till nätet via en omformare, till vilken en temperaturregulator (termostat) är ansluten för balansering av temperaturen. Dessutom inkopplades en automatisk programmeringsenhet, som kan följa en vald temperatur-tidkurva. Denna enhet består av en kurvföljare av typ Trendtrak (Leads & Northup), en temperaturmätare typ Speedomax H (L & N) och en kontrollenhet (proportional band control unit) av typ D.A.T. Series 60 (L & N). Kurvföljaren består av en fotocell, som följer den valda, uppritade temperatur-tidkurvan.

Mätning av temperaturen hos provföremålet skedde med hjälp av två termoelement (Chromel-Alumel, 20 AWG, 0,81 mm i diameter) som var punktsvetsade mot två små ytor hos armeringsstången med 5 cm mellanrum samt skyddade för direkt strålning (se fig. 2.1). För att man skulle erhålla en jämn temperatur i höjddled isolerades ugnsändarna omsorgsfullt.

### 2.3 Deformationsmätning

Armeringsstångens deformation fördes ut ur ugnen med hjälp av två kvartsrör med ytterdiameterarna 0,009 m respektive 0,012 m. Dessa kvartsrör hängde i sin tur i två hållare som spändes fast på armeringsstången med avståndet 0,10–0,12 m. Det mindre röret passerade inuti det större och anslöts till en potentiometer enligt fig. 2.1. Potentiometern är av typ CIC med mycket hög upplösning och registrerade kvartsrörens rörelse relativt varandra, vilken uppritades av en ansluten x-y-skrivare. Potentiometerns linjära avvikelse är uppskattad till maximalt  $\pm 0,0015$  mm, om mätlängden 1 m används. Om den totala mätlängden väljs mindre blir också felet mindre, dock ej proportionellt. Med hänsyn till kvartsstavarnas termiska längdändring ( $0,6 \times 10^{-6}$ ) skedde en korrektion av mätresultaten. Av skilda anledningar blev i inledningskedet vissa resultat behäftade med mäfel.



### 3 FÖRSÖKSOMFATTNING

Försöksprogrammet omfattar  $\sigma$ - $\epsilon$ -försök och krypförsök vid förhöjd temperatur (20–700°C) för 5 olika armeringsstål (Ks 40, Ks 50 SE, Ks 60, Ps 50 och Ss 50), dvs såväl varmvalsat som kallbearbetat stål. Dessutom ingår krypförsök, som utförts vid varierande påkänning, samt transienta försök där deformationen registrerats vid varierande temperatur och konstant påkänning.

#### 3.1 Materialdata för undersökt stål

Armeringsstängernas diameter, bearbetningsgrad och kemiska sammansättning påverkar egenskaper som sträckgräns och brottgräns. Sträckgränsen har en tendens att öka relativt brottgränsen vid ökande bearbetning. Den kemiska sammansättningen för de i undersökningen ingående armeringsstängerna finns redovisad i Tabell 3.1. Sträckgräns och brottgräns visas i Tabell 3.2 för aktuella charger. För Ks 40 Ø 10 och Ø 8 har armeringsstänger tagits från två olika charger. Den kemiska sammansättningen saknas för ett par charger (se Tabell 3.1).

Tabell 3.1 Kemisk sammansättning

Arm.kvalitet		C %	Si %	Mn %	P %	S %	V %
Ks 40*	Ø 10	0,31	0,27	0,75	0,024	0,021	—
Ks 40*	Ø 8	0,41	0,27	0,66	0,029	0,039	—
Ks 40 SE	Ø 8	0,16	0,33	0,96	0,025	0,050	0,06
Ks 60	Ø 8	0,31	0,33	1,11	0,040	0,041	0,07
Ps 50	Ø 8	0,15	0,23	0,71	0,026	0,031	—
Ps 50	Ø 5	0,14	0,26	0,74	0,020	0,033	—
Ss 50	Ø 4	0,04	—	0,29	0,016	0,027	—

\* Gäller endast för krypförsök

Tabell 3.3 Påkännings-töjnings ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) försök

Försöks-serie	Armerings-kvalitet	Undre sträck-gräns, 0,2-gräns, MPa	Belastnings-hastighet MPa/s	Temperatur °C
1 A	Ks 40 Ø 10	450	3,5	20, 102, 210, 309, 405, 498, 609, 651, 694
1 B	Ks 40 Ø 10	450	0,07	20, 105, 295, 309, 405, 501, 609, 651, 694
2	Ks 40 Ø 8	456	3,5	20, 105, 204, 302, 396, 491, 602
3	Ks 40 SE Ø 8	558	3,5	20, 99, 201, 300, 398, 499, 602, 699
4	Ks 60 Ø 8	710	3,5	20, 102, 198, 300, 398, 492, 595, 702
5	Ps 50 Ø 5	500	3,5	20, 101, 110, 203, 301, 310, 400, 401, 500, 503, 600 (2 st)
6	Ps 50 Ø 8	749	3,5	20, 99, 200, 299 (2 st), 399, 505, 599, 600, 700
7	Ss 50 Ø 4	510	3,5	20, 102, 199, 304, 405, 500, 596

Tabell 3.2 Sträckgräns och brottgräns

Arm.kvalitet		Sträck-gräns MPa	Brott-gräns MPa	Kommentar
Ks 40	Ø 10*	450	680	$\sigma$ - $\epsilon$ -försök Krypförsök
Ks 40	Ø 10**	483	726	
Ks 40	Ø 8*	456	636	
Ks 40	Ø 8**	504	721	
Ks 40 SE	Ø 8	558	610	
Ks 60	Ø 8	710	880	
Ps 50	Ø 8	749	—	
Ps 50	Ø 5	500	631	
Ss 50	Ø 4	510	533	

\* Kemisk sammansättning saknas

\*\* Kemisk sammansättning enligt Tabell 3.1

#### 3.2 Försök

Påkännings-töjningssamband för de nämnda armeringsstålen är bestämda i fem olika försöksserier enligt Tabell 3.3. I försöksserie 1 (Ks 40 Ø 10) har försöken genomförts vid nio olika temperaturer vid två olika belastningshastigheter (3,5 respektive 0,07 MPa/s) för att mäta krypningens inverkan på  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvan. I de övriga försöksserierna har endast den högre belastningshastigheten valts och den är så hög, att eventuell krypning kan anses vara helt försumbar. Försöken har tillgått så att provföremålet först har värmts utan last till önskad temperatur och när temperaturen har stabiliserats har  $\sigma$ - $\epsilon$ -sambandet uppmätts. Ur försöken har också erhållits armeringsstålets termiska expansion. I försöksserie 2 bestämdes temperaturutvidningskoefficienten  $\alpha$  till  $9,9 \times 10^{-6} \cdot T + 5,7 \times 10^{-6} \text{ (K}^{-1}\text{)}$  genom medelvärdesbildning av under uppvärmning utan last erhållna försöksvärden på termisk expansion ( $\epsilon_T$ ). Överensstämmelsen mellan detta uttryck och försöken framgår av Tabell 3.4. Erhållen spridning i försöksresultaten på den termiska expansionen är påtaglig och ökar med ökande temperatur vilket visas i fig. 3.1. Det kan nämnas att den termiska expansionen erhållen i övriga försöksserier överensstämmer härmed.



Krypförsök uppdelade i sju försöksserier har genomförts i huvudsak vid temperaturer inom 400–700°C (se Tabell 3:5). Först efter stabilisering av temperaturen har lasten anbringats och därefter har den tidsberoende deformationen (krypningen) uppmätts under ca 1,5 h. Till följd av vissa mättekniska svårigheter i de inledande försöksserierna är vissa resultat osäkra, varför dessa inte redovisas så utförligt som de övriga. Den mest noggranna och omfattande försöksserien är nr 2, som också är den senast genomförda. Denna analyseras mera ingående.

Tabell 3.4 Termisk expansion

Temperatur °C	$\varepsilon_T$ försök	$\varepsilon_T$ formel	$\alpha_T$ [K <sup>-1</sup> ]
100	$0,73 \cdot 10^{-3}$	$0,72 \cdot 10^{-3}$	$9,73 \cdot 10^{-6}$
200	$1,73 \cdot 10^{-3}$	$1,70 \cdot 10^{-3}$	$10,35 \cdot 10^{-6}$
300	$2,76 \cdot 10^{-3}$	$2,79 \cdot 10^{-3}$	$11,34 \cdot 10^{-6}$
400	$4,05 \cdot 10^{-3}$	$3,97 \cdot 10^{-3}$	$12,33 \cdot 10^{-6}$
500	$5,16 \cdot 10^{-3}$	$5,25 \cdot 10^{-3}$	$13,31 \cdot 10^{-6}$
600	$6,74 \cdot 10^{-3}$	$6,74 \cdot 10^{-3}$	$14,30 \cdot 10^{-6}$
700	—	$8,13 \cdot 10^{-3}$	$15,28 \cdot 10^{-6}$

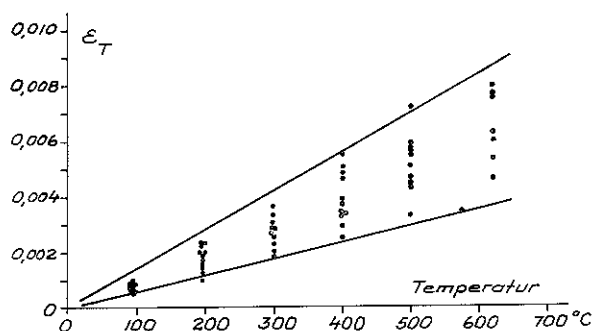


Fig. 3.1 Termisk expansion som funktion av temperatur.  
Thermal expansion as a function of temperature.

Tabell 3.5 Krypförsök

#### Försöksserie 1

Armeringsstål Ks 40 Ø 10  
 $f_{y, 20^\circ\text{C}} = 483 \text{ MPa}$

Temperatur °C	MPa	Påkänning $\sigma/f_{y, 20^\circ\text{C}}$
500	110	0,23
500	145	0,30
499	202	0,42
549	82	0,17
549	119	0,25
544	158	0,33
555	158	0,33
580	119	0,25
601	64	0,13
621	94	0,19
600	94	0,19
601	122	0,25
652	33	0,07
630	51	0,11
651	51	0,11
628	65	0,14
650 (2 st)	65	0,14
700	28	0,06
679	40	0,08
705	40	0,08
699	53	0,11

#### Försöksserie 2

Armeringsstål Ks 40 Ø 8  
 $f_{y, 20^\circ\text{C}} = 456 \text{ MPa}$

Temperatur °C	MPa	Påkänning $\sigma/f_{y, 20^\circ\text{C}}$
A: 499	193	0,42
600	99	0,22
604	132	0,29
584	132	0,29
654	65	0,14
653	80	0,18
679	42	0,09
701	42	0,09

Armeringsstål Ks 40 Ø 8  
 $f_{y, 20^\circ\text{C}} = 504 \text{ MPa}$

Temperatur °C	MPa	Påkänning $\sigma/f_{y, 20^\circ\text{C}}$
B: 400	300	0,60
504	241	0,48
504	241	0,48
504	261	0,52
493	281	0,56
550	138	0,27
550	161	0,32
552	174	0,35
574	124	0,25
574	150	0,30
574	174	0,35
605	80	0,16
613	101	0,20
614	101	0,20
615	98	0,19
616	100	0,20
619	101	0,20
620	112	0,22
596	132	0,26
644	63	0,12
642	83	0,16
647	95	0,19
646	103	0,20
669	32	0,06
669	41	0,08
671	60	0,12
701	32	0,06
698	41	0,08
699	42	0,08
699	61	0,12

#### Försöksserie 3

Armeringsstål Ks 40 SE Ø 8  
 $f_{y, 20^\circ\text{C}} = 558 \text{ MPa}$

Temperatur °C	MPa	Påkänning $\sigma/f_{y, 20^\circ\text{C}}$
502	183	0,33
499	213	0,38
487	243	0,44
502	243	0,44
598	87	0,16
599	87	0,16
602	130	0,23
651	66	0,12
699	27	0,05

#### Försöksserie 4

Armeringsstål Ks 60 Ø 8  
 $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 710 \text{ MPa}$

Temperatur °C	Påkänning MPa	$\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$
588	104	0,15
583	156	0,22
601	156	0,22
603	208	0,29
502	237	0,33
499	315	0,44
691	32	0,04
725	32	0,04
699	51	0,07

#### Försöksserie 5

Armeringsstål Ps 50 Ø 5  
 $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 500 \text{ MPa}$

Temperatur °C	Påkänning MPa	$\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$
455	221	0,44
502	127	0,25
503	190	0,38
520	190	0,38
586	57	0,11
604	57	0,11
703	17	0,03

#### Försöksserie 6

Armeringsstål Ps 50 Ø 8  
 $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 749 \text{ MPa}$

Temperatur °C	Påkänning MPa	$\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$
500	252	0,34
486	335	0,45
498	335	0,45
599	87	0,12
598	130	0,17
688	27	0,04
701	27	0,04
700	41	0,08

#### Försöksserie 7

Armeringsstål Ss Ø 4  
 $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 510 \text{ MPa}$

Temperatur °C	Påkänning MPa	$\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$
407	202	0,40
455	174	0,34
478	174	0,34
503	102	0,20
502	154	0,30
548	50	0,10
596	27	0,05

Förutom i dessa konventionella krypförsök har krypningen studerats vid varierande påkänningar enligt Tabell 3:6. Jämförelser har gjorts med beräknade förlopp baserade på vanliga krypförsök och  $\sigma$ - $\epsilon$ -försök. Slutligen har gjorts transienta försök med deformationen uppmätt vid varierande (linjärt stigande) temperatur och konstant påkänning.

Tabell 3.6 Krypförsök vid varierande påkänning

Armeringsstål Ks 40 Ø 10  
 $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 483 \text{ MPa}$

Temperatur °C	Belastnings- hastighet MPa/s	Lasten, ändrad stegvis MPa	$\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$
551	—	57—113	0,12—0,23
551	—	113—57	0,23—0,12
609	0,07	—	—
651	0,07	—	—
694	0,07	—	—

## 4 PÅKÄNNINGS-TÖJNINGSSAMBAND

Arbetslinjen för armeringsstål vid rumstemperatur karakteriseras väsentligen av fyra storheter, nämligen elasticitetsmodulen, sträckgränsen (varmvalsat stål av låg kvalitet eller medelkvalitet) eller 0,2 gränsen, gränstöjningen och brottgränsen. Av de parametrar som bestämmer arbetslinjens utseende hos armeringsstål har sträckgränsen eller 0,2-gräns och brottgräns en relativ stor spridning vid rumstemperatur, medan elasticitetsmodulen för här undersökt varmvalsat stål har en obetydlig spridning ca  $\pm 5 \text{ GPa}$  kring sitt medelvärde ca 205 GPa. Detta beror på att den kemiska sammansättningen och bearbetningsgraden påverkar både sträckgräns eller 0,2-gräns och brottgräns. För s k kolstål är förhållandet brottgräns till sträckgräns större än för metallegerade stål och finkornstål. Dessutom minskar detta förhållande vid ökad legeringsgrad eftersom en sådan ger en högre sträckgräns samtidigt som brottgränsen i ringare grad påverkas. I fig. 4.1 visas sträckgränsens variationsområde för Ks 40 (tio dragprov) inom en och samma charge, där variationen uppgår till  $\pm 3\%$  av medelvärdet.

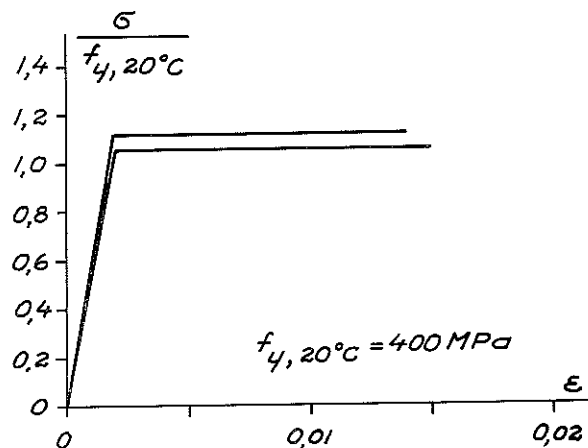


Fig. 4.1 Arbetslinjens variationsområde för tio provstavar ur samma charge.

Domain of variation in stress-strain curve for ten specimens from the same heat.

Vid ökad bearbetningsgrad i samband med valsningen dvs vid minskande diameter hos armeringsstången ökar både brottgräns och sträckgräns men förhållandet dem emellan minskar. Se härom t ex Holmberg [1947]. Effekten av bearbetningen försvinner emellertid vid ca 450°C.

Slutligen bör nämnas att gränstöjningen inte har kunnat studeras, emedan undersökningen i denna del begränsades av att töjningar väsentligt större än 0,02 inte kunde registreras.

## 4.1 Varmvalsat stål

Karakteristiskt för varmvalsat stål är att ett eventuellt sträckgränsområde försvinner vid ca 300°C och att  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvan får en mera avrundad form. Vid högre temperaturer talar man därför inte om sträckgräns utan om 0,2-gräns som kännetecknande storhet. I denna rapport används samma beteckning,  $f_y$  för dessa storheter.

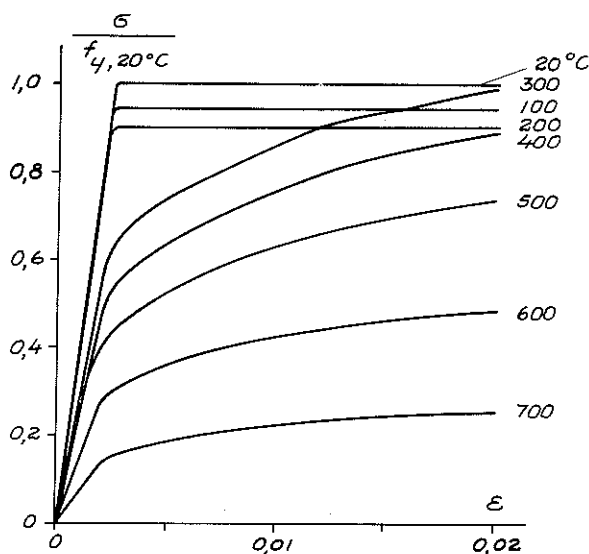


Fig. 4.2 Arbetslinjen för varmvalsat stål vid höga temperaturer. Stress-strain curve for hot-rolled steel at high temperature.

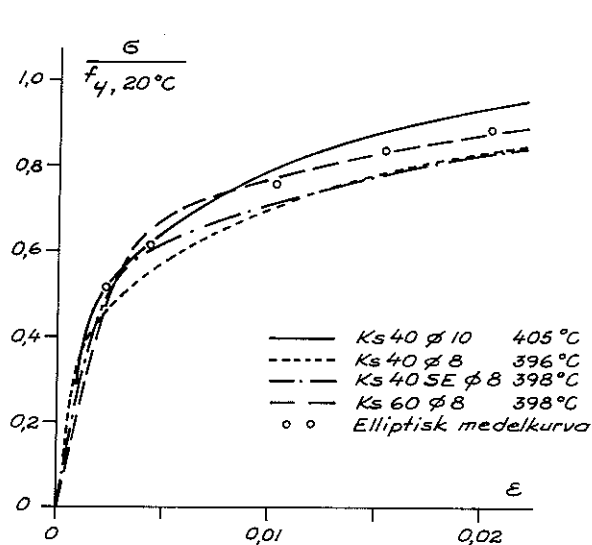


Fig. 4.3 Arbetslinjen för varmvalsat stål vid a) ca 400°C och b) ca 600°C. Stress-strain curve for hot-rolled steel at approximately a) 400°C and b) 600°C.

Vid analys av genomförda  $\sigma$ - $\epsilon$ -försök med belastnings-hastigheten 3,5 MPa/s —dvs vid försumbar krypning— har konstaterats att temperaturberoendet för de olika stålen är ungefär lika. I fig. 4.2 visas representativa di-

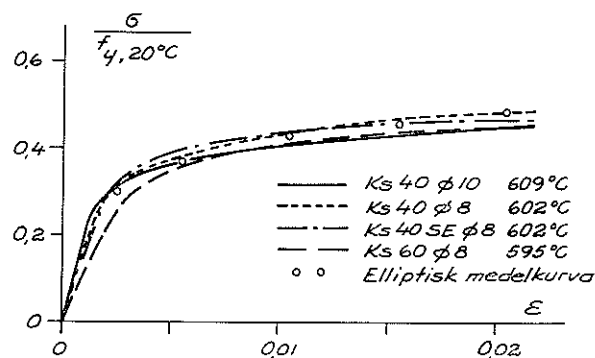


Fig. 4.3 b

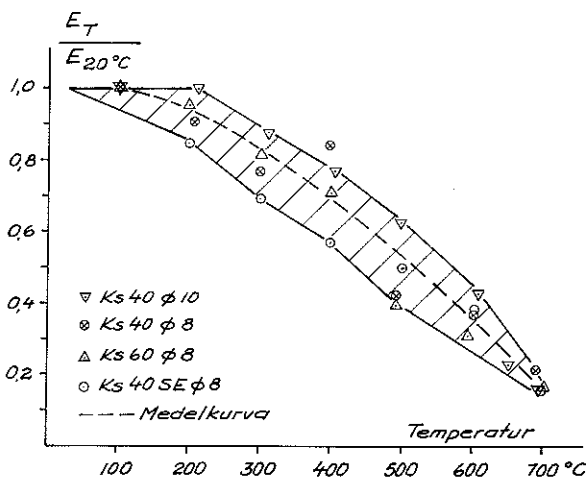


Fig. 4.4 Elasticitetsmodulens variation med temperaturen för varmvalsat stål. Variation in modulus of elasticity for hot-rolled steel with temperature.

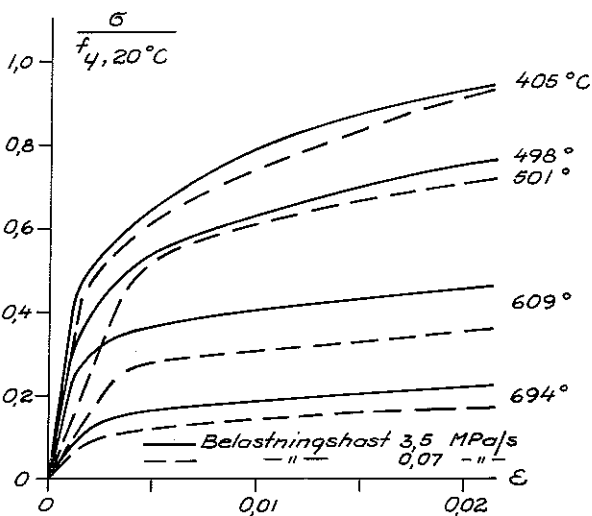


Fig. 4.5 Belastningshastighetens inverkan på arbetslinjen för varmvalsat stål vid höga temperaturer. Helledragen kurva 3,5 MPa/s, streckad 0,07 MPa/s. The effect of rate of loading on stress-strain curve for hot-rolled steel at high temperature. Solid curve 3.5 MPa/s, dashed curve 0.07 MPa/s.

dimensionslösa  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor för de fyra försöksserierna vid åtta olika temperaturer. Varje kurva utgör medelkurvan för de olika armeringsstålen. Spridningen kring medelkurvan är i **fig. 4.3** exemplifierad för 400 och 600°C. I Appendix I visas resultatet vid övriga temperaturer.

$\sigma$ - $\epsilon$ -kurvans initiala lutning anger värdet på elasticitetsmodulen. Dess variation mot temperaturen visas i **fig. 4.4** för varje armeringskvalitet. Spridningen är av försökstekniska skäl ganska stor.

Belastningshastighetens inverkan på  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvan vid temperaturer över 400°C illustreras av **fig. 4.5** från försöksserierna 1A och 1B med hastigheterna 3,5 respektive 0,07 MPa/s. Spridningen i mätresultaten är för stor för att krypningen skall kunna avläsas direkt.

I en jämförelse mellan stål 1411 och här undersökt armeringsstål fås  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor av mycket likartat utseende. Detta är åskådligt gjort i **fig. 4.6** vid fyra temperaturnivåer (300, 400, 500 och 600°C). Undersökningen av stål 1411 är publicerad i Thor [1972] och kurvorna är uppmätta vid en belastningshastighet av 1,63 MPa/s.

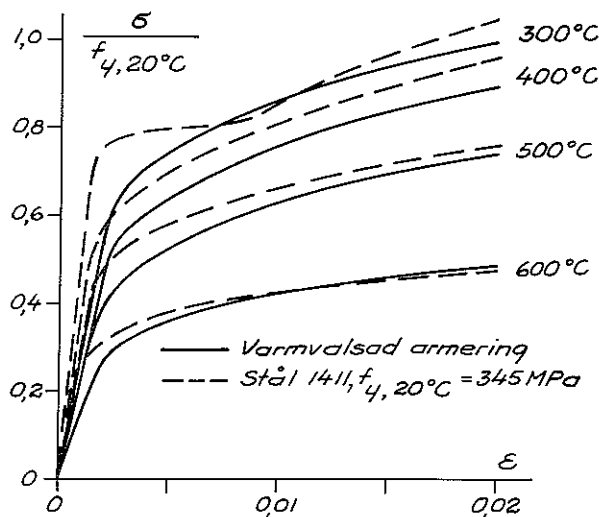


Fig. 4.6 En jämförelse mellan arbetslinjen för varmvalsad armering och stål 1411 vid höga temperaturer.

A comparison between stress-strain curve for hot-rolled reinforcing steel and 1411 steel at high temperature.

Efter avsvälning har armeringsstål en annan arbetslinje än före uppvärmning. Då temperaturen varit över 300°C har dessutom en eventuell sträckgräns försvunnit. Om armeringsstången dessutom varit belastad under temperaturpåverkan blir dess arbetslinje efter avsvälning helt annorlunda. Dock återfår alltid armeringsstålet sin brotthållfasthet efter avsvälning.

## 4.2 Kallbearbetat stål

Det kallbearbetade armeringsstålets  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurva är mycket beroende av kallbearbetningsgraden. Vid ökad kallbearbetning ökar 0,2-gränsen,  $f_{y, 20^\circ\text{C}}$  men gränstörningen minskar väsentligt. Kallbearbetningseffekten försvinner helt vid ca 450°C.  $\sigma$ - $\epsilon$ -sambanden från försöksserierna 5 och 6 med Ps 50 Ø 5 respektive Ø 8 visas i **fig. 4.7** och **4.8**. Dessa stål har visserligen inte så stor skillnad i kemisk sammansättning (se tabell 3.2), men  $f_{y, 20^\circ\text{C}}$  skiljer sig väsentligt, eftersom valsningsgraden är olika. En

jämförelse mellan stålen är gjord i **fig. 4.9**, vilken vid 100 och 500°C visar hur den dimensionslösa arbetslinjen skiljer sig för Ø 5 respektive Ø 8 hos Ps 50. Vid 500°C är skillnaden bara 10 %, men då är också kallbearbetningseffekten utsläckt.

Elasticitetsmodulens variation med temperaturen visas i **fig. 4.10**, där också kurvan för varmvalsat stål är inritad för jämförelse.

Resultat från Ss 50 Ø 4 kan studeras i Appendix II. Mätresultaten är ganska osäkra.

Eftersom kallbearbetningseffekten helt försvinner vid ca 450°C kan den ej heller återfås efter avsvälning. Ar-

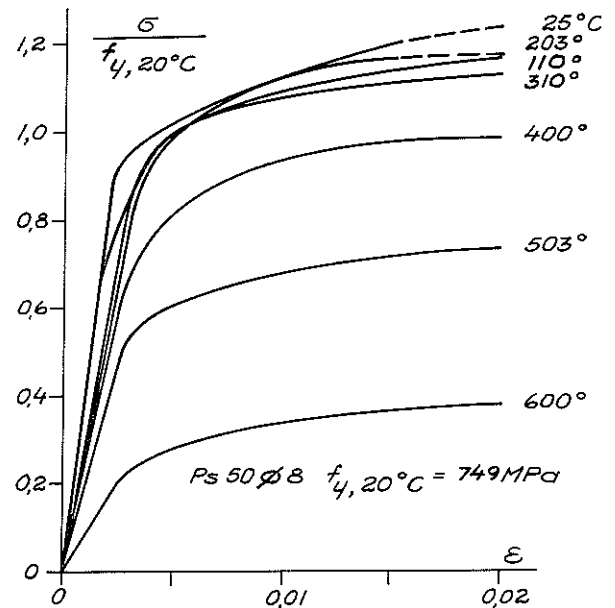


Fig. 4.7 Arbetslinjen för kallbearbetat stål Ps 50 Ø 5 vid höga temperaturer.

Stress-strain curve for cold-worked steel Ps 50 Ø 5 at high temperature.

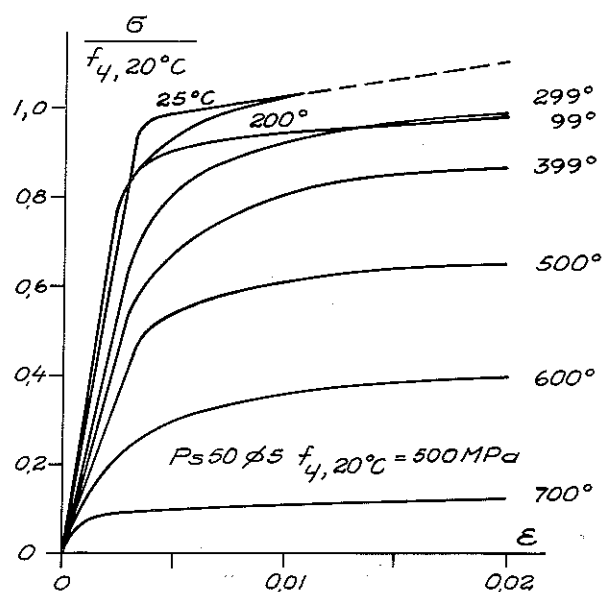


Fig. 4.8 Arbetslinjen för kallbearbetat stål Ps 50 Ø 8 vid höga temperaturer.

Stress-strain curve for cold-worked steel Ps 50 Ø 8 at high temperature.



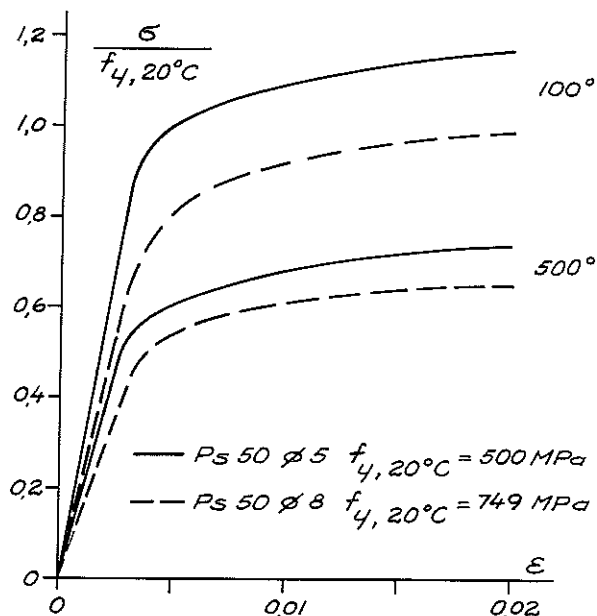


Fig. 4.9 Jämförelse mellan Ø 5 och Ø 8 enligt Fig. 4.7 och 4.8.  
Comparison between Ø 5 and Ø 8 according to Fig. 4.7 and 4.8.

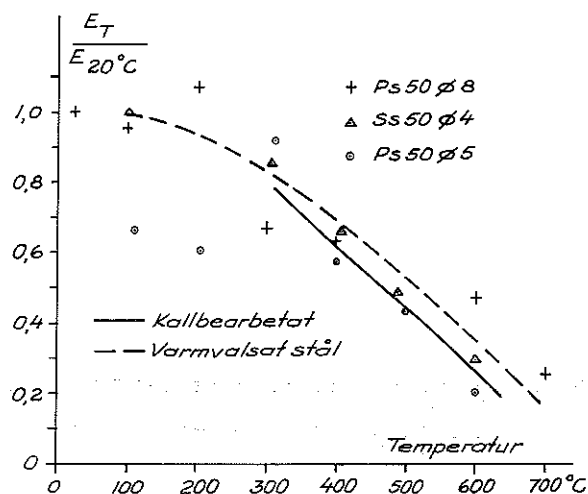


Fig. 4.10 Elasticitetsmodulens variation med temperaturen för kallbearbetat stål, jämfört med motsvarande enligt Fig. 4.4.

Variation in modulus of elasticity for cold-worked steel with temperature. Comparison with Fig. 4.4.

betslinjen förändras således efter avsvälning och utseendet är beroende av aktuell temperaturpåverkan samt eventuell last under uppvärmningen. Dock återfås även här ursprungligt brottgränsvärde.

### 4.3 Analytiska samband

Genom ingående analyser av uppmätta  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor har det visat sig möjligt att använda ett gemensamt analytiskt samband för såväl varmvalsat som kallbearbetat stål vid olika temperaturer. Det formella och dimensionslösa  $\sigma$ - $\epsilon$ -sambandet kan beskrivas med hjälp av en rät linje (definierad av den dimensionslösa elasticitetsmodulen  $e_T = E_T/f_{y,20^\circ\text{C}}$ ) och en del av en ellips. Eftersom uppmätta kurvor slutar vid töjningen 0,02 är anpassningen endast giltig för denna del av arbetslinjen. Det formella sambandets anpassning till uppmätta  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor är god och utgör en medelkurva (se fig. 4.3).

Dimensionslösa  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor kan approximeras med två rätta linjer, där den första linjen följer  $e_T$  till skärningspunkten, vars läge för stål enligt fig. 4.2 förflyttas från

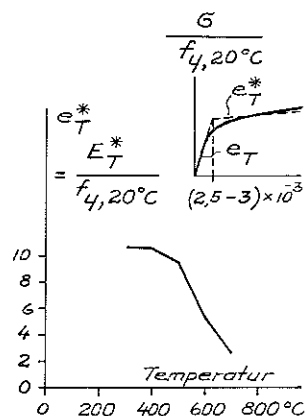


Fig. 4.11 Variation med temperaturen av den dimensionslösa elasticitetsmodulen  $e_T^*$ .  
Variation of the dimensionless modulus of elasticity  $e_T^*$  with temperature.

0,0025 till 0,003 då temperaturen växer från 20 till 700°C. För Ks 60 Ø 8, som har en högre ursprunglig sträckgräns än de övriga här undersökta varmvalsade stälen, ligger brytpunkten vid något större töjningar, se Appendix I. Lutningen på den senare linjen,  $e_T^*$  varierar ungefär enligt fig. 4.11. Denna förenkling av arbetslinjen kan med fördel användas i praktiska sammanhang, dock gäller  $e_T^*$  endast vid töjningar ej över ca 0,02.

## 5 KRYPNING

Armeringsståls krypning, den tidsberoende töjningen, är starkt påverkad av deras kemiska sammansättning och av bearbetningsgraden. Varje stål har således mer eller mindre sitt eget krypteende och det är därför svårt att finna någon gemensam beskrivning härav. Ett ståls kryptenägenhet tycks ej heller kunna sättas i relation till dess sträckgräns eller 0,2-gräns vid rumstemperatur.

Analytisk beskrivning av krypning,  $\epsilon_c$ , i brandtekniska sammanhang har hittills ofta blivit gjord enligt Dorn-Harmathys krypteori. Se Dorn [1954] och Harmathy [1966] samt en modifikation av Plem [1975]. I denna rapport introducerades förenklade kryptsamband där kryptförloppet approximeras med två rätta linjer.

### 5.1 Förenklade kryptsamband

I ett examensarbete, Carlsson & Hansson [1977], här redovisat som försöksserie 2B, har förenklade kryptsamband giltiga för Ks 40 Ø 8 utarbetats, där kryptningen är en explicit funktion av tid, temperatur och påkänning, enligt nedan:

$$\epsilon_c(t, T, \sigma) = t \cdot Z(T, \sigma) \quad (5.1)$$

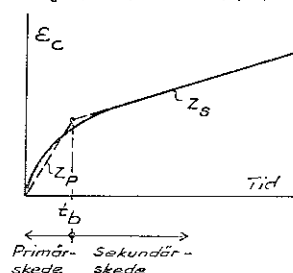


Fig. 5.1 Uppmätt kryptkurva approximerad med två rätta linjer med lutningarna  $Z_p$  och  $Z_s$ .

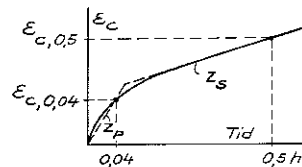
Measured creep curve approximated by two straight branches with slopes  $Z_p$  and  $Z_s$ .

Detta innebär att kryptförloppet i primär- och sekundärskedet approximeras med två räta linjer, där brytpunkten definierar övergången till sekundärskedet enligt **fig. 5.1**. Kryptkurvans utseende blir bestämd genom lutningen  $Z_p$  och  $Z_s$  för respektive linjer samt en bestämd punkt i sekundärskedet, här  $\epsilon_{c, 0,5}$  (krypning efter 0,5 h). Dessa parametrar är således var för sig en funktion av temperatur och påkänning:

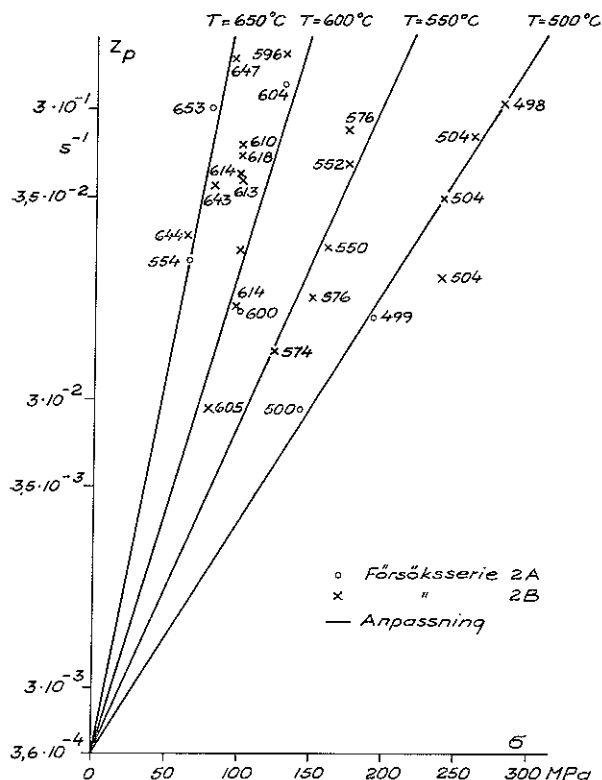
$$\dot{\epsilon}_c = Z_p(T, \sigma) \quad \text{om } 0 \leq t \leq t_b \quad (5.2a)$$

$$\dot{\epsilon}_c = Z_s(T, \sigma) \quad \text{om } t > t_b \quad (5.2b)$$

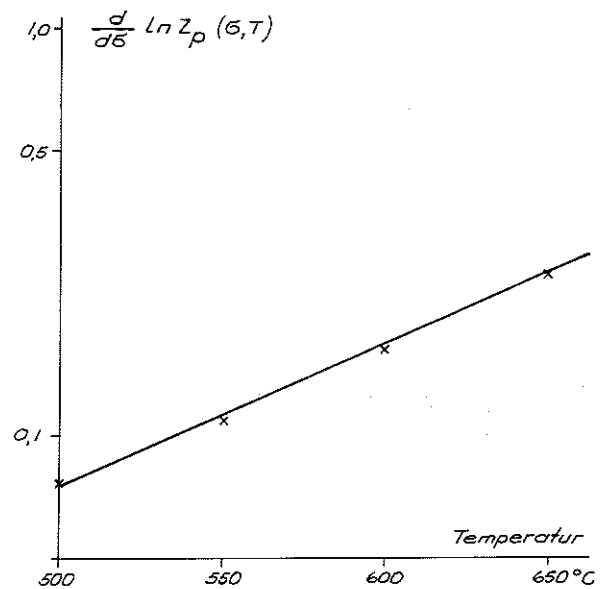
Lutningen i primärskedet definieras som  $\epsilon_{c, 0,04}/0,04$  där  $\epsilon_{c, 0,04}$  är kryptöjningen efter 0,04 tim (2,5 min), se **fig. 5.2**. Från försöken erhållna värden på denna lutning, som funktion av påkänning vid olika temperaturer inprickades i ett semilogaritmiskt diagram enligt **fig. 5.3**. I detta diagram är påkänningsberoendet approximerat till en rät linje med en lutning som bestäms av aktuell temperatur här angiven (500, 550, 600 och 650°C). Temperaturberoendet är åskådliggjort i ett semilogaritmiskt



**Fig. 5.2** Anpassning till uppmätt kryptkurva.  
Approximation of creep curve from measured curve.



**Fig. 5.3** Lutningen,  $Z_p$ , i primärskedet som funktion av påkänning och temperatur.  
Slope,  $Z_p$ , in the primary stage as a function of stress and temperature.



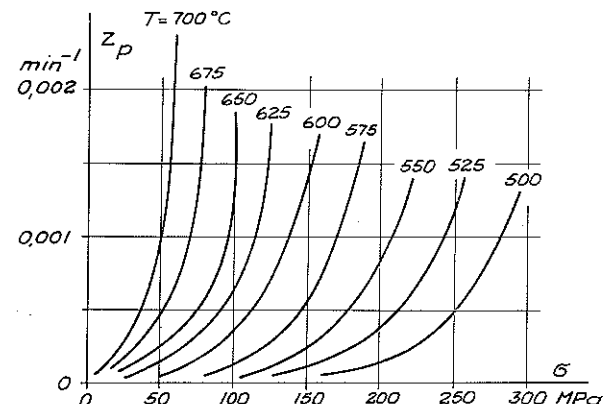
**Fig. 5.4** Påkänningsberoendet hos  $Z_p$  vid varierende temperatur.  
Dependence of stress on  $Z_p$  at varying temperature.

diagram enligt **fig. 5.4**. och en rät linje som är anpassad till försöksvärdena. Lutningens slutekvation blir

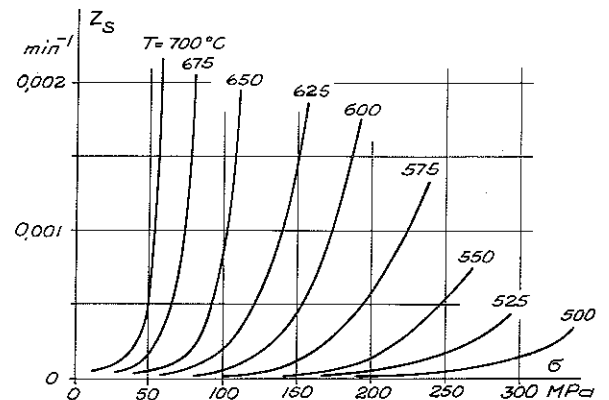
$$Z_p = 3,6 \cdot 10^{-4} \cdot e^{K_1 \cdot \sigma} \quad (h^{-1}, \sigma \text{ i MPa}) \quad (5.3)$$

där

$$K_1 = 2,62 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0084 \cdot T} \quad (T \text{ i K}) \quad (5.4)$$



**Fig. 5.5** Nomogram över kryptastigheten i primärskedet.  
Nomogram for rate of creep in primary phase.



**Fig. 5.6** Nomogram över kryptastigheten i sekundärskedet.  
Nomogram for rate of creep in secondary phase.

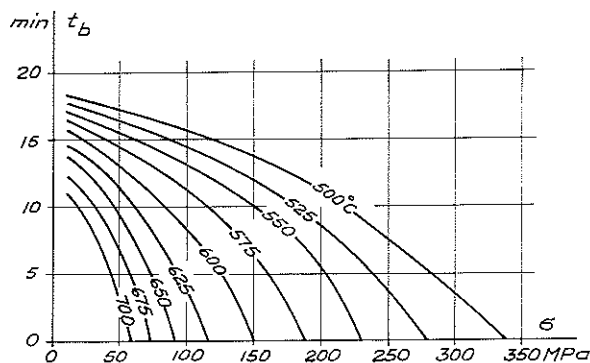


Fig. 5.7 Nomogram över bryttiden, d v s brytpunkten mellan primär- och sekundärkrypning.

Nomogram for determining the transition between primary and secondary creep phases.

Funktionssambanden för lutningen i sekundärskedet och  $\epsilon_{c,0,5}$  har bestämts på samma sätt som för primärlutningen och utvärderingen av dessa är visad i Appendix III. Slutekvationerna följer nedan.

Lutningen:

$$Z_s = 6,84 \cdot 10^{-7} e^{K_2(\sigma-18)} \quad (h^{-1}, \sigma \text{ i MPa}) \quad (5.5)$$

där

$$K_2 = 1,9 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0098 \cdot T} \quad (T \text{ i K}) \quad (5.6)$$

Krypningen vid 0,5 h:

$$\epsilon_{c,0,5} = 10^{-5} \cdot e^{K_3 \cdot \sigma} \quad (\sigma \text{ i MPa}) \quad (5.7)$$

där

$$K_3 = 3,13 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0085 \cdot T} \quad (T \text{ i K}) \quad (5.8)$$

Funktionssambanden (5.3)–(5.8) är bestämda för temperaturer mellan 500 och 650 °C då påkänningen är lägre än  $f_{y,T}$  (0,2-gränsen vid aktuell temperatur T). Vid lägre temperaturer än 500 °C kan extrapolering göras, även om påkänningen är något större än  $f_{y,T}$ .

De nya kryppparametrarna visas i nomogram enligt fig. 5.5–5.7 för  $Z_p$ ,  $Z_s$  respektive  $t_b$  (brytpunkten mellan primär- och sekundärskedet). Av praktiska skäl anges  $Z_p$  och  $Z_s$  i  $\text{min}^{-1}$  och  $t_b$  i min.

## 5.2 Försöksresultat enligt Dorn-Harmathy

Dorn-Harmathys krypteori leder till uttrycket

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{c,0}}{\ln 2 \cdot \cosh 2^{Z(\sigma)\epsilon_{c,0}}} \quad (5.9)$$

där

$Z(\sigma)$  = Zener-Hollmans parameter i  $h^{-1}$

$\epsilon_{c,0}(\sigma)$  = skärningslinjen mellan z-linjen och töjningsaxeln

$$\theta = \int_0^t \frac{W_c}{RT} dt, \text{ temperaturkompenserad tid}$$

$W_c$  = aktiveringsenergi vid krypning i J/mol

$R$  = allmänna gaskonstanten i J/mol · K

$T$  = temperaturen i K

$t$  = tid i h

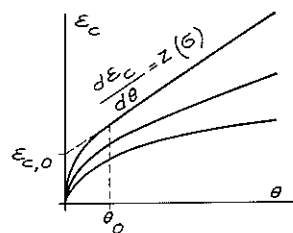


Fig. 5.8 Principiella  $\epsilon_c$ - $\theta$ -kurvor vid olika påkänningar  $\sigma$   
Principal  $\epsilon_c$ - $\theta$ -curves at various stresses  $\sigma$

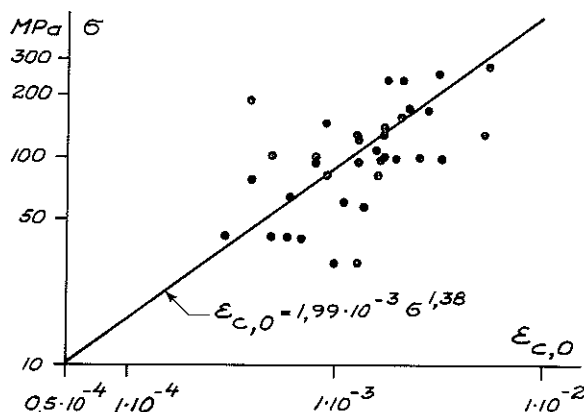


Fig. 5.9 Bestämning av påkänningsberoendet för kryppparametrarna för Ks 40 Ø 8 (Försöksserie 2B), a)  $\epsilon_{c,0}$  och b)  $Z$ .

Determination of stress dependence in creep-parameters for Ks 40 Ø 8 (Test series 2B), a)  $\epsilon_{c,0}$  and b)  $Z$ .

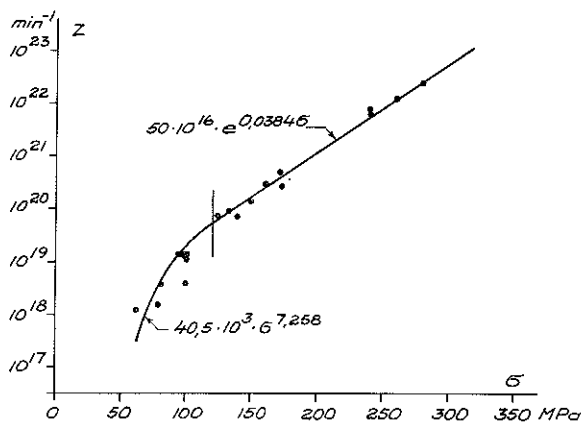


Fig. 5.9 b

Denna formel innebär att krypningen beskrivs vid olika konstanta påkänningar som en funktion av den temperaturkompenserade tiden. Principiella  $\epsilon_c$ - $\theta$ -kurvor visas i fig. 5.8. Här kan det emellertid ifrågasättas om denna krypteori ger bättre noggrannhet än mera enkla samband, visade i avsnitt 5.1.

Bestämningen av funktionssambandet för  $\epsilon_{c,0}$  för Ks 40 Ø 8 i försöksserie 2B i det dubbellogaritmiska diagrammet enligt fig. 5.9, där en rät linje anger anpassningen av  $\epsilon_{c,0}$  till inprickade försöksvärden, indikerar att detta är en dålig metod. Motsvarande bestämning av  $Z$  visas i ett semilogaritmiskt diagram i fig. 5.9b där en potensfunktion och en exponentialfunktion är anpassade till försöksvärdena.

Tabell 5.1 Kryppparametrar för olika armeringsstål

Armeringsstål	$f_{y, 20^{\circ}\text{C}}$ MPa	$W_c/R$ K	Z $\text{h}^{-1}$	$\varepsilon_{c,0}$	Kommentarer
K 40 Ø 10	483	45,000	$\sigma \leq 84$ $\sigma > 84$	$69,6 \cdot 10^9 \cdot \sigma^{4,7}$ $25,8 \cdot 10^{17} \cdot e^{0,0443\sigma}$	28,5 · 10 <sup>-9</sup> · $\sigma^{1,037}$ Försöksserie 1
Ks 40 Ø 8	456	40,000	$\sigma \leq 90$ $\sigma > 90$	$45,6 \cdot 10^6 \cdot \sigma^{4,72}$ $75 \cdot 10^{13} \cdot e^{0,512\sigma}$	339 · 10 <sup>-9</sup> · $\sigma^{0,531}$ Försöksserie 2 A
Ks 40 Ø 8	504	47,000	$\sigma \leq 120$ $\sigma > 120$	$24,3 \cdot 10^5 \cdot \sigma^{7,26}$ $30,0 \cdot 10^{18} \cdot e^{0,0384\sigma}$	19,9 · 10 <sup>-6</sup> · $\sigma^{1,28}$ Försöksserie 2 B
Ks 40 SE Ø 8	558	40,000	$\sigma \leq 96$ $\sigma > 96$	$34,8 \cdot 10^8 \cdot \sigma^{3,83}$ $24,8 \cdot 10^{14} \cdot e^{0,0414\sigma}$	38,6 · 10 <sup>-9</sup> · $\sigma^{1,117}$ Försöksserie 3
Ks 60 Ø 8	710	40,000	$\sigma \leq 90$ $\sigma > 90$	$51,1 \cdot 10^9 \cdot \sigma^{2,93}$ $15,9 \cdot 10^{15} \cdot e^{0,0313\sigma}$	2,06 · 10 <sup>-6</sup> · $\sigma^{0,439}$ Försöksserie 4
Ps 50 Ø 5	500	40,000	$\sigma \leq 100$ $\sigma > 100$	$58,7 \cdot 10^7 \cdot \sigma^{4,47}$ $12,8 \cdot 10^{16} \cdot e^{0,0368\sigma}$	1,10 · 10 <sup>-6</sup> · $\sigma^{0,557}$ Försöksserie 5
Ps 50 Ø 8	749	41,000	$\sigma \leq 133$ $\sigma > 133$	$82,0 \cdot 10^8 \cdot \sigma^{3,94}$ $61,2 \cdot 10^{15} \cdot e^{0,0265\sigma}$	128 · 10 <sup>-9</sup> · $\sigma^{0,844}$ Försöksserie 6

Värdet på kryppparametern  $W_c$  har också en påtaglig spridning (Ks 40 Ø 8, 39000  $\leq W_c \leq 57000$ ) och bestämningen av Z är mycket känslig för detta. De av försöken bestämda kryppparametrarna enligt (5.9) är sammanställda i Tabell 5:1. De ges tillämpning i avsnitt 5.3 och 6.

### 5.3 Uppmätta och beräknade kryppförlopp

Jämförelser mellan uppmätta och beräknade kryppförlopp (enligt Dorn-Harmathy), där god överensstämmelse erhållits, exemplifieras för Ks 60 Ø 8 i **fig. 5.10** vid fyra belastningsnivåer vid ca 600°C. Vidare visas i **fig. 5.11** uppmätta och beräknade resultat dels enligt förenklad teori och dels enligt Dorn-Harmathy teori. Kurvorna gäller för Ks 40 Ø 8 vid belastningsnivån  $\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 0,19$  och vid temperaturerna 615 och 647°C. Av figurer och övriga genomförda jämförelser framgår att den förenklade teorin här ger minst lika bra överensstämmelse som teorin enligt Dorn-Harmathy.

Spridningen inom en charge illustreras i **fig. 5.12** med två försök på Ks Ø 10 vid 650°C vid lastnivån  $\sigma/f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 0,14$ .

För att ge en uppfattning om de olika armeringsstålens kryppförlopp relativt varandra redovisas kryppningen under 1,4 h vid 600 och 650°C för olika påkänningar i **fig. 5.13** respektive **5.14**. Av figurerna framgår att storleken på kryppningen är likartad vid samma absoluta påkänning. Mest avviker Ks 40 Ø 8 vid 600°C och påkänningen 132 MPa. Dock är orsaken svår att utröna. Jämförelser med Ps 50 Ø 5 och Ss 50 Ø 4 är inte gjorda, då dessa resultat är mycket osäkrare. Vid genomgång av kryppförsöken vid 500°C finner man att kryppningen efter ca 1,5 h ligger i storleksordningen 0,004 à 0,005 vid relativa påkänningar = 0,45. Denna relativa påkänning motsvarar vid 500°C ca 0,9 av  $f_{y, 500^{\circ}\text{C}}$  och är således hög.

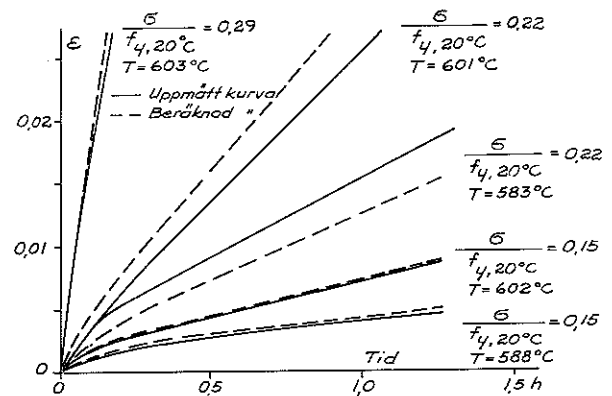


Fig. 5.10 Kryppkurvor för Ks 60 Ø 8 ·  $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 710$  MPa.

Creep curves for Ks 60 Ø 8 ·  $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 710$  MPa.

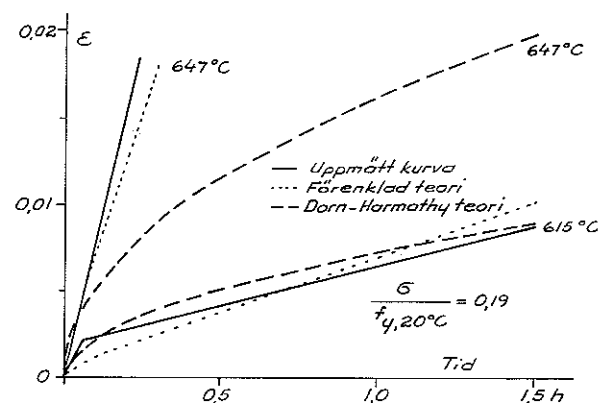


Fig. 5.11 Kryppkurva för Ks 40 Ø 8 (Försöksserie 2B) ·  $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 504$  MPa.

Creep curves for Ks 40 Ø 8 (Test series 2B) ·  $f_{y, 20^{\circ}\text{C}} = 504$  MPa.



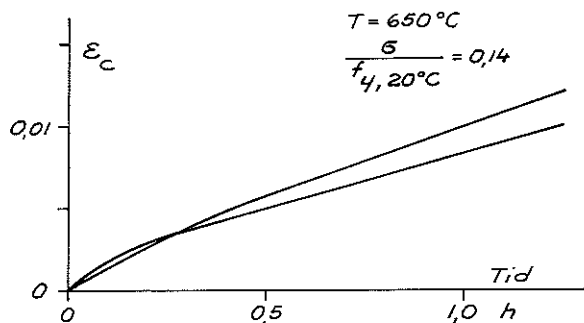


Fig. 5.12 Resultatspridning i två krypförsök med provstavar från samma charge. Ks 40 Ø 10 ·  $f_{y, 20 °C} = 483 \text{ MPa}$ .

Deviation in results in two creep tests with specimens from the same heat. Ks 40 Ø 10 ·  $f_{y, 20 °C} = 483 \text{ MPa}$ .

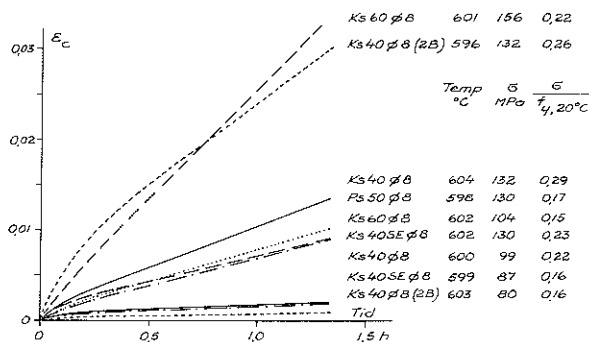


Fig. 5.13 Jämförelser i krypförlopp för olika stål vid ca 600 °C och olika påkänningar.

Comparison in creep process for different steels at about 600 °C and various stresses.

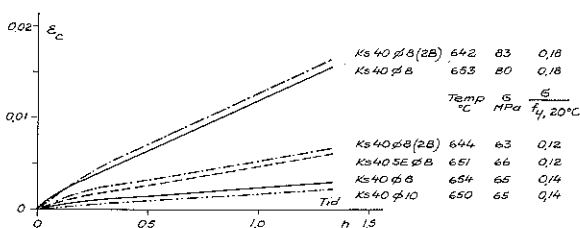


Fig. 5.14 Jämförelser i krypförlopp vid olika varmvalsade stål vid ca 650 °C och olika påkänningar.

Comparison in creep process for different hot-rolled steels at approximately 650 °C and various stresses.

## 6 DEFORMATIONER VID TRANSIENTA FÖRLOPP

Deformationsförloppet har uppmätts vid konstant temperatur och varierande påkänning (5 försök) samt vid konstant påkänning och linjärt varierande temperatur (3 försök) i enlighet med Tabell 3:7. Med hjälp av tidi-

Tabell 3.7 Transienta försök, varierande temperatur

Armeringsstål Ks 40 Ø 10  
 $f_{y, 20 °C} = 483 \text{ MPa}$

Begynnelse-temperatur °C	Temperatur-ökning (°C/s) · 10 <sup>2</sup>	Påkänning MPa	Påkänning $\sigma / f_{y, 20 °C}$
397	1,7	74	0,16
408	1,6	112	0,23
383	1,65	161	0,33

gare insatt samband mellan  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvor och krypning samt termisk expansion har deformationsförloppet beräknats teoretiskt med den totala töjningen uppdelad i tre komponenter, enligt nedan.

$$\epsilon = \epsilon_1(T) + \epsilon_2(T, \sigma) + \epsilon_3(t, T, \sigma) \quad (6.1)$$

där

$\epsilon_1(T)$  = termisk expansion  
 $\epsilon_2(T, \sigma)$  = momentan, påkänningsrelaterad töjning baserad på  $\sigma$ - $\epsilon$ -samband  
 $\epsilon_3(t, T, \sigma) = \epsilon_3(\theta, \sigma)$  = kryptöjning eller tidsberoende töjning

där

$\theta(t, T)$  = temperaturkompenserad tid enligt avsnitt 5:2

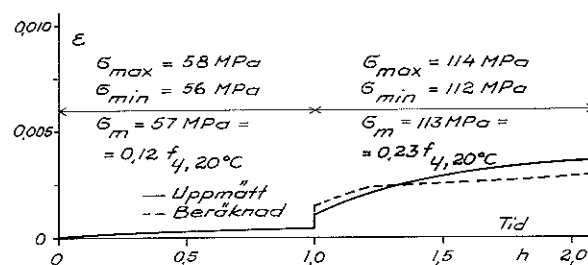


Fig. 6.1 Krypförlopp vid varierande påkänning för Ks 40 Ø 10.

Creep process for Ks 40 Ø 10 at varying stress.

I fig. 6.1 visas deformationsförloppet för Ks 40 Ø 10 vid 551 °C då den relativa påkänningen under första timmen är 0,12 och sedan momentant ändras till 0,23 för att vara konstant under den andra timmen. Streckad kurva anger beräknat förlopp under andra timmen där kryptöjningen är utvärderad ur fig. 5.7—5.9 enligt förenklad krypteori. Den momentana påkänningsrelaterade töjningen är enligt fig. 4.1 och är något större än den uppmätta. Överensstämmelsen får emellertid anses vara acceptabel.

Deformationsförloppet är också uppmätt för det förhållandet att den relativa påkänningen är 0,27 under första timmen och 0,12 under andra timmen med i övrigt samma förhållande. Se fig. 6.2. Dock sjunker temperaturen efter ca 1,5 tim. vilket också är visat i fig. 6.2.

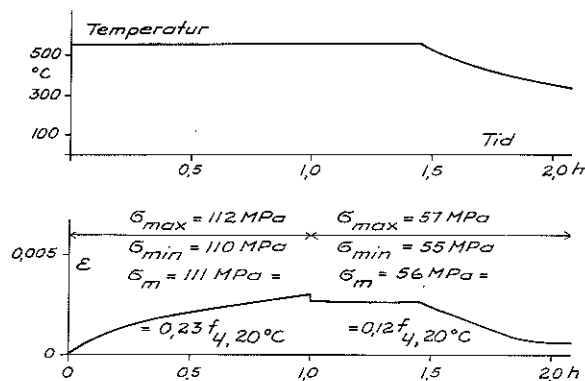


Fig. 6.2 Krypförlopp vid varierande påkänning för Ks 40 Ø 10.

Creep process for Ks 40 Ø 10 at varying stress.

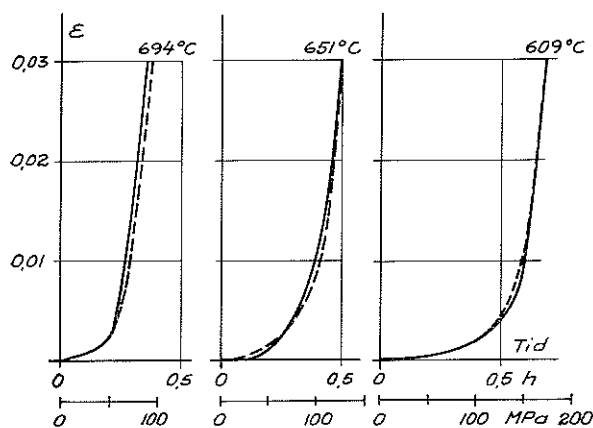


Fig. 6.3 Deformationsförlopp vid linjärt stigande last, 0,07 MPa/s. Ks 40 Ø 10.  
Deformation process at linearly increasing load, 0,07 MPa/s. Ks 40 Ø 10.

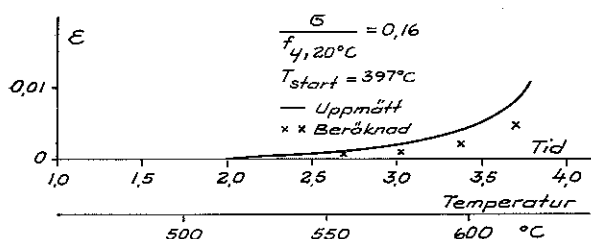


Fig. 6.4 Kryp-förloppet vid linjärt stigande temperatur,  $1,7 \cdot 10^{-2}$  °C/s och konstant påkänning. Ks 40 Ø 10.  
Creep process at linearly increasing temperature,  $1,7 \cdot 10^{-2}$  °C/s and constant stress. Ks 40 Ø 10.

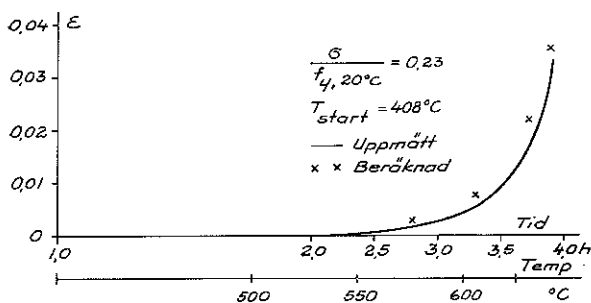


Fig. 6.5 Kryp-förloppet vid linjärt stigande temperatur,  $1,6 \cdot 10^{-2}$  °C/s och konstant påkänning. Ks 40 Ø 10.  
Creep process at linearly increasing temperature,  $1,6 \cdot 10^{-2}$  °C/s and constant stress. Ks 40 Ø 10.

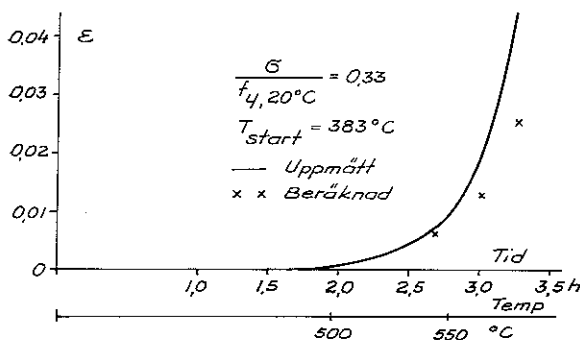


Fig. 6.6 Kryp-förloppet vid linjärt stigande temperatur,  $1,65 \cdot 10^{-2}$  °C/s och konstant påkänning. Ks 40 Ø 10.  
Creep process at linearly increasing temperature,  $1,65 \cdot 10^{-2}$  °C/s and constant stress. Ks 40 Ø 10.

I avsnitt 4.1 visades belastningshastighetens inverkan på  $\sigma$ - $\epsilon$ -kurvan, varvid framkom att vid belastningshastigheten 0,07 MPa/s krypningen har en tydlig inverkan. I fig. 6.3 visas deformationsförloppet vid temperaturerna 609, 651 och 694°C, hos Ks 40 Ø 10 som funktion av både tid och påkänning på den horisontella axeln. Helldragna kurvor anger uppmätt förlopp medan streckade kurvor visar enligt Dorn-Harmathy beräknat förlopp. Överensstämmelsen är god. Den teoretiska kurvan är beräknad utifrån  $\sigma$ - $\epsilon$ -sambandet för Ks 40 Ø 10 bestämd vid belastningshastigheten 3,5 MPa/s d v s vid försumbar krypning. Summationen av krypningsbidraget har skett med superposition.

I den andra typen av transienta försök med linjärt stigande temperatur ca 1°C/min och konstant påkänning (3 st försök Ks 40 Ø 10) enligt Tabell 3:8 har krypdeformationen erhållits genom att minska den totala deformationen med den termiska expansionen. Krypdeformationen är beräknad enligt Dorn-Harmathy. Jämförelsen mellan uppmätt och beräknat krypförlopp visas i fig. 6:4—6 vid de relativa påkänningsnivåerna 0,16, 0,23 och 0,33 och överensstämmelsen är god även här.

## 7 SAMBAND MELLAN KARAKTERISTISK PÅKÄNNING OCH KRITISK TÖJNING

Vid en brandteknisk dimensionering av armerade betongkonstruktioner har det varit vanligt att använda något karakteristiskt värde  $f_y$ . Ett bättre alternativ kunde vara att basera dimensioneringen på den faktiska påkänningen vid någon kritisk töjning enligt t ex fig. 7.1

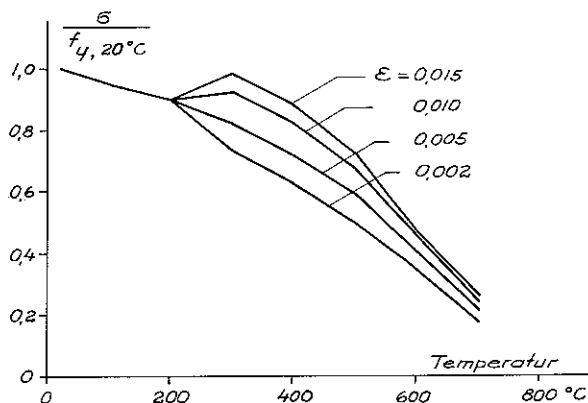


Fig. 7.1 Faktisk påkänning som funktion av temperaturen vid olika kritiska töjningar för varmvalsat stål.  
Actual stress as a function of temperature for hot-rolled steel at various critical strains.

som sammanfattar denna studies resultat från varmvalsat stål. Av figuren framgår t ex att den kritiska påkänningen ökar 10 till 15 % inom temperaturintervallet 300—600°C om den kritiska töjningen ökas till 0,005 från 0,002.

Vid analys av bärförmågan hos brandutsatta armerade betongtvärsnitt, har nämnts som armeringens kritiska töjning 0,002. Här har värdet 0,005 eller något högre aktualiserats.

## 8 SAMMANFATTNING

Undersökningen behandlar olika armeringsståls (Ks 40, Ks 40 SE, Ks 60, Ps 50 och Ss 50) mekaniska egenskaper, dvs påkännings-töjningssamband och krypegenskaper vid höga temperaturer.

Vid ökande temperatur sjunker successivt värdet på 0,2-gränsen, brottgränsen och elasticitetsmodulen. Krypningen blir betydelsefull vid temperaturer över 450°C.

Varmvalsade stål uppvisar ett mycket likartat temperaturberoende för den dimensionslösa arbetslinjen varför representativa kurvor för sådana presenteras. Varje kallbearbetat stål har emellertid sitt specifika temperaturberoende. Det dimensionslösa  $\sigma$ - $\varepsilon$ -sambandet följer ofta en rät linje med ett elliptiskt slut för såväl varmvalsat som kallbearbetat stål. En eventuell sträckgräns ger en tillkommande horisontell linje.

Armeringens krypning, som är specifik för varje armeringskvalitet, är analytiskt beskriven med hjälp av Dorn-Harmathys krypteori för samtliga armeringskvaliteter. För Ks 40 har förenklade samband för krypningens tidsförlopp uppställts och jämförts med Dorn-Harmathy-teorin. Den förenklade teorin, som innebär att krypkurvan approximeras med två rätta linjer, en i primärskedet och en i sekundärskedet, uppvisar minst lika god överensstämmelse med uppmätta resultat, som den gängse teorin. Den nya beskrivningen av krypförloppet är åskådliggjort i nomogram för Ks 40, där kryphastigheten direkt kan avläsas vid känd påkänning och temperatur.

## 9 REFERENSER

DORN, J E,

Some fundamental experiments on high temperature creep, Journal of the mechanics and physics of solids, Vol 3, p 35, London 1954.

HARMATHY, T Z,

Deflection and failure of steel-supported floors and beams in fire, National Research Council, Division of Building Research, Paper No. 195, Ottawa 1966.

## SUMMARY

The stress-strain relationship and creep behavior of various grades of reinforcing steel at high temperature are examined and some relationships suggested.

The ultimate stress, 0.2 stress, and modulus of elasticity of reinforcing steels decrease with increasing temperature, while creep begins to be significant at temperatures above 450°C. Since the temperature dependence of various hot-rolled reinforcing steels is similar, a representative dimensionless stress-strain curve, consisting of a straight and an elliptical branch, can be drawn. The temperature dependence of each grade of cold-worked steel is, however, unique and individual stress-strain curves must be drawn.

The accepted formulation for determining the creep of various grades of reinforcing steel is that of Dorn and Harmathy. A simpler relationship for the variation of creep with time for Ks 40 steel is developed herein. The creep curve is approximated by two straight lines, one in the primary and another in the secondary phase. This relationship yields results that agree with measurements of creep as closely as do values from Dorn and Harmathy's formulation. The new creep formulation for Ks 40 reinforcing steel is illustrated in nomograms from which the rate of creep can be directly estimated from given stress and temperature.

HOLMBERG, Å,

Sträck- och brottgräns hos varmvalsade rundjärn, Teknisk Tidskrift 1947, p 724.

PLEM, E,

Theoretical and experimental investigations of point set structures, Byggforskningen D9:1975.

THOR, J,

Statiskt obestämda stålbalkars deformation och bärförmåga vid brandpåverkan — Experimentell och teoretisk undersökning. Jernkontoret D 54, Stockholm 1972.

# APPENDIX I

Kompletterande försöksvärden avseende 4.1

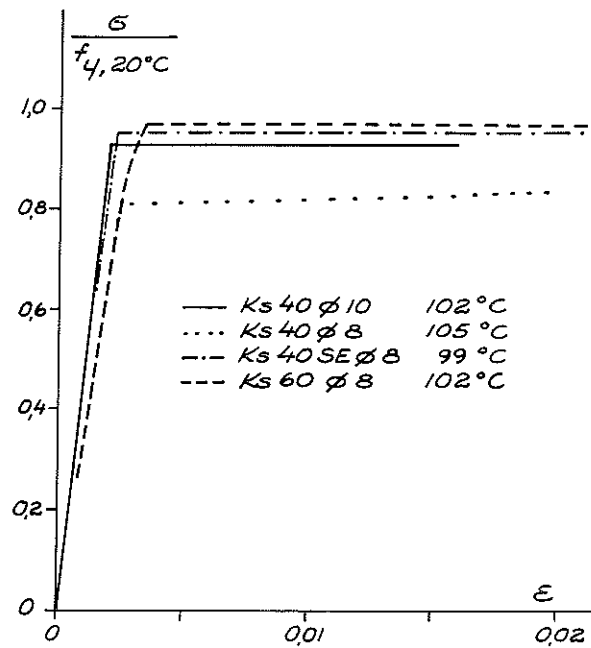


Fig. 1 Arbetslinjen för varmvalsat stål vid a) ca 100°C b) ca 200°C c) ca 300°C d) ca 500°C e) ca 700°C.

Stress-strain curve for hot-rolled steel at approximately a) 100°C b) 200°C c) 300°C d) 500°C and e) 700°C.

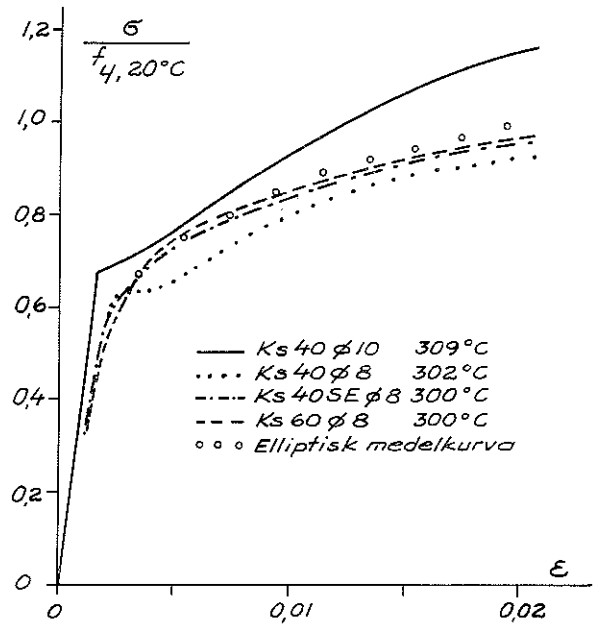


Fig. 1 c

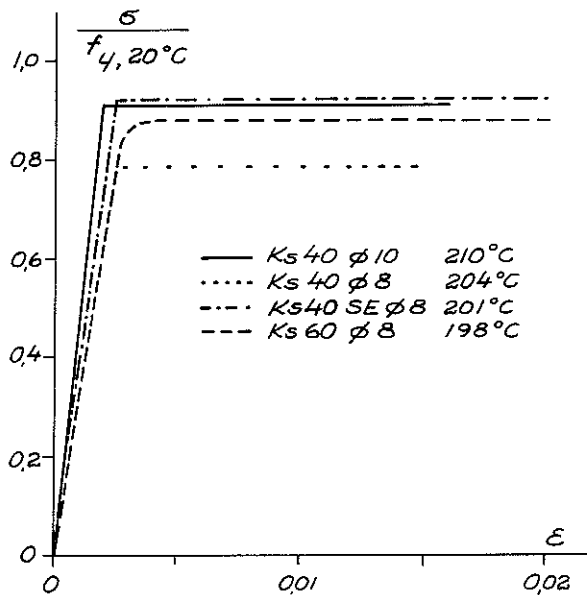


Fig. 1 b

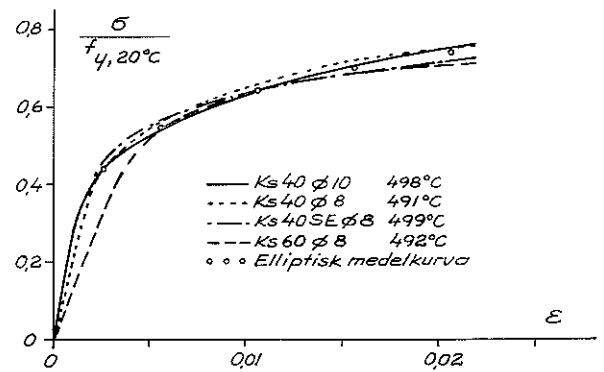


Fig. 1 d

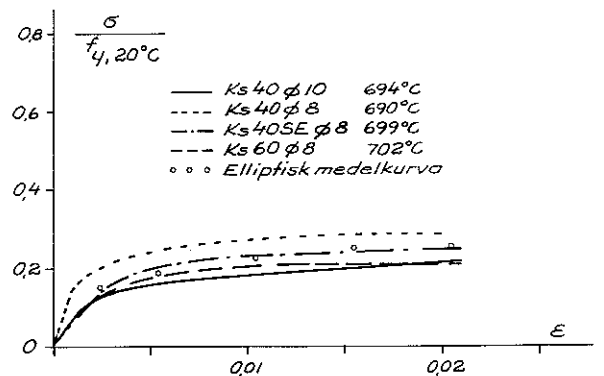


Fig. 1 e



## APPENDIX II

Kompletterande försöksvärden avseende 4.2

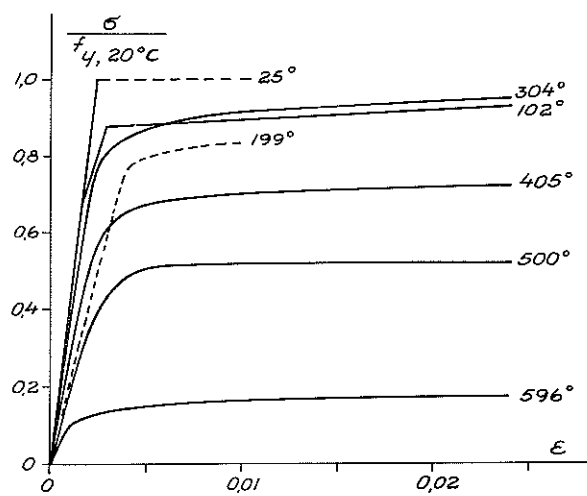


Fig. II Arbetslinjen för Ss 50 Ø 5 vid höga temperaturer.  
Stress-strain curve for Ss 50 Ø 4 at high temperature.

# APPENDIX III

## Kompletterande försöksvärden avseende 5.1

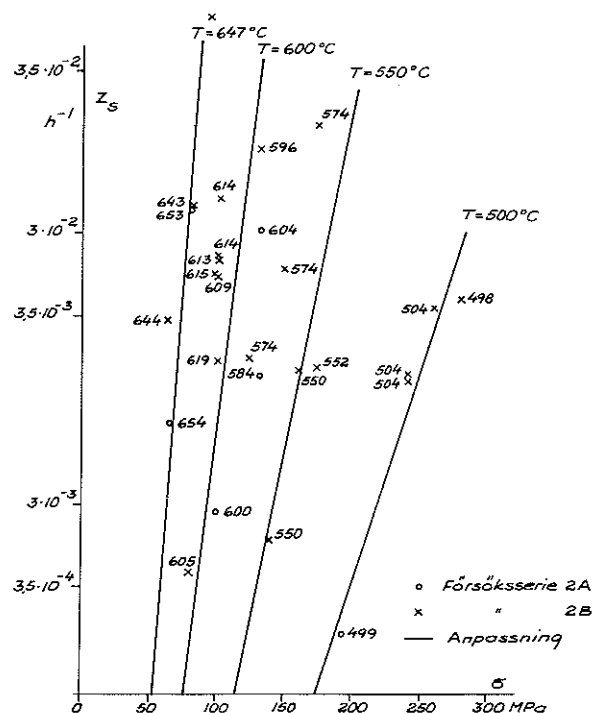


Fig. III a Lutningen,  $Z_s$ , i sekundärskedet som funktion av påkänning och temperatur.

Slope,  $Z_s$ , in the secondary stage as a function of stress and temperature.

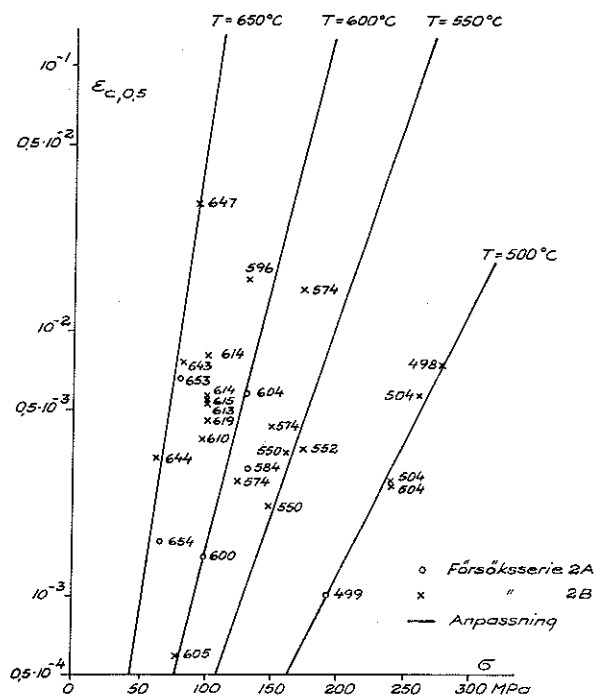


Fig. III c Krypningen efter 0,5 tim,  $\epsilon_{c,0.5}$ , som funktion av påkänning och temperatur.

Creep after 0,5 h,  $\epsilon_{c,0.5}$ , as a function of stress and temperature.

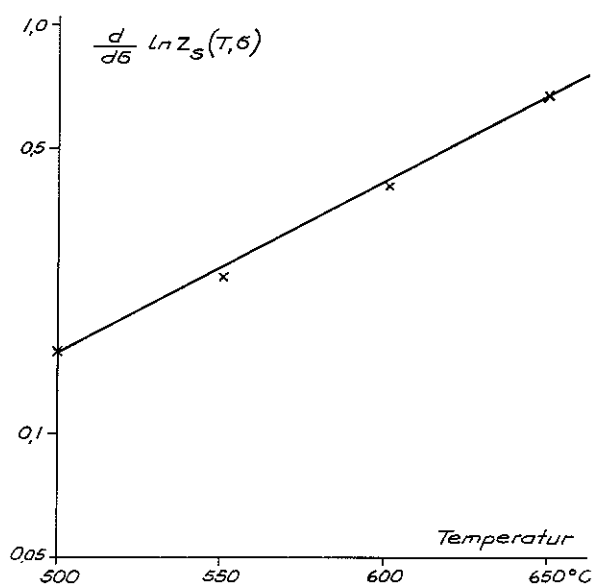


Fig. III b Påkänningsberoendet hos  $Z_s$  vid varierande temperatur.

Dependence of stress on  $Z_s$  at varying temperature.

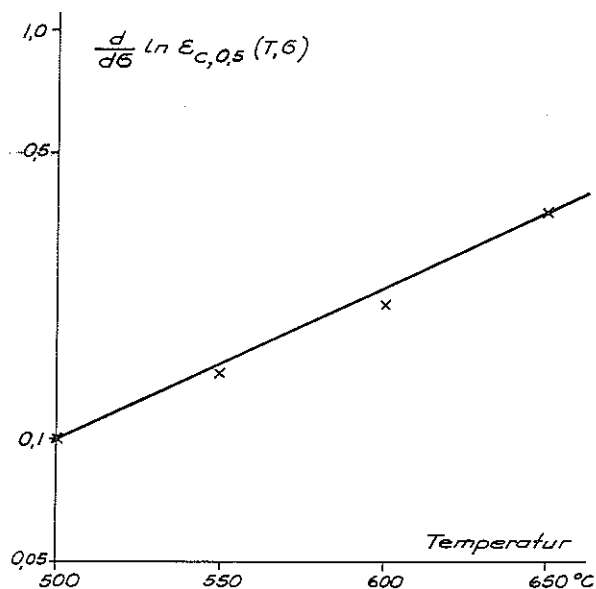


Fig. III d Påkänningsberoendet hos  $\epsilon_{c,0.5}$  vid varierande temperatur.

Dependence of stress on  $\epsilon_{c,0.5}$  at varying temperature.

## Förteckning över hittills utgivna Tekniska meddelanden

( 1) Erfarenheter av slät armering med höga påkänningar.	Åke Holmberg	1956
( 2) Betongpålars armering.	Åke Holmberg	1956
( 3) Sandwichelement av samverkande skivor.	Åke Holmberg	1957
( 4) Stångförespända fabriksgjorda betongbalkar. Bergbultar HJS 80.	Åke Holmberg	1959
( 5) Studium av balkupplag och pelarhuvuden vid montagebyggnad.	Åke Holmberg	1960
( 6) Skarvning av HJS 70 med Forssellringar.	Carl Forssell	1960
( 7) Studier rörande armeringsnåts hållfasthet och förankring.	Åke Holmberg	1960
( 8) Vippringsproblem vid hissning och montering av slanka balkar.	Ove Pettersson	1960
( 9) Synpunkt på häftsveitsning av armeringsstål.	Hans Hoffstedt	1961
10 Sandwichelement i provning och tillämpning.	Åke Holmberg och Erik Plem	1961
(11) Risken för galvanisk korrosion vid konstruktioner med sandwichelement.	Gustav Nilsson	1961
(12) Eldsvåda som "brandprov i full skala".	Paul Johannesson	1961
(13) Pelares bygelarmering.	Åke Holmberg	1962
14 Dragförsök med bergförankringar av förespänningsstål.	Birger Ludvigson	1963
15 Fördelad förlängning hos stål.	Åke Holmberg och Torsten Möller	1963
16 Källarmurars värmeisolering.	Åke Holmberg	1964
17 Armeringsstänger som pålar.	Allan Bergfelt	1964
18 Förankring av spännarmering i förespänd betong.	K.-G. Bernander	1965
19 Armerings kraftöverföring och förankring.	Åke Holmberg och Sten Lindgren	1967
20 Avvikelser i armeringsstängernas läge.	Arne Johansson och Birger Warris	1967
21 Betongrörsarmering. Toleranser och säkerhet.	Ivar Magnusson	1967
22 Hållfastheten hos bockade armeringsstänger.	Bo Törnwall	1967
23 Några undersökningar på kontinuerliga betongbalkar med överarmerat stödtvärnsnitt	Tage Petersson	1969
24 Säkerhetsfaktorer för stål- och betongkonstruktioner Skillnader och motiv	Lars Östlund	1970
25 Imperfektioner vid montagebyggande med betongelement.	Sven Sahlin	1971
Beräkningsmässig hänsyn till imperfektioner i montagebyggen.	Mogens Lorentsen	1971
26 Experimentellt studium av tillväxtflytbrott hos armerade betongbalkar.	Arne Hillerborg	1971
27 Atmosfärisk korrosion av armeringsstål.	Roland Johansson	1971
28 Experimentellt studium av flytledsrotation hos kontinuerliga betongbalkar.	Jan-Erik Janson	1972
29 Armering Nps 70. Förankring. Skarvning. Sprickbegränsning.	Åke Holmberg och Sten Lindgren	1973
30 Experimentellt studium av tvärkraftshållfastheten vid armerade betongbalkars momentnollpunkter	Torbjörn Larsson	1973
31 Betongbyggnadskorrosion	Werner v Olmhausen	1974
Korrosjon og korrosjonsbeskyttelse av betongkonstruksjoner	Ivar Gukild	1974
32 Infästning av förtillverkade betongpelare	Jan Andersson	1974
33 Experimentellt studium av betongplattor understödda av hörnpelare	Hans Ingvarsson	1974
34 Armering kring hål i betongbalkar	Sten Lindgren	1974
35 Studier rörande T-balkar med dragen fläns.	Jan-Erik Jonasson	1977

( ) anger att meddelandet ej längre finns i lager. Kopia sänds på begäran.