



# LUND UNIVERSITY

## Studie av skäreppens belastningsbild vid diskontinuerlig spånbildning

Ståhl, Jan-Eric; Östholm, Stefan

1984

*Document Version:*  
Förlagets slutgiltiga version

[Link to publication](#)

*Citation for published version (APA):*

Ståhl, J.-E., & Östholm, S. (1984). *Studie av skäreppens belastningsbild vid diskontinuerlig spånbildning*. (Institutionen för mekanisk teknologi och verktygsmaskinens rapportserie; Nr. Nr: 84-02).

*Total number of authors:*  
2

### 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



# INSTITUTIONEN FÖR MEKANISK TEKNOLOGI TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND

STUDIE AV SKÄREGGENS BELASTNINGSBILD VID DISKONTINUERLIG  
SPÄNBILDNING \_\_\_\_\_ JE.S

SAMT

BESKRIVNING AV ETT DATORBASERAT SYSTEM FÖR MÄTNING OCH  
SIGNALANALYS AV SKÄRKRAFTER \_\_\_\_\_ S.Ö

UTFÖRT AV: JAN ERIC STÅHL  
STEFAN ÖSTHOLM

LUND 1984-10-10 , 1985 - 05-28

Rapport Nr: 84-02

Ver.1 , Antal ex.=20 st.

ver.2 , Antal ex.=15 st.

TEKNISKA HÖGSKOLAN I LUND  
Institutionen för mekanisk  
teknologi och verktygsmaskiner

LUND UNIVERSITY  
Department of Production and  
Materials Engineering

Ole Römers väg 1  
Box 725  
S-220 07 Lund  
Sweden

## FÖRORD

Denna forskningsrapport vänder sig till de som är intresserade av och sysslar praktiskt med skärande bearbetning. De framlagda teorierna får ännu ses som hypoteser och om utfallet blir positivt skall dessa leda till ett bättre val av skärdata främst vid bearbetning i material med ett diskontinuerligt spånuppträdande.

Rapporten bygger i sin helhet på forskningsresultat framtagna vid institutionen för mekanisk teknologi vid Lunds Tekniska Högskola. Inom området för skärande bearbetning pågår två projekt vilka behandlar problematiken kring och orsakerna till spontana egghaverier och utveckling av erforderliga strategier för bearbetningsövervakning.

Det direkta forskningsarbetet har hittills letts av Jan Eric Ståhl. Arbetet med programutveckling för mätning och analys av bla skärkrafter har i sin helhet utförts av Stefan Östholm.

Författarna vill framföra ett stort tack till professor Olov Svahn som har uppmuntrat och hjälpt oss under arbetets gång. Vi vill även tacka instrumettekniker Ingemar Jonasson som har hjälpt oss med att lösa en hel del praktiska problem.

författarna

## SYMBOLLISTA

$A_{sl}$	=	axialkraft verkande på släppningssida
$A_{sp}$	=	axialkraft verkande på spånsida
$A_{seg}$	=	spånsegment area
$a$	=	rörelseamplitud i x-riktning
$a_n$	=	axiell normerad normalkraft, fourierkoefficient
$a_{\perp}$	=	axiell normerad skjuvkraft
$b_n$	=	fourierkoefficient
$C_r$	=	skärmotstånd baserat på tangentialkraftens medelvärde
$C_{rmax}$	=	skärmotstånd baserat på maximal tangentialkraft
$C_r$	=	skärmotstånd
$C_p$	=	specifik värme
$C$	=	konstant
$C_1$	=	konstant
$C_2$	=	konstant
$e$	=	godtycklig ingreppskoordinat
$e_1$	=	ingreppssträcka för att bilda ett spånsegment
$e_2$	=	spånsegmentbredd
$e_{20}$	=	segmentets bredd i den sekundära deformationszonen
$e_{2\perp}$	=	segmentets minsta likformiga tjocklek
$e_{el}$	=	elastisk ingreppssträcka
$e_{spf}$	=	ingreppslängd motsvarande spånformningssteget
$e_{av}$	=	ingreppslängd motsvarande avskjuvningssteget
$F$	=	förstärkning
$F_A$	=	axialkraft
$F_T$	=	tangentialkraft
$f$	=	frekvens eller frekvensfördelning
$f_e$	=	egenfrekvens
$f_s$	=	segmentbildningsfrekvens
$f_x(t)$	=	störande kraft i x-riktningen
$h_1$	=	nominell spåntjocklek, teoretisk spåntjocklek $s \cdot \sin \alpha$
$h_2$	=	spåntjocklek
$h_2$	=	medelspåntjocklek
$h_2$	=	spånsegmentets topphöjd
$h_{20}$	=	segmentets likformiga höjd
$h_{2m}$	=	maximala spåntjockleken

$k$	= fjäderkonstant
$LF$	= lägsta frekvens
$l_c$	= kontaktlängd verktyg/spåna
$m_e$	= ekvivalent massa
$N_a$	= antalet analyserade punkter
$N_k$	= totala antalet punkter för en kanal
$R$	= resistans
$s$	= matning $h_1/\sin\kappa$
$T_s$	= svephastighet
$T_{sl}$	= tangentialkraft verkande på släppningssida
$T_{sp}$	= tangentialkraft verkande på spånsida
$t$	= skärdjup, tid
$t_s$	= tid för att bilda ett spånsegment
$t_n$	= tangentiell normerad normalkraft
$t_{\perp}$	= tangentiell normerad skjuvkraft
$u$	= förskjutning i x-led
$v$	= skärhastighet, vågutbredningshastighet
$v_{krit}$	= kritisk skärhastighet map påtvingade svängningar
$v_s$	= spånhastighet
vikt	= intensitet
$x$	= koordinatriktning
$z$	= koordinatriktning

## GREKISKA SYMBOLER

$\alpha$	=	släppningsvinkel
$\gamma$	=	spänvinkel
$\gamma_b$	=	deformation vid brott
$\gamma_s$	=	deformation vid spånbildningen
$\epsilon$	=	stördifferens ( $\rho_e - \rho_s$ )
$\theta$	=	eggtemperatur
$\kappa$	=	ställvinkel
$\lambda$	=	spånstukning, våglängd
$\rho$	=	störtal eller störfördelning, densitet
$\rho_e$	=	egenstörtal
$\rho_s$	=	segmentbildningsstörtal
$\rho_{s1}$	=	segmentbildningsstörtal beräknat på segmentarean
$\rho_{s2}$	=	segmentbildningsstörtal beräknat på segmentets rotbredd
$\rho_{s3}$	=	segmentbildningsstörtal beräknat på den "minsta" segmentbredden
$\psi$	=	variationstal ( $F_T(e)/F_T - 1$ )
$\sigma_0$	=	dimensionslös spänning
$\sigma_{0max}$	=	dimensionslös maximispänning
$\sigma_e$	=	spridning i störfördelning
$\sigma_{ee}$	=	spridning i egenstörtalfördelning
$\sigma_{nsp}$	=	normalspänningsfördelning på spånsidan
$\varphi_s$	=	lastfördelningsfunktion $F_A/F_T$
$\varphi_T$	=	tangentiell lastfördelningsfunktion $T_{sl}/F_T$
$\varphi_A$	=	axiell lastfördelningsfunktion $A_{sl}/F_A$
$\omega$	=	vinkelfrekvens
$\omega_s$	=	spånbildningens vinkelfrekvens

## INNEHALLSFÖRTECKNING

1	INLEDNING	1
2	ALLMÄNT OM DISKONTINUERLIG SPÄNBILDNING	2
3	GEOMETRISK STUDIE AV SKJUVSPANBILDNING	3
3.1	Definition av skärprocessens störtal och störfördelning	4
3.2	Maskinsystemets dynamiska egenskaper - en förenklad modell	5
4	STÖRTAL OCH STÖRFÖRDELNINGAR FÖR ARBETSMATERIAL MED DISKONTINUERLIG SPÄNBILDNING	10
4.1	Stötalets geometriska tolkning	17
4.2	Mätning på spåna för att bestämma segmentbildningens störtal	18
4.3	Störtalets beroende av den nominella spåntjockleken	26
5	SPECIELLA IAKTTAGELSER I ANSLUTNING TILL PRAKTISKA FÖRSÖK	34
5.1	Deformation vid diskontinuerlig spänbildning	34
5.2	Olika typfall av diskontinuerlig spänbildning	37
6	SKÄREGGENS BELASTNINGSBILD FÖR OLIKA FÖRHÅLLANDE MELLAN STÖRTALEN	39
6.1	Allmän teori för skäreppens belastningsbild	39
6.2	Störtalens inflytande på skäreppens belastningsbild	43
7	BESKRIVNING AV MÄTSYSTEM FÖR INSAMLING AV MÄTDATA	47
7.1	Givare	48
7.2	Signalförstärkare	50
7.3	Oscilloskop med GPIB	52
7.4	Dator med kringutrustning	53
7.5	Programvara för mätning och signalanalys	54
8	SAMMANFATTNING OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE	61
8.1	Sammanfattning av uppställd modell	61
8.2	Användningsområden för utarbetad modell	62
8.3	Förslag till fortsatt arbete	62
9	REFERENSER	66

## 1. INLEDNING - STUDIE AV SKÄREGGENS BELASTNINGSBILD VID DISKONTINUERLIG SPÅNBILDNING

Vid institutionen för mekanisk teknologi pågår två forskningsprojekt inom området skärande bearbetning. Vilka behandlar spontana egghaverier samt processidentifiering med tillhörande modellarbete för bearbetningsövervakning.

Under inledande skärförsök i grått gjutjärn med syftet att bestämma bl.a. skäreagens belastningsbild erhöles oväntade haverier på fullgoda verktygs-eggar för vissa skärdata kombinationer. Vid närmare studier fann man att haverierna emanerade från påtvingade svängningar från spånbildningsprocessen. Vi ställde oss följande frågor:

- Kan man på något sätt förutsäga detta icke önskvärda svängningstillstånd?
  
- Hur pass beroende är detta svängningsupp-trädande av materialdata och av skärparametrarna?
  
- Kan man övervaka denna typ av svängningsupp-trädande "on line" genom att t.ex. signalanalysera skärkrafterna?
  
- Kan man göra en "enkel" materialprovning för att bestämma processens materialberoende.

Rapporten behandlar mer eller mindre svaren till de ovan ställda frågorna och problematiken kring erforderliga lösningsmetoder samt möjliga mät- och registreringsförfaranden för mätning på skärförlopp. De mät och registreringsförfarande som är utvecklade finns redovisade i kapitel 7. Denna mätteknik kommer till viss del att ligga till grund för fortsatt arbete inom området för processidentifiering av skärförlopp för bearbetningsövervakning.



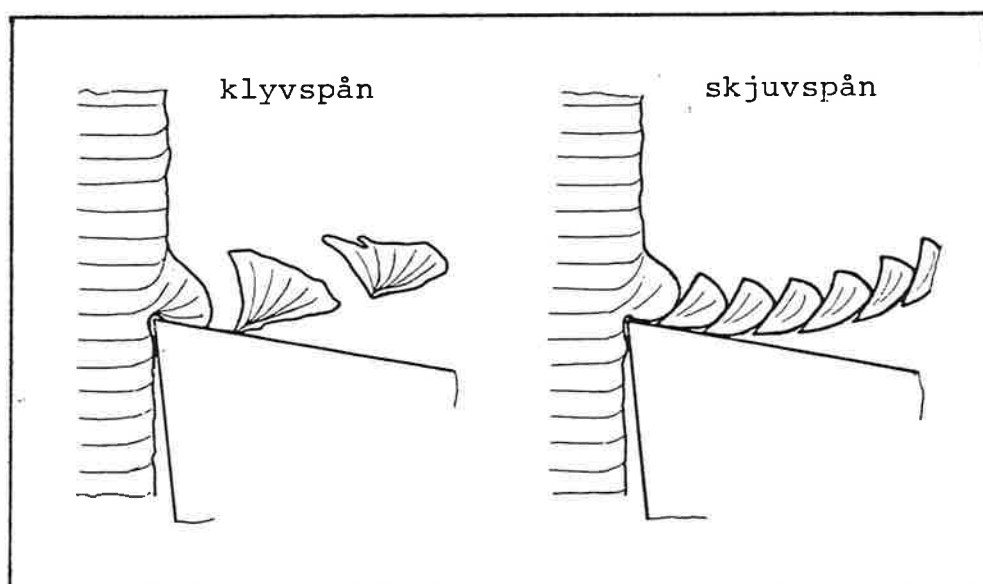
## 2. ALLMÄNT OM DISKONTINUERLIG SPÄNBILDNING

Ett diskontinuerligt spänuppträdande kan bl.a. erhållas då brott av spröd karaktär uppträder i den primära deformationszonen. Deformationen karakteriseras mer eller mindre av att

$$\gamma_s > \gamma_b \quad \text{---(1)}$$

under de rådande betingelserna, det vill säga att deformationen vid spänbildningen är större än den deformation som fordras för brott. Två typer av spånor kan erhållas under dessa förutsättningar vilka är skjuvspån och klyvspån. Skjuvspånan består av olikformade spånsegment vilka i olika omfattning har sammansvetsats. Då arbetsmaterialets uppträdande är mer sprött erhålles ett mer oregelbundet brott i den primära deformationszonen. Detta sker på ett sådant sätt att segmentytorna inte kan anpassa sig till varandra och detta medför att segmenten har svårt att sammansvetsas. Vi får då osammanhängande spånsegment. De båda spåntyperna visas i figur 1 nedan.

Vi kommer i fortsättningen främst att behandla diskontinuerlig skjuvspånsbildning. Det har senare visats att den framtagna teorin även kan appliceras på bearbetningsfall där kraftig lamellbildning förekommer.



Figur 1 Spåntyper vilka ger ett diskontinuerligt uppträdande med avseende på geometri och energiomsättning /1/.

### 3. GEOMETRISK STUDIE AV SKJUVSPANBILDNING

I figur 2 nedan finns en fiktiv sträcka  $e_1$  införd vilken motsvarar den ingreppslängd som erfordras för att bilda ett helt spånsegment. I det fall då vi har försumbar spånbreddning kan vi teckna segmentarean på två sätt enligt ekvation 2.

$$A_{\text{seg}} = h_1 \cdot e_1 = h_2 \cdot e_2 \quad \text{--- (2)}$$

Den fiktiva sträckan  $e_1$  kan vi uttrycka på två sätt som:

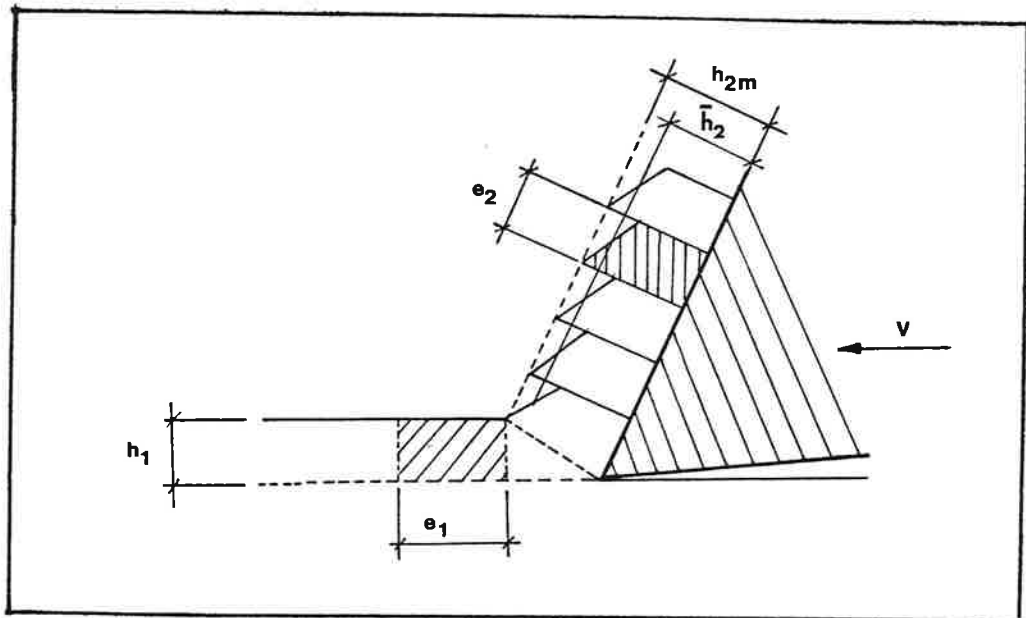
$$e_1 = \frac{h_2 e_2}{h_1} = \frac{A_{\text{seg}}}{h_1} \quad \text{--- (3)}$$

Förhållandet  $h_2/h_1$  definieras som spånstukningen  $\lambda$ .

Vi kan nu teckna sambandet mellan  $e_1$  och  $e_2$  som:

$$e_1 = \lambda \cdot e_2 \quad \text{--- (4)}$$

Den tid som åtgår för att bilda ett spånsegment kommer att vara proportionell mot spånans hastighet  $v_s$  i ett skärhastighetsintervall där



Figur 2 Geometrisk bild av tvådimensionell skjuvspånbildning.

Sambandet mellan frekvensspektra och störfördelning kan skrivas som:

$$f = \epsilon v \quad \text{_____ (9)}$$

Det visar sig vid praktiska försök att störfördelningen är i stor omfattning oberoende av skärhastigheten med undantag från maskinsystemets inverkan på egenfrekvenser.

### 3.2 Maskinsystemets dynamiska egenskaper - en förenklad modell

I de fall då skärprocessens frekvenser sammanfaller eller ligger "tillräckligt nära" maskinsystemets egenfrekvenser kan svåra påtvingade vibrationer erhållas vars amplitud bestäms av systemets dämpningsförmåga. Under förutsättningen att det dynamiska systemet kan betraktas som linjärt vilket innebär att vi kan bygga en modell som endast består av "fjädrar, dämpare" och en ekvivalent massa kan svängningar i en riktning beskrivas med differentialekvationen nedan. En kopplad mekanik i två riktningar kan väl beskrivas och simuleras med tillgängliga programvaror.

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx = f_x(t) \quad \text{_____ (10)}$$

där:  $m_e$  = ekvivalent massa  
 $c$  = viskös dämpningskonstant  
 $k$  = totala systemets fjäderkonstant  
 $t$  = tiden  
 $x$  = koordinatriktning  
 $f_x(t)$  = störande kraft i x-riktningen

Om vi antar att den störande kraften  $f(t)$  orsakas av spänbildningen och antar vidare att denna varierar periodiskt med en vinkelfrekvens motsvarande spänsegmentbildningsfrekvensen och med en amplitud  $F_0$ , kan lösningen till differentialekvationen med en störning enligt ekvation 11 erhållas enligt ekvation 12.

konstant spånstukning erhålles. Tiden för att bilda ett segment kan vi teckna som:

$$t_s = \frac{e_2}{v_s} \quad \text{---(5)}$$

Segmentbildningsfrekvensen fås som det inverterade värdet av  $t_s$ .

$$f_s = \frac{1}{t_s} = \frac{v_s}{e_2} \quad \text{---(6)}$$

Genom att använda oss av spånstukningen och skärhastigheten  $v$  kan vi skriva segmentbildningsfrekvensen som:

$$f_s = \frac{v}{\lambda e_2} \quad \text{---(7)}$$

Med hjälp av definitionen på  $e_1$  kan vi kombinera ekvation 4 och ekvation 7 och erhålla ett nytt samband mellan segmentbildningsfrekvensen och skärhastigheten  $v$ .

$$f_s = \frac{v}{e_1} = e_s v \quad \text{---(8)}$$

### 3.1 Definition av skärprocessens störtal och störfördelning

Proportionalitetskonstanten i ekvation 8 definierar vi som spånbildningens störtal. Störtalet  $e_s$  kan förutom den geometriska betydelsen betraktas som en relaterad frekvens med avseende på skärhastigheten. Förutom segmentbildningsfrekvensen finns där ett stort antal andra frekvenser i skärprocessen som bl.a. är förknippade med inhomogeniteter hos arbetsmaterialet och varierande friktionsförhållande mellan spåna/verktyg och mellan arbetsstycke/verktyg. Vi kan generalisera ekvation 8 så att denna gäller för samtliga frekvenser i skärförloppet. Här kommer  $e_s$  att istället beskriva en störfördelning där  $e_s$  (spånsegmentbildningens störtal) många gånger kommer att ha ett dominant inflytande.

$$f_x(t) = F_0 \cos \omega_s t \quad \text{--- (11)}$$

$$x = \frac{F_0 \cos(\omega_s t - \phi)}{\sqrt{4\delta^2 \omega_s^2 + (\omega_e^2 - \omega_s^2)^2}} \quad \text{--- (12)}$$

där:  $F_0$  = störkraftens amplitud

$\omega_s$  = segmentbildningens vinkelfrekvens

$\phi$  = fasvinkel

$\omega_e$  = maskinsystemets egenvinkelfrekvens  $\sqrt{k/m_e}$

$\delta = c/2m_e$

$c$  = viskös dämpningskonstant

$m_e$  = ekvivalent massa

$k$  = fjäderkonstant

Verktyget utför en rörelse enligt ekvation 12 under de ansatta förutsättningarna med en vinkelfrekvens  $\omega_s$  och med en amplitud  $a$  enligt ekvation 13.

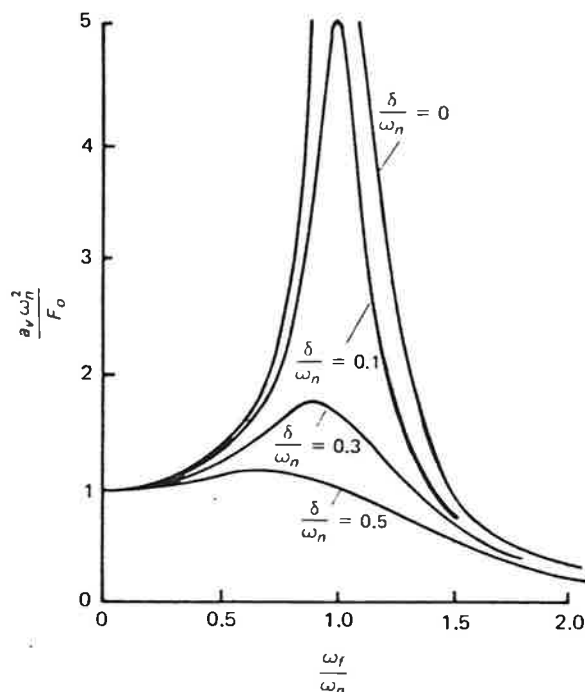
$$a = \frac{F_0}{\sqrt{4\delta^2 \omega_s^2 + (\omega_e^2 - \omega_s^2)^2}} \quad \text{--- (13)}$$

Beroende på differensen  $\omega_e - \omega_s$  och dämpningskoefficienten  $\delta$  kommer olika amplituder att erhållas. En generell lösning visas i dimensionslös form i figur 3. I det fall  $\omega_e = \omega_s$  erhålles maximal amplitud. Denna situation erhålles då segmentbildningsfrekvensen är lika med den mest dominanta egenfrekvensen eller då motsvarande egenstörtal är lika med spänbildningens störtal.

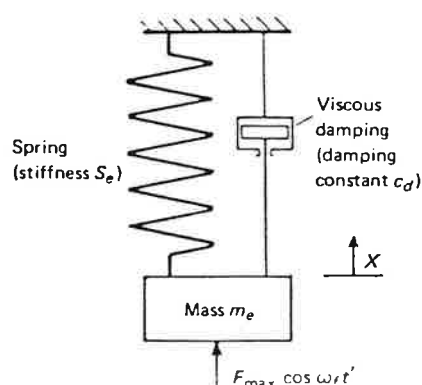
$$a = a_{\max} \quad \text{för} \quad f_s = f_e$$

alternativt

$$e_s = e_e \quad \text{--- (14)}$$



Figur 3 Resonanskurva för ett enkelt svängningssystem, beteckningar enligt tidigare /2/.



Figur 4 Model för ett enkelt linjärt system /2/.

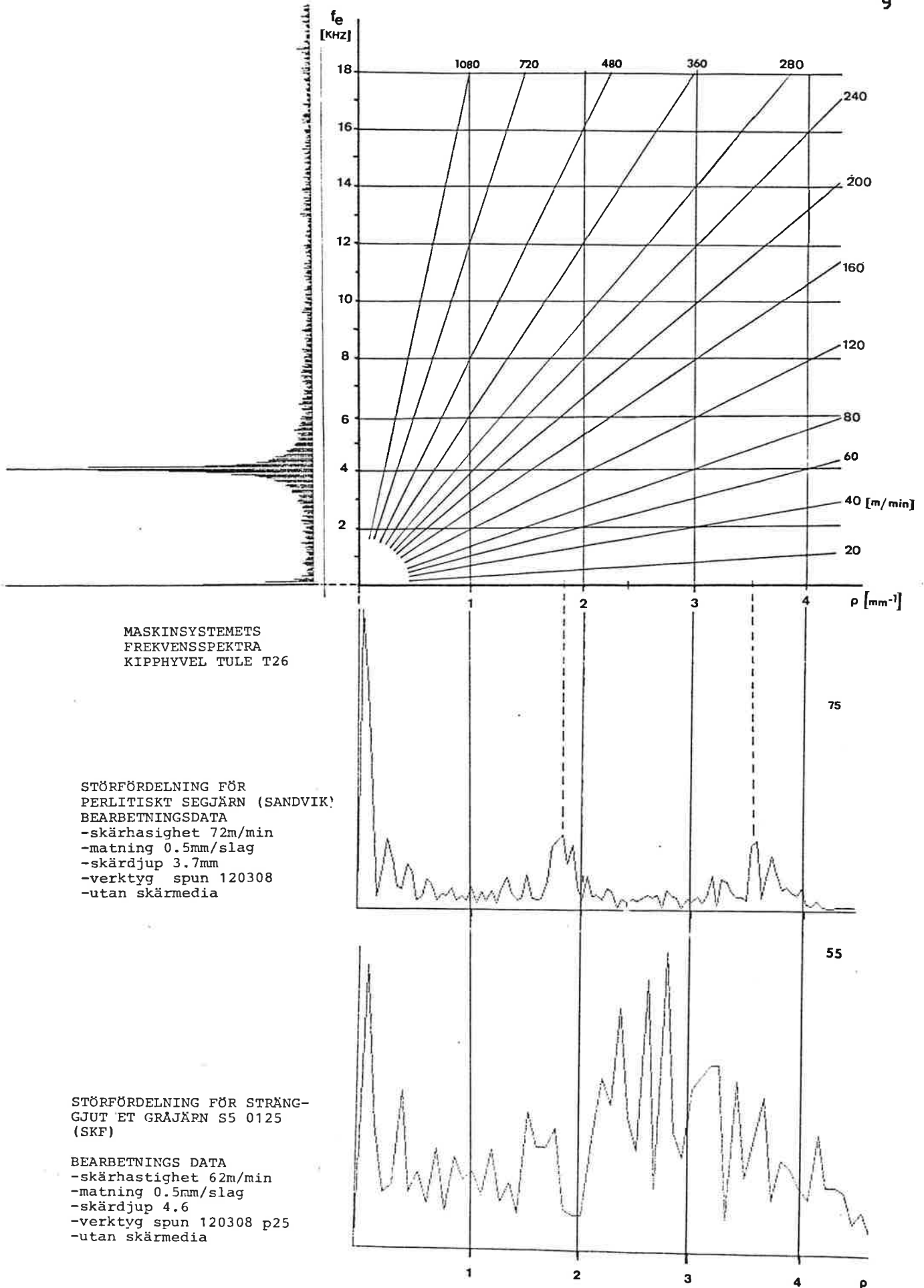
Egenstörtltalet  $e_e$  beräknar vi enligt tidigare generella definition

$$e_e = \frac{60f_e}{v} \quad \text{____ (15)}$$

där skärhastigheten  $v$  uttryckes i meter per minut. Den tidigare ekvationen 9 kan upprättas som en kurvskara där skärhastigheten är parameter. För en känd egenfrekvens (egenfrekvensspektra) och ett känt störtltalet (störfördelning) kan en kritisk skärhastighet bestämmas. Hur pass kritisk skärhastigheten är

bestäms av storleken på den amplitud som schematiskt erhöles från figur 3. Amplituden bestämdes i sin tur av de parametrar som ingick i ekvation 13. Vidden på det kritiska skärhastighetsintervallet beror av störfördelningens spridning och vikt (intensitet) i kombination med lösningarna erhållna från figur 3.

I figur 5 visas det ovan beskrivna för två givna störfördelningar (segjärn och gråjärn under samma betingelser) och ett maskinsystems egenfrekvensspektra. I det aktuella fallet är den dominerande egenfrekvensen ca. 4 kHz och de båda materialens störfördelningar har bl.a. extremvärden för 1.8 och 2.5 per mm, detta ger oss de två kritiska skärhastigheterna till 140 och 100 m/min.



**Figur 5 Störfrekvensdiagram för perlitiskt segjärn och grått gjutjärn.**

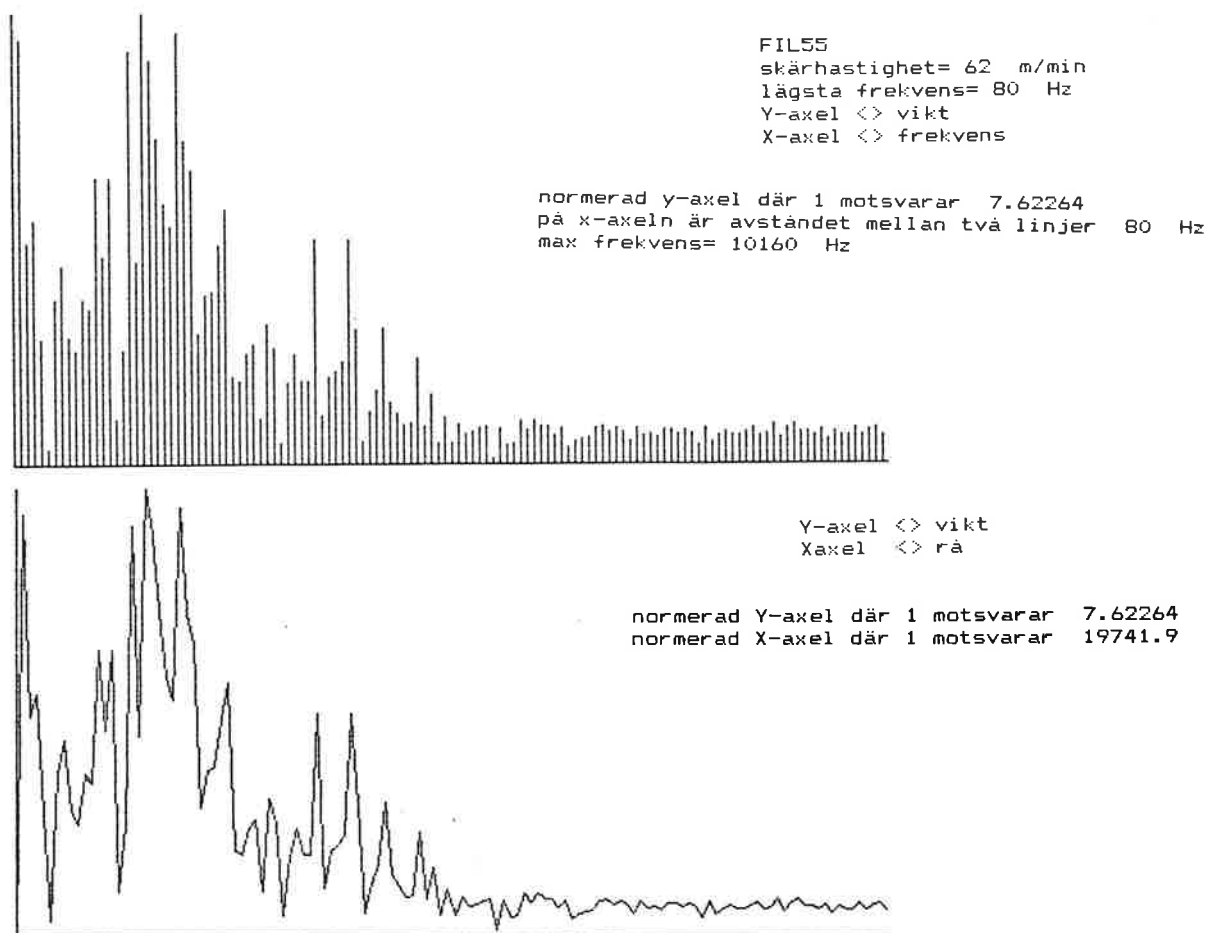


#### 4 STÖRTAL OCH STÖRFÖRDELNINGAR FÖR ARBETSMATERIAL MED DISKONTINUERLIG SPANBILDNING

Som tidigare nämnts beskriver störfördelningen en skärhastighetsnormerad frekvens enligt ekvation 15:1.

$$e = \frac{60f}{v} \quad \text{---(15:1)}$$

Vikten på störfördelningen kommer att vara den samma som för frekvensfördelningen, endast "x-axeln" skalas om genom division med den aktuella skärhastigheten. I figur 6 nedan visas ett frekvensspektra respektive störfördelning för ett bearbetningsfall. Vi har valt att beskriva frekvensspektrat diskret och störfördelningen kontinuerlig.



Figur 6 Frekvensspektra och motsvarande störfördelning för ett grått gjutjärn (SS-0125,SKF).

Genom division med skärhastigheten kommer alla frekvenser som är linjärt växande med skärhastigheten att bli konstanta och alla frekvenser som är oberoende av skärhastigheten bli omvänt proportionellt avtagande med skärhastigheten.

Detta medför att samtliga egenfrekvenser kommer att ge avtagande störtlal med skärhastigheten och de frekvenser som är förknippade med själva spånbildningen kommer att i stort ge konstanta störtlal.

I figur 7 visas några störfördelningar för ett perlitiskt segjärn för olika skärhastigheter, och där i övrigt samma process betingelser råder. I det aktuella fallet är systemets dominanta egenfrekvenser 4050 Hz. Detta ger oss ett egenstörtlal  $e_e$  enligt ekvation 15 till:

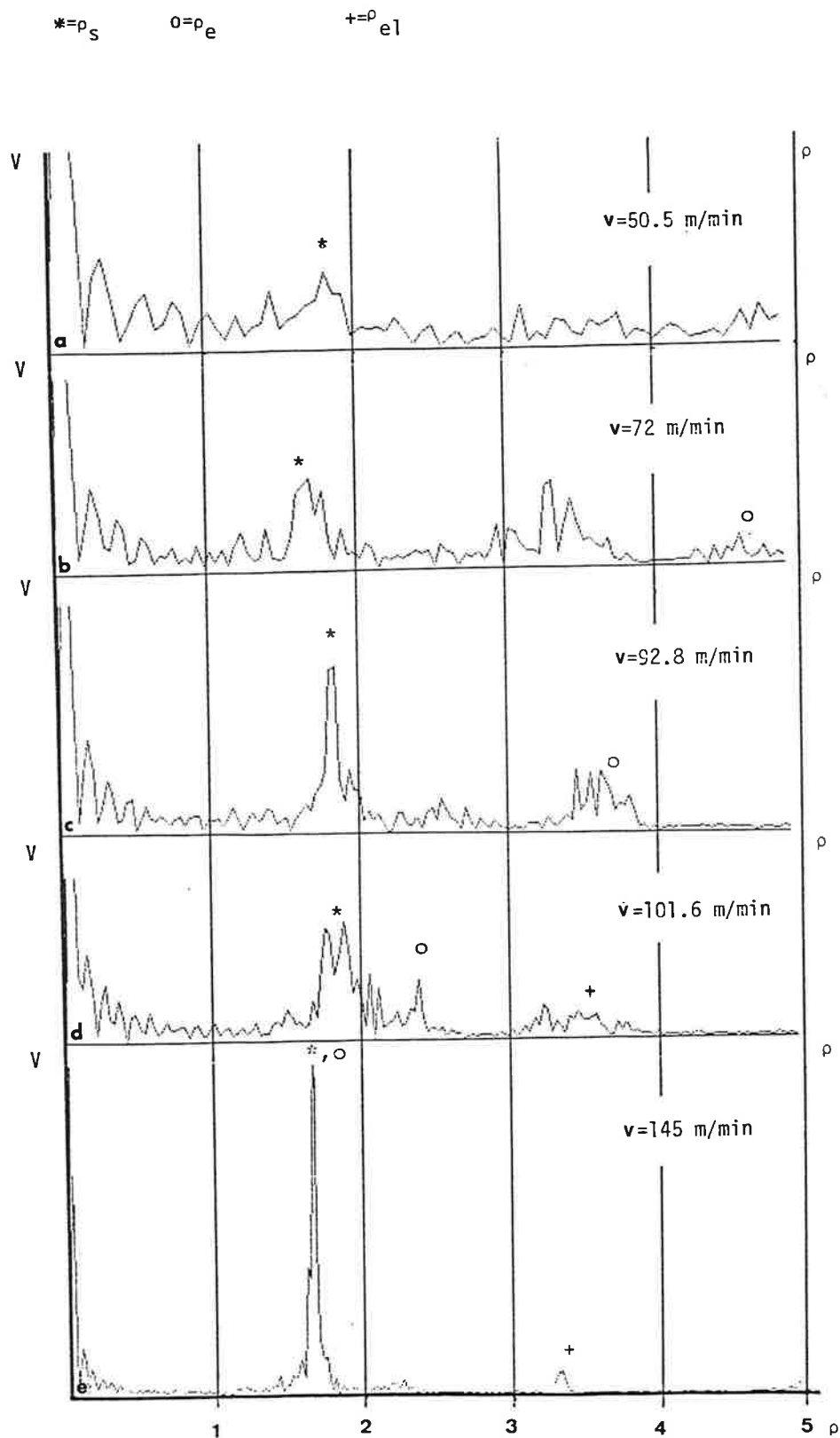
$$e_e = \frac{4050 \cdot 60}{v \cdot 1000} = \frac{243}{v}$$

För fallen a till e i figur 7 kan vi avläsa störtlalen vilka är redovisade i tabellen nedan. I figur 7 är segmentbildningens störtlal markerat med \* och den dominanta egenfrekvensens störtlal markerat med 0, i figuren finns även en annan störning  $e_{e1}$  markerad vilken kommer att behandlas i kapitel 5.

	v	$e_s$	$e_e$	$e_e - e_s$
a	50.5	1.8	4.8	3.0
b	72	1.8	3.4	1.6
c	93.8	1.8	2.6	0.8
d	101.6	1.8	2.4	0.6
e	145	1.75	1.68	-0.17

För ökad skärhastighet v minskas differensen  $\epsilon = e_e - e_s$ . Vid underkritisk bearbetning har de påtvingade svängningarna en lägre frekvens än egenfrekvensen.

I figur 8 visas differensen  $e_e - e_s$  som funktion av skärhastigheten för det fall som redovisades i figur 7.



**Figur 7** Störfördelningen från perlitiskt segjärn för några olika skärhastigheter.

Vi kan direkt avläsa eller beräkna segmentbildningens störtal (medelvärde). Beräkningen kan göras enligt följande i det aktuella fallet.

$$e_e(v_{\text{krit}}) - e_s = 0 \quad \text{-----} (16)$$

insättning ger :

$$e_s = \frac{f_e \cdot 60}{v_{\text{krit}}} = \frac{4050 \cdot 60}{135 \cdot 1000} = 1.8 \quad (1/\text{mm})$$

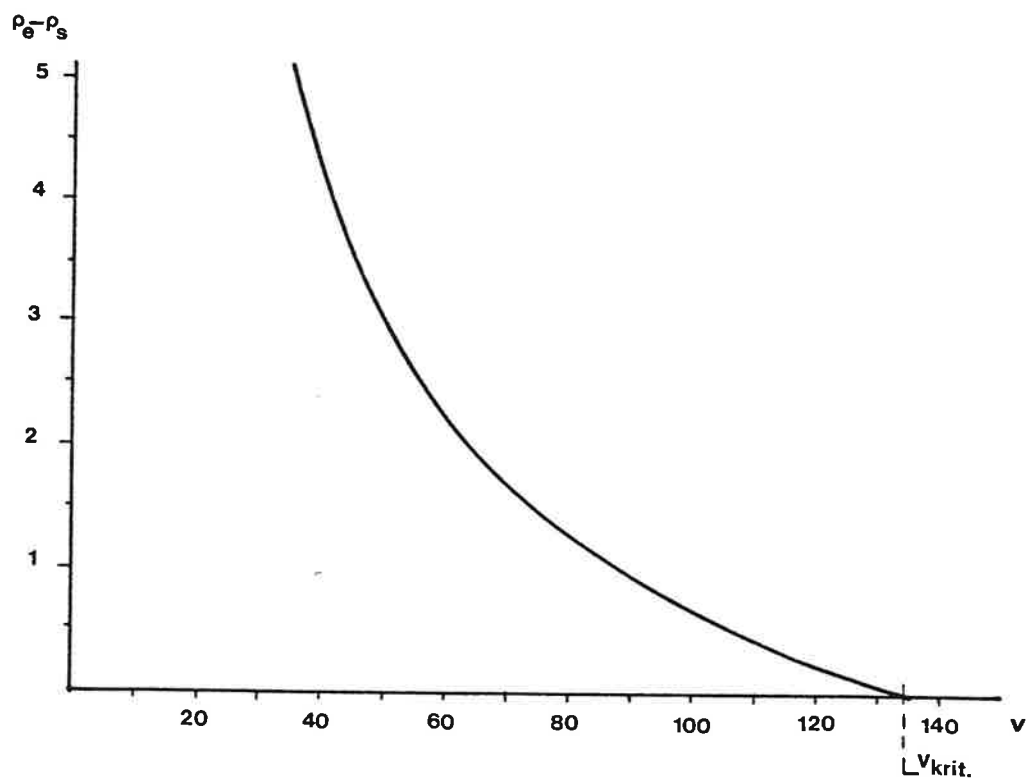
där :

$f_e$  = tidigare uppmätt egenfrekvens

$v_{\text{krit}}$  = avläst skärhastighet för  $e_e - e_s = 0$

i figur 8.

I figur 9 visas hela störspektrat för olika skärhastigheter med tillhörande

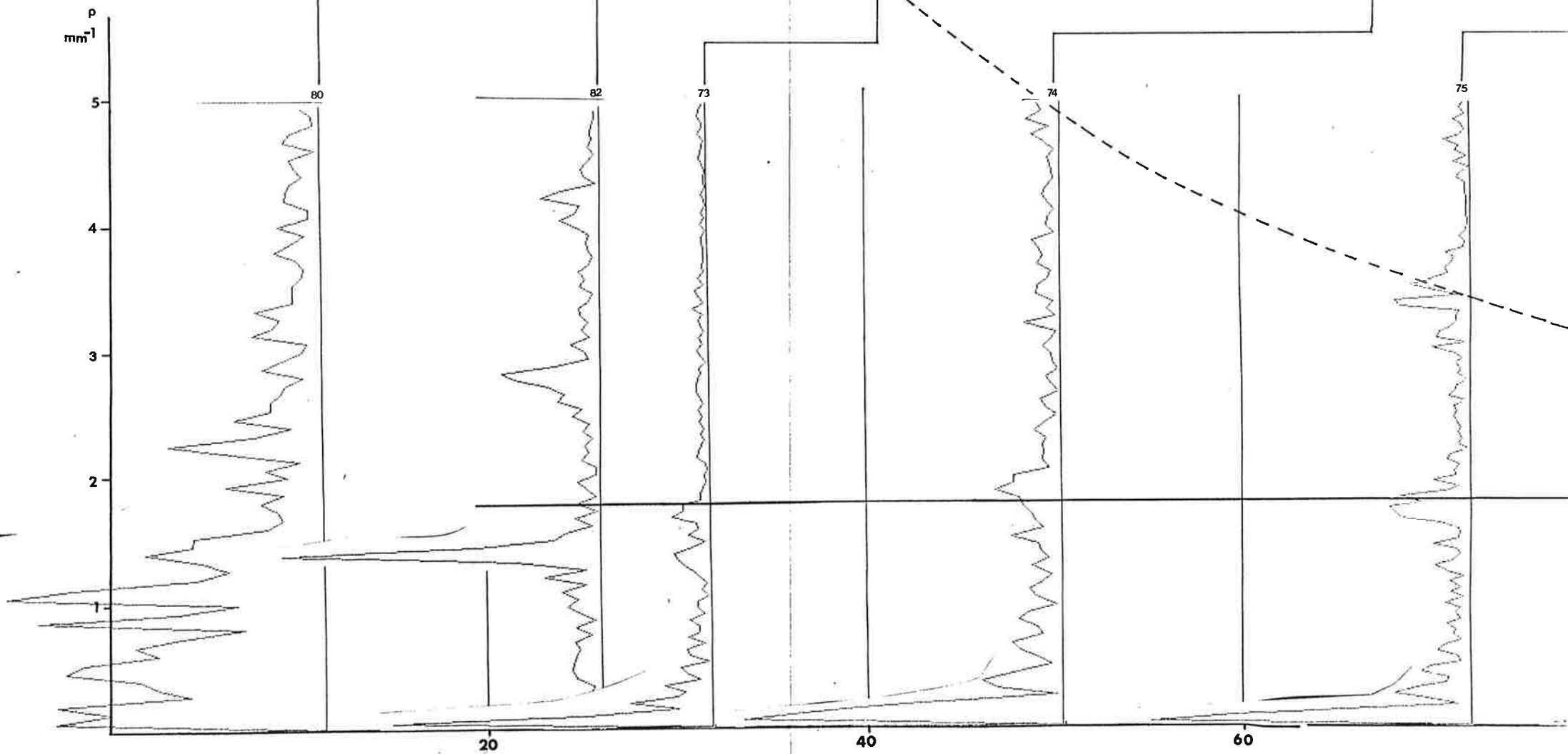
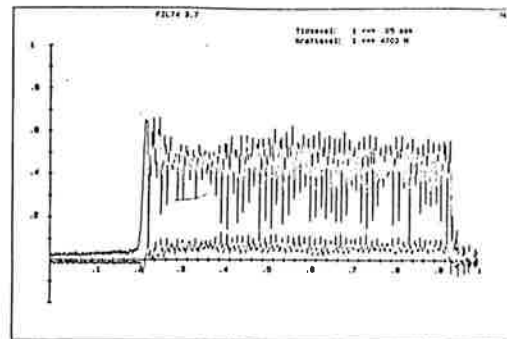
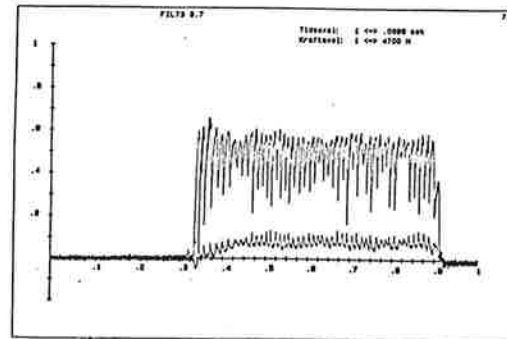
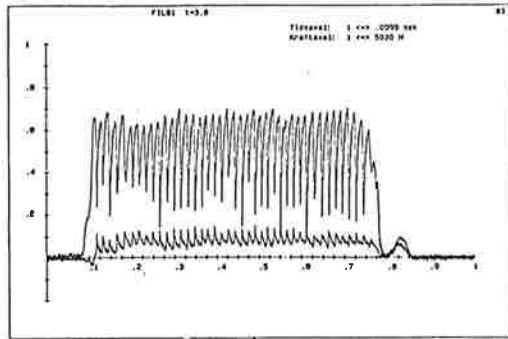
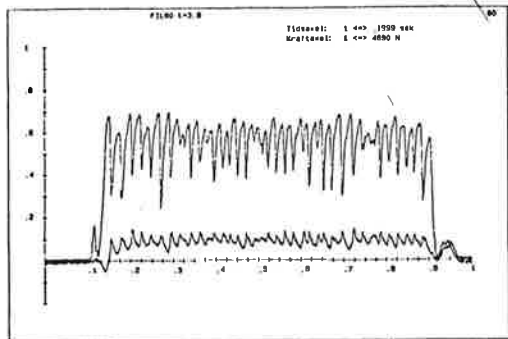


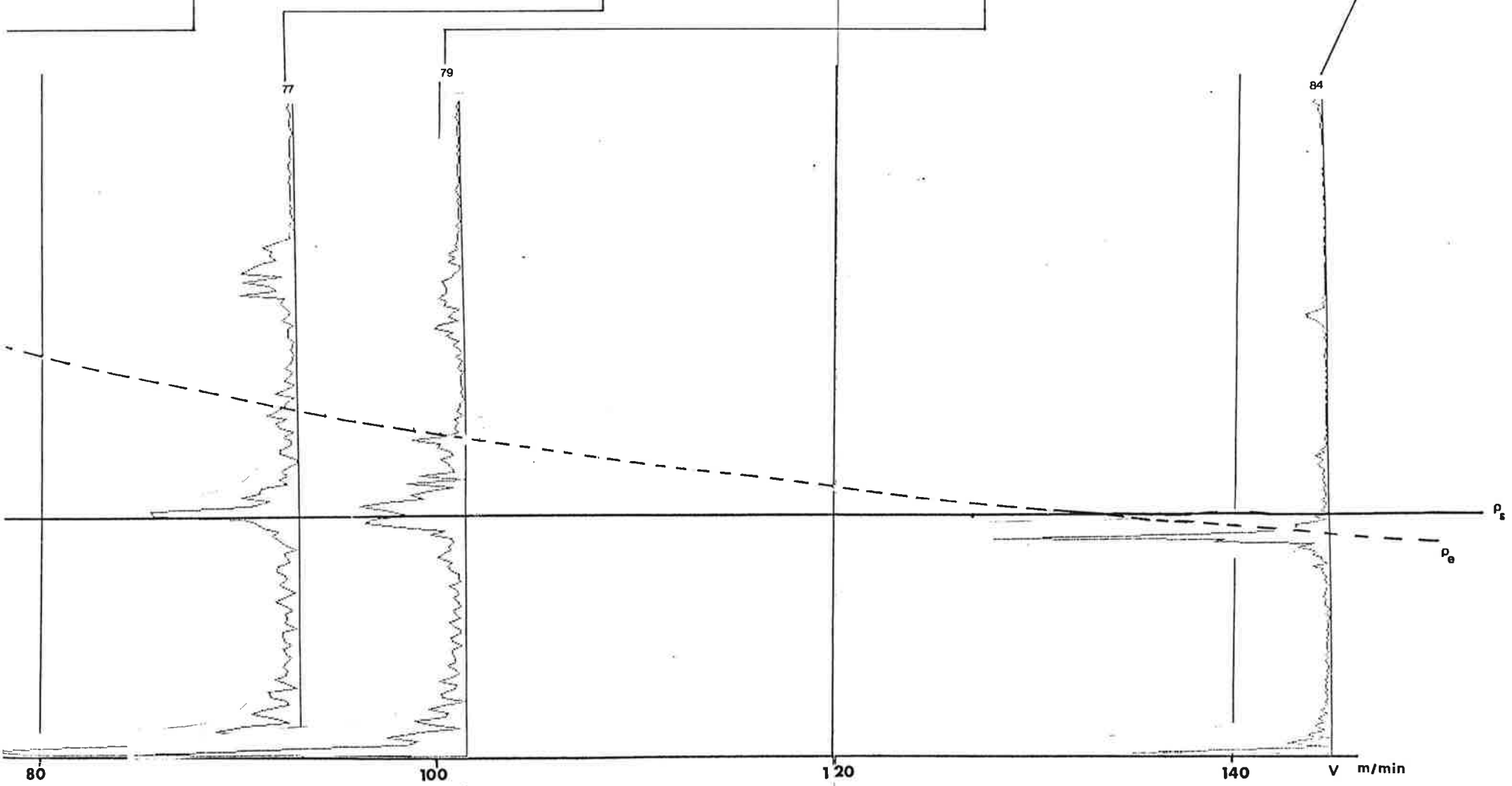
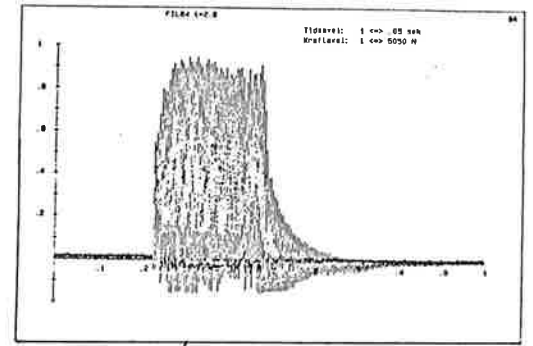
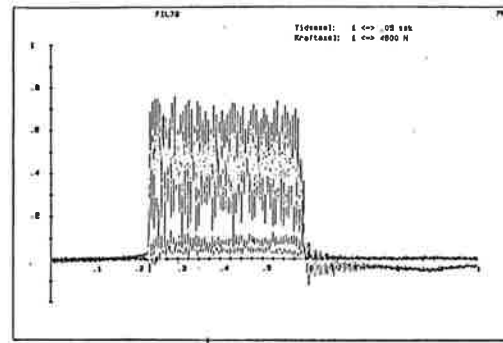
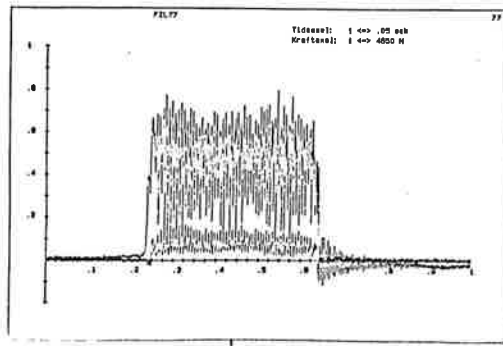
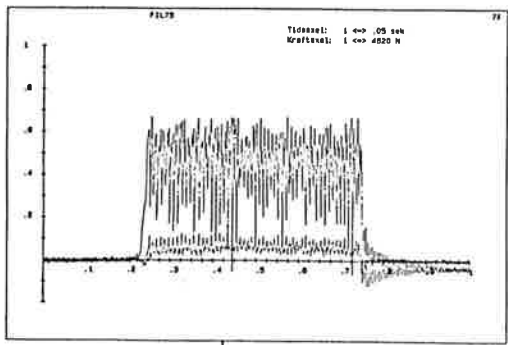
Figur 8      Differensen  $e_e - e_s$  ritad som funktion av skärhastigheten för det perlitiska segjärnet.

**krafttidskurvor. Diagrammet är upptaget under följande förutsättningar:**

- perlitiskt segjärn
- bearbetning i kipphyvel, Tule T26 med egenfrekvens fördelning enligt figur 5
- matning 0.5 mm/slag, ställvinkel 85° vilket medför en teoretisk spåntjocklek på  $\approx 0.5$  mm
- skärdjup, 2.6 - 3.8 mm
- utan skärmedia
- verktyg (egg), svarvskraft med SPUN 12 03 18 - P25 vändskär.

Figur 9a Störspektra upptaget på perlitiskt segjärn för matningen 0.5 mm/slag, övriga förutsättningar angivna på sidan 14.







#### 4.1 Störtalets geometriska tolkning

Från ekvationerna 3 och 8 enligt nedan kan som tidigare nämnts störtalet relateras till en ingreppslängd  $e_1$  enligt följande:

$$e_1 = \frac{h_2 e_2}{h_1} = \frac{A_{seg}}{h_1} \quad \text{----- (3:1)}$$

$$f_s = \frac{v_s}{e_1} = e_s \cdot v_s \quad \text{----- (8:1)}$$

Med hjälp av definitionen kommer störtalet  $e_s$  att vara den inverterade sträckan  $e_1$ , se figur 2. Den geometriska tolkningen av  $e_s$  kommer då att vara antalet bildade spånsegment per ingrepps mm. Ur belastningssynpunkt kan  $e_s$  tolkas som antalet belastningsväxlingar per ingreppssträcka.

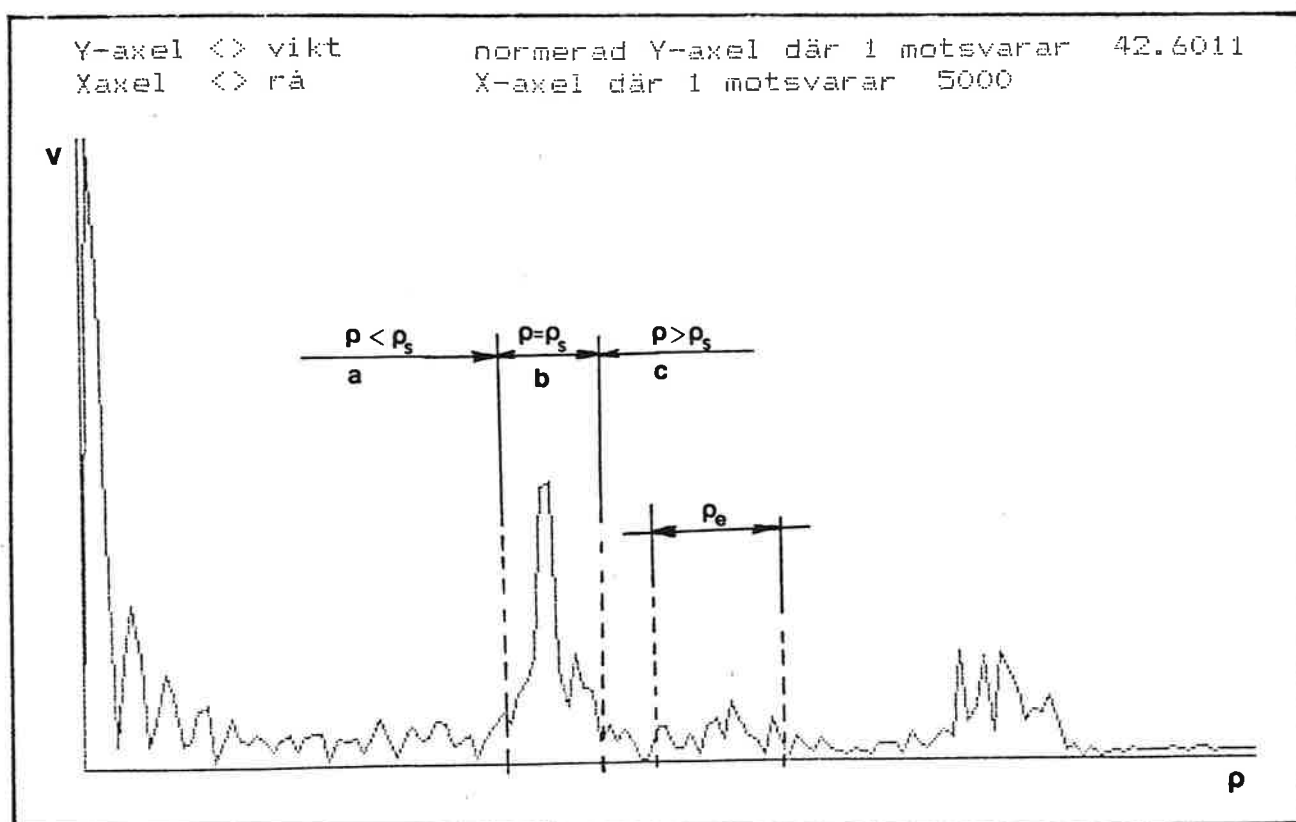
Vi kan nu vidga denna tolkning och låta den gälla för samtliga störtal (hela strfördelningen).

Störningarna kan nu delas upp i tre huvudtyper:

- a -  $e < e_s$  ,  $\frac{1}{e} > e_1$  , underkritiska  
 b -  $e = e_s$  ,  $\frac{1}{e} = e_1$  , kritiska  
 c -  $e > e_s$  ,  $\frac{1}{e} < e_1$  , överkritiska

Dessa tre typfall finns markerade i den störfördelning som finns redovisad i figur 11. I figur 12 finns en kraft- tidskurva tillhörande störfördelningen i figur 11. Vi kan här identifiera de olika störningarna i krafttidsplanet.

De tre typstörningarna a,b och c kan främst anses härstamma från deformationsskeden under spånbildningen. Typ a uppkommer under en tid eller sträcka som motsvarar mer än ett bildat segment. Vågmönstret i figur 12 ( $e > e_1$ ) upptar en tid motsvarande bildningen av 4-5 spånsegment. Typfall b motsvarar bildningen av ett segment och typfall c är störningar som uppstår under en tid som är mindre än tiden för bildningen av ett segment.



Figur 11 Störfördelning med olika karakteristiska störningar beräknad från tangentialkraftkurvan i figur 12.

#### 4.2 Mätning på spåna för att bestämma segmentbildningens störtal

Enligt tidigare gäller att segmentbildningens störtal fås som :

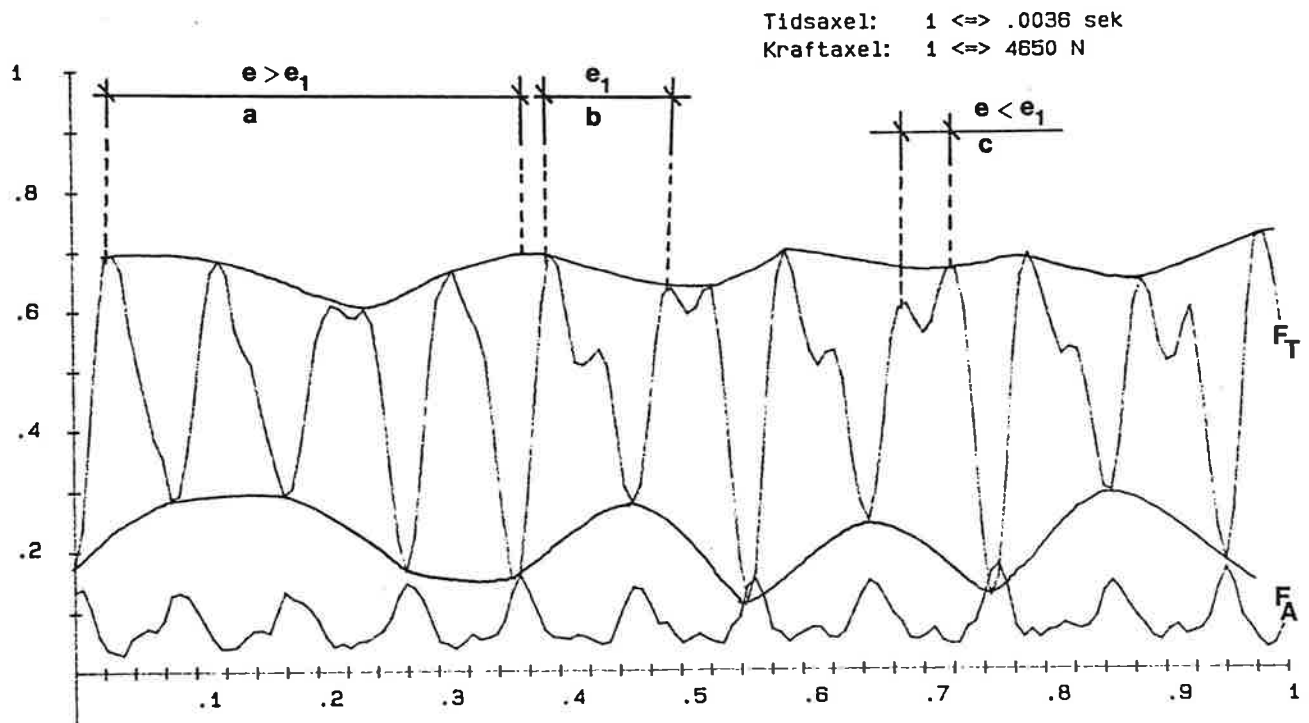
$$e_{s1} = \frac{1}{e_1} = \frac{h_1}{A_{seg}} \quad \text{—————(17)}$$

där  $A_{seg}$  kan beräknas på följande alternativa sätt:

$$A_{seg} = e_1 \cdot h_1 = e_2 \cdot h_2 = e_2 \cdot h_1 \cdot \lambda \quad \text{—————(18)}$$

Segmentets sekundära deformation har i våra försök ökat med skärhastigheten vilket har medfört att spånorna "lutar" och blir mer utdragna i den sekundära deformationszonen. Vi har av denna anledningen låtit beräkna segmentbildningens störtal baserat på flera karakteristiska mått enligt figur 13b.

För att skilja de olika störtalen åt har vi satt på dem indexen 1,2 och 3. Följande alternativa samband föreslås för att beräkna segmentbildningens



Figur 12 Krafttidskurva, underlag för störfördelningen i figur 11.

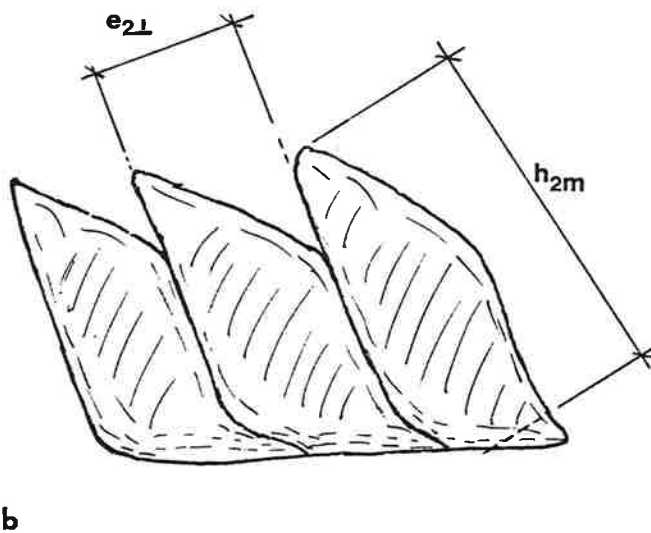
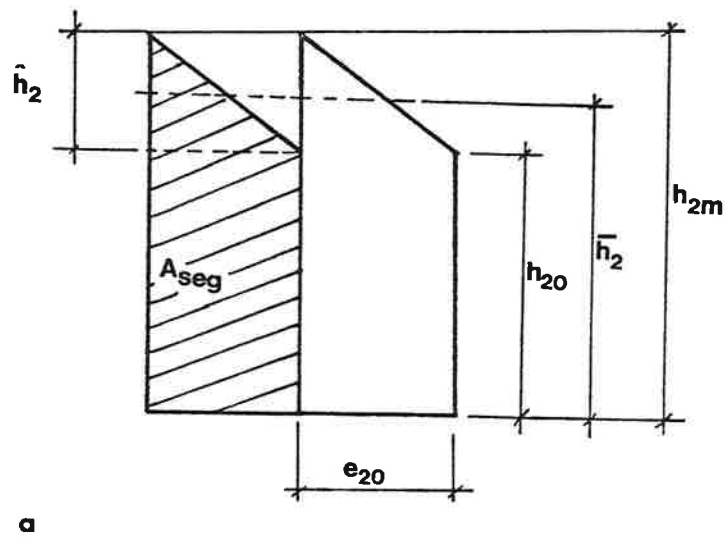
störtalet för utom ekvation 17.

$$e_{s2} = 1/e_{20}^{\lambda} \quad \text{_____ (19)}$$

$$e_{s3} = 1/e_{21}^{\lambda} \quad \text{_____ (20)}$$

För de försök som ligger till grund för diagrammet i figur 9 finns ingjutna och provberedda spånor för mikroskopstudier. Genom att fastställa de geometriska måtten i ekvationerna 17 till 20 kan segmentbildningens störtalet bestämmas på ett annat sätt än tidigare.

I kommande tabeller finns resultaten från de geometriska mätningarna samt resultaten från fourieranalsen av processens krafttidskurva (tangentialkraftkurva). Förutsättningarna för försöken finns angivna i anslutning till figur 9.



Figur 13 Geometriska mått på spånsegment, vilka ligger till grund för beräkning av segmentbildningens störtal.

SPANGEOMETRI -  $v = 11.4$  m/min - FIL 80

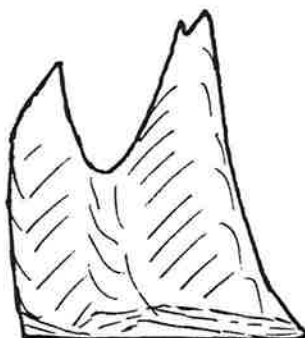
NR.	$A_{seg}$	$e_{20}$	$h_{20}$	$\hat{h}_2$	$h_{2m}$	$e_2$	$e_{s1}$	$e_{s2}$	$e_{s3}$
1	0.36	6	5	5	10	6	1.38	0.83	0.83
2	0.19	4	5	3	8	3.5	2.63	1.56	1.79
3	0.21	5	6	2	8	3.4	2.38	1.25	1.84
4	0.21	5	6	2	8	3.4	2.38	1.25	1.84
5	0.31	6	5	3.7	8.7	5.2	1.64	0.96	1.10
6	0.26	6	5	3	8	5	1.89	1.10	1.25
7	0.25	4.5	4.7	3.6	8.3	4.2	2.02	1.34	1.43
8	0.31	6.5	4.5	5	9.5	5.2	1.64	0.81	1.17
9	0.25	6	5	3	8	3.8	2.02	1.04	1.64
10	0.31	5	5	4	9	5.7	1.64	1.11	0.97
11	0.31	6	6	2.3	8.3	5	1.64	1.00	1.20
12	0.27	6	5.5	2.5	8	5.2	1.83	1.04	1.20
13	0.19	4	4	3	7	3.5	2.63	2.04	1.79

Medelvärde: 1.99    1.18    1.39    1.25

Anm. Segmentparen 3.4 I och 9.10 II är homogent sammanhängande. Vilka var för sig kan ge ett störtal samt tillsammans ge ett annat, principiell figur enl. nedan.

SPANGEOMETRI -  $v = 50.5$  m/min - FIL 74

Nr.	$A_{seg}$	$e_{20}$	$h_0$	$\hat{h}_2$	$h_{2m}$	$e_{s1}^m$	$e_{s2}$	$e_{sf}$
1	0.19	4	5	3	8	2.6	1.6	
2	0.18	4	4	3	7	2.8	1.8	
3	0.26	5	5	4	9	1.9	1.1	
4	0.21	4.5	3.5	3.5	7	2.4	2.0	
5	0.17	4	3	3.5	6.5	2.9	1.9	
6	0.18	4	3.5	3.5	7	2.8	1.8	
7	0.21	5.5	3	4	7	2.4	1.3	
8	0.17	4	3	4	7	2.9	1.8	



Figur 14 Schematisk bild av ett s.k. tvillingsegment.

9	0.12	4	3	2.5	5.5	4.2	2.3
10	0.15	3	2.5	4.5	7	3.3	2.4
11	0.21	5	3	5	8	3.4	1.3
12	0.20	5	4	4	8	2.5	1.3
13	0.17	4	4	4	8	2.9	1.6
14	0.14	3.5	3	3	6	3.6	2.4

**Medelvärde:** 2.83 1.76 1.85

SPANGOMETRI - v = 72 m/min - FIL 75

Nr	A <sub>seg</sub>	e <sub>20</sub>	h <sub>20</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>2m</sub>	e <sub>s1</sub>	e <sub>s2</sub>	e <sub>sf</sub>
1	0.18	3.2	5	3.5	8.5	2.8	1.8	
2	0.26	3.0	5	4	9	1.9	1.85	
3	0.23	3.0	6	2.5	8.5	2.2	1.96	
4	0.21	3.0	6	2.5	8.5	2.4	1.96	
5	0.25	4.0	4.5	3.5	8	2.0	1.56	
6	0.28	3.5	5.0	4.0	9	1.8	1.59	
7	0.25	3.5	4.5	4.0	8.5	2.0	1.68	
8	0.24	4.5	5	4.2	9.2	2.1	1.21	
9	0.25	4.0	5	3.5	8.5	2.0	1.47	

**Medelvärde:** 2.13 1.68 1.69

Anm. Dubbla antalet studerade segment ger samma medelvärde på A<sub>seg</sub> och e<sub>s1</sub>

SPANGOMETRI - v = 94 m/min - FIL 76

Nr.	A <sub>seg</sub>	e <sub>20</sub>	h <sub>20</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>2m</sub>	e <sub>s1</sub>	e <sub>s2</sub>	e <sub>sf</sub>
1	0.19	4.5	4	3.5	7.5	2.6	1.5	
2	0.21	4	5	3.5	8.5	2.4	1.5	
3	0.22	4	5	3	8	2.3	1.6	
4	0.14	4	4	2	6	3.6	2.1	
5	0.19	3.5	4	3	7	2.6	2.0	
6	0.15	3.5	4	2.2	6.2	3.3	2.3	
7	0.26	4	5	3	8	1.9	1.6	
8	0.26	4.5	6	3	9.5	1.9	1.2	
9	0.16	3	4.5	2	6.5	3.1	2.6	
10	0.15	3.2	3	3	6	3.3	2.6	
11	0.21	4.2	4	3	7	2.4	1.7	
12	0.27	4.5	4	3.5	7.5	1.9	1.5	

**Medelvärde:** 2.61 1.86 1.83

SPANGOMETRI - v = 92.8 m/min - fil 77

Nr.	A <sub>seg</sub>	e <sub>20</sub>	h <sub>20</sub>	h <sub>2</sub>	h <sub>2m</sub>	e <sub>s1</sub>	e <sub>s2</sub>	e <sub>sf</sub>
1	0.14	4.2	4	2.5	6.5	3.6	1.8	
2	0.21	4	5	3	8	2.4	1.6	

3	0.24	6	4	3.5	7.5	2.1	1.1
4	0.17	5	3	3.5	7.5	2.9	1.3
5	0.21	5	4	3	7	2.4	1.4

Medelvärde: 2.67 1.51 1.80

Anm. Vi har ej haft tillgång till fler segment.

SPANGEOMETRI -  $v = 101.6$  m/min - FIL 78

Nr.	$A_{seg}$	$e_{20}$	$h_{20}$	$h_{2m}$	$e_{s1}$	$e_{s2}$	$e_{sf}$
1	0.22	5.5	4.5	3.2	7.7	2.24	1.18
2	0.21	5	4	3	7	2.33	1.43
3	0.23	5	4	3.4	7.4	2.16	1.35
4	0.22	5	4	3.2	7.2	2.24	1.39
5	0.23	5.2	3.5	3.9	7.4	2.16	1.30
6	0.24	6	4	3	7	2.09	1.19
7	0.24	5	4	3.5	7.5	2.09	1.33
8	0.22	6	4	2.8	6.8	2.24	1.23
9	0.21	5.5	4	3	7	2.33	1.30
10	0.21	4.5	4	3	7	2.42	1.30
11	0.23	5.2	4	3	7	2.16	1.37
12	0.23	6	3	4.4	7.4	2.16	1.13

Medelvärde: 2.22 1.30 1.79

Anm. Spånorna uppvisade en kraftig deformation mot verktyget (sekundärdeformation) vilket medför att  $e_{20}$  är svår att fastställa, värdet  $e_{20}$  kan mätas ca. 0.1 mm mindre om endast primärdeformation skall utvärderas. Detta medför att  $e_{s2}$  ökar med ca. 0.4 enh. d.v.s  $e_{s2} = 1.70 \text{ mm}^{-1}$ , se fortsatt text på sid 23.

I tabellen nedan finns en sammanställning av samband mellan spångeometri och segmentbildningens störtlal  $e_s$

Skär- hastighet	$e_{s1}$	$e_{s2}$	$e_{sf}$	FIL NR
11.4	1.99	1.18	1.1-1.4	80
32				73
50.5	2.83	1.76	1.85	74
72	2.13	1.68	1.69	75
94	2.61	1.86	1.83	76
92.8	2.67	1.51	1.80	77
101.6	2.22	1.30	1.79	78

Anm.-forts.

Vid högre skärhastigheter är den sekundära deformationen alltmer påtaglig. För fallen 92.8 respektive 101.6 m/min bör "spånorna mätas" på det sätt som figur 13b visar.

Genom segmentets lutning kommer  $e_2$  att vara mindre än  $e_{20}$  och då beräkningsmässigt ge ett annat störtal. Nya mätningar har gjorts på spånorna från filerna 77 och 78. Det framgick att störtalen baserade på den senare mätprincipen bättre stämde överens med störtal beräknade från skärkrafternas tidskurva. De nya mätningarna finns redovisade i tabellerna nedan.

Spångeometrimätning enligt figur 13b på spånor från fil 77

Nr	$e_2$	$h_{2m}$	$e_{s2}$	$e_{sf}$
1	3.4	7	2.1	—
2	4.0	8.5	1.47	—
3	4.2	8.0	1.49	—
4	4.0	7.2	1.74	—
5	3.9	7.3	1.76	—
Medelvärde			1.71	1.80



Spångeometrimätning enligt figur 13b på spånor från fil 78

Nr	e <sub>2</sub>	h <sub>2m</sub>	e <sub>a2</sub>	e <sub>af</sub>
1	3.2	7.0	2.23	—
2	3.2	6.5	2.40	—
3	3.2	7.5	2.08	—
4	4	7	1.79	—
5	4	7	1.79	—
6	4	7	1.79	—
7	4	7	1.79	—
8	4	7	1.79	—
9	4	7	1.79	—
Medelvärde			1.94	1.79

#### 4.3 Störtalets beroende av den nominella spåntjockleken

Flera forskare /3/,/4/ har visat att det approximativt råder ett rätlinjigt samband mellan spåntjockleken (segmenthöjden)  $h_2$  och segmentbredden  $e_2$ . I flera fall kan kurvan gå genom eller mycket nära origo, detta visas schematiskt i fig.15. Vi kan allmänt teckna sambandet mellan  $e_2$  och  $h_2$  enligt ekvation 20.

$$e_2 = c_1 + c_2 \cdot h_2 \quad \text{-----} (21)$$

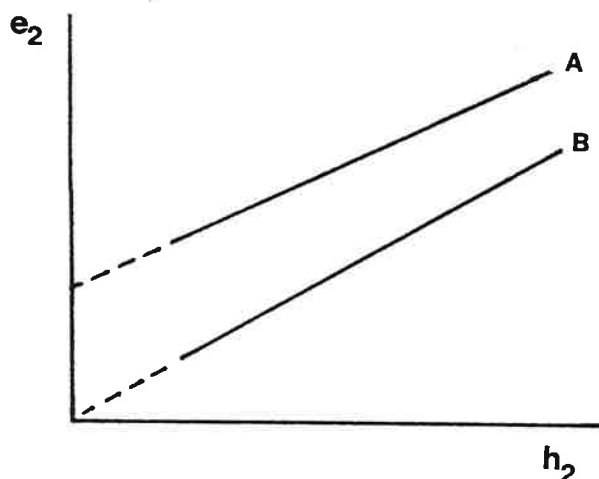
Konstanterna  $c_1$  och  $c_2$  får fastställas genom försök.

Enligt tidigare definition av störtalet  $e_s$  i kombination med ekvation 21 kan följande uttryck för störtalet erhållas:

$$e_s = \frac{1}{e_1} = \frac{1}{\lambda e_2} \quad \text{-----} (3, 4)$$

$$e_s = \frac{1}{\lambda (c_1 + c_2 h_2)} \quad \text{-----} (22)$$

Vi kan ersätta  $h_2$  i ekv. 22 med produkten mellan spånstukningen  $\lambda$  och den nominella spåntjockleken  $h_1$  enl. följande:



Figur 15 Schematiskt rätlinjigt samband mellan spånsegmentets bredd  $e_2$  och dess höjd  $h_2$ .

$$e_s = \frac{1}{\lambda (c_1 + c_2 \lambda h_1)} \quad \text{-----} (22:1)$$

Störtalet  $e_s$  kan alltså fastställas med hjälp av ekvation 22:1 om spånstukningen och de båda konstanterna  $c_1$  och  $c_2$  är kända.

Vi kommer här nedan att bestämma de erforderliga konstanterna för att kunna analytiskt beräkna segmentbildningens störtlal för en godtycklig matning och spånstukning för ett givet material. Konstanterna kommer att bli bestämmas med hjälp av regresionsanalys.

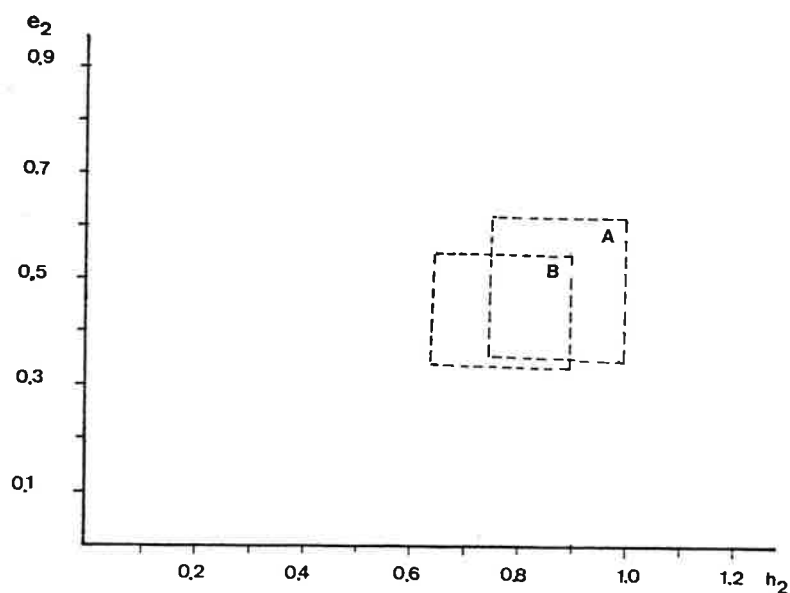
Från de tidigare tabellerna kan vi hämta de beräknade medelvärdena på  $e_2$  och  $h_2$ . Dessa mätvärden är upptagna vid en matning och kan tillsammans bilda en punkt i ett diagram typ det som visas i figur 15. I figur 16 visas en spridningsmatrix för de beräknade  $e_2$  och  $h_2$  för matningen 0.5 mm/slag. I tabellen nedan finns en skattning av  $e_s$  och konstanterna  $c_1$  och  $c_2$ . Då försöken är utförda vid en enda matning får konstanterna  $c_1$  och  $c_2$  betraktas som "momentana". Verkliga  $c_1$  och  $c_2$  kan endast bestämmas ur ett diagram som baseras på mer än en matning.

v	$c_1$	$c_2$	$\lambda$	$e_2$	$h_2$	$e_s$
11.4	-0.29	0.86	1.67	0.45	0.84	1.32
50.5	0.165	0.36	1.44	0.42	0.72	1.66
72	0.21	0.16	1.72	0.35	0.86	1.67
94	0.073	0.50	1.41	0.43	0.71	1.67
92.8	0.22	0.34	1.46	0.46	0.73	1.46
101.6	0.16	0.30	1.52	0.39	0.96	1.70
145	0.42	0.00	1.40	0.42	0.70	1.70

För att kunna fastställa konstanterna  $c_1$  och  $c_2$  har försök gjorts för olika skärhastigheter då matningen valdes till 1 mm per slag.

Följande tabeller baserar sig på geometriska mätningar på spånsegment erhållna vid matningen 1.0 mm per slag.

Spångeometri - v= 70 m/min - Fil 86



Figur 16 Spridningsmatrix för  $e_2$  och  $h_2$  vid en matning 0.5 mm, resultatet bygger på tidigare tabeller.  
 A = Fil80,  $v=11$  m/min  
 B = Fil74,  $v=51$  m/min

Nr.	$e_{2\perp}$	$h_{2m}$	$e_{s2}$	$e_{sf}$
1	5.6	11	1.62	
2	6.1	14	1.17	
3	7.0	14.3	1.00	
4	6.5	14.3	1.08	
5	7.5	14.3	1.03	
6	7.5	15	0.78	
7	7.5	15	0.78	
8	8.5	14.5	0.81	

Medelvärde:                      1.03    1.04

Spångeometri - v = 60.9 m/min- Fil 87

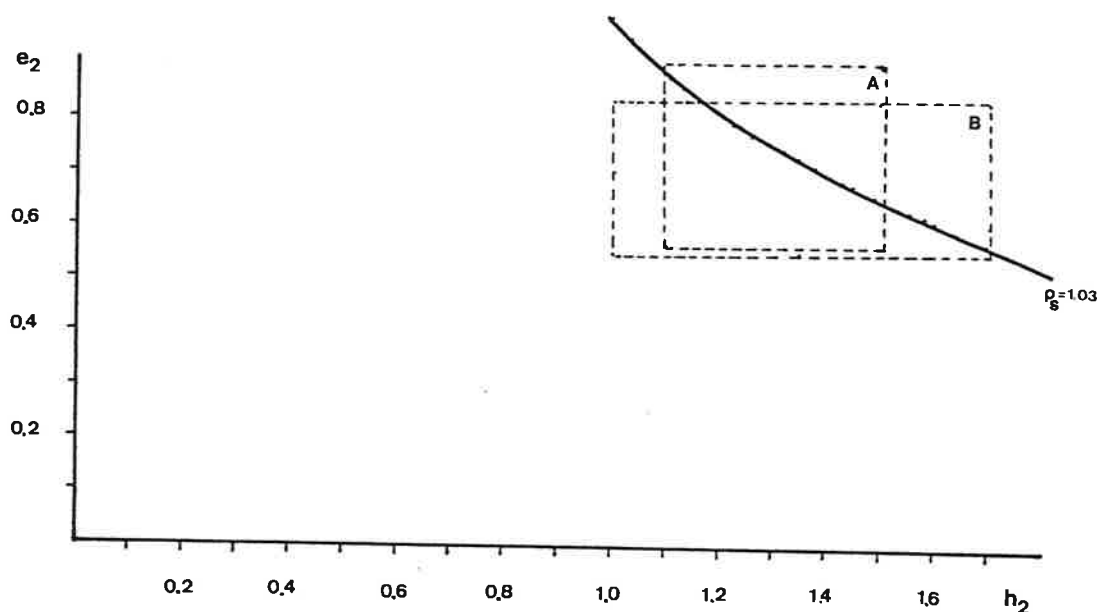
Nr.	$e_2$	$h_{2m}$	$e_{s2}$	$e_{sf}$
1	7.7	14.5	0.90	
2	6.0	17.5	0.95	
3	5	13.5	1.48	
4	7.5	16.0	0.83	
5	6.8	15	0.98	
6	7.1	17	0.83	
7	6.5	13.5	1.14	
8	7.5	13.5	0.99	
9	3.0	11	3.00	
10	7	10	1.43	

tvillingspån,  $e_s = 0.52$ 

klyvspån

Medevärde: 1.06 1.09

I figur 17 visas en spridningsmatris över  $e_2$  och  $h_2$  för de två filerna ovan.

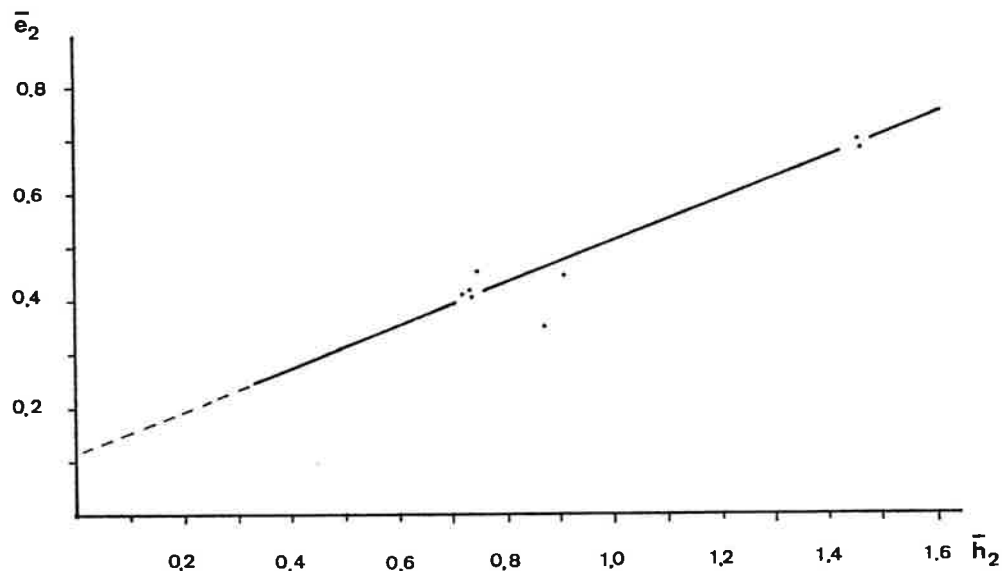


Figur 17 Spridningsmatris för  $e_2$  och  $h_2$  vid matningen 1.0 mm/slag. Kombinationerna mellan  $e_2$  och  $h_2$  utefter den streckade linjen i diagrammet ger ett störtal på 1.03.  
 A = Fil86, v=70 m/min  
 B = Fil87, v=61 m/min

Nu har vi två punkter i diagrammet som beskriver  $e_2$  som funktion av  $h_2$ . Ur tabellen sidan 25 för  $v=72$  m/min erhålles  $e_2$  och  $h_2$  för matningen 0.5 mm/slag och i tabellen ovan erhålles motsvarande värden för matningen 1.0 mm/slag. Dessa punkter finns inritade i figur 18. Vi kan nu teckna ett uttryck som bestämmer störtalet  $e_s$  för olika nominella spåntjocklekar för det aktuella arbetsmaterialet.

$$e_s = \frac{1}{\lambda(0.13 + 0.38 \cdot \lambda \cdot h_1)} \quad \text{--- (22:2)}$$

Då  $e_s$  är känd för olika nominella spåntjocklekar kan diagrammet i figur 9 utökas att gälla för flera matningar detta finns redovisat i figur 19. Kurvornas avböjning vid lägre skärhastighet är endast schematiskt ritade och orsakas av löseggbildning. Gränsen för avböjningen är vald så att produkten mellan matning och skärhastighet är lika med 10. (matning i mm och skärhastighet i m/min). Denna produkt baserar sig på eggtemperaturen enligt ekvation 23.



Figur 18 Upptaget funktionssamband mellan  $e_2$  och  $h_2$  för ett perlitiskt segjärn.

$$\theta = cC_r \sqrt{vs/kc_p e} \quad \text{-----} (23)$$

där:  $c$  = konstant

$C_r$  = skärmotstånd

$v$  = skärhastighet

$s$  = matning

$k$  = värmeledningsförmåga

$c_p$  = specifik värme

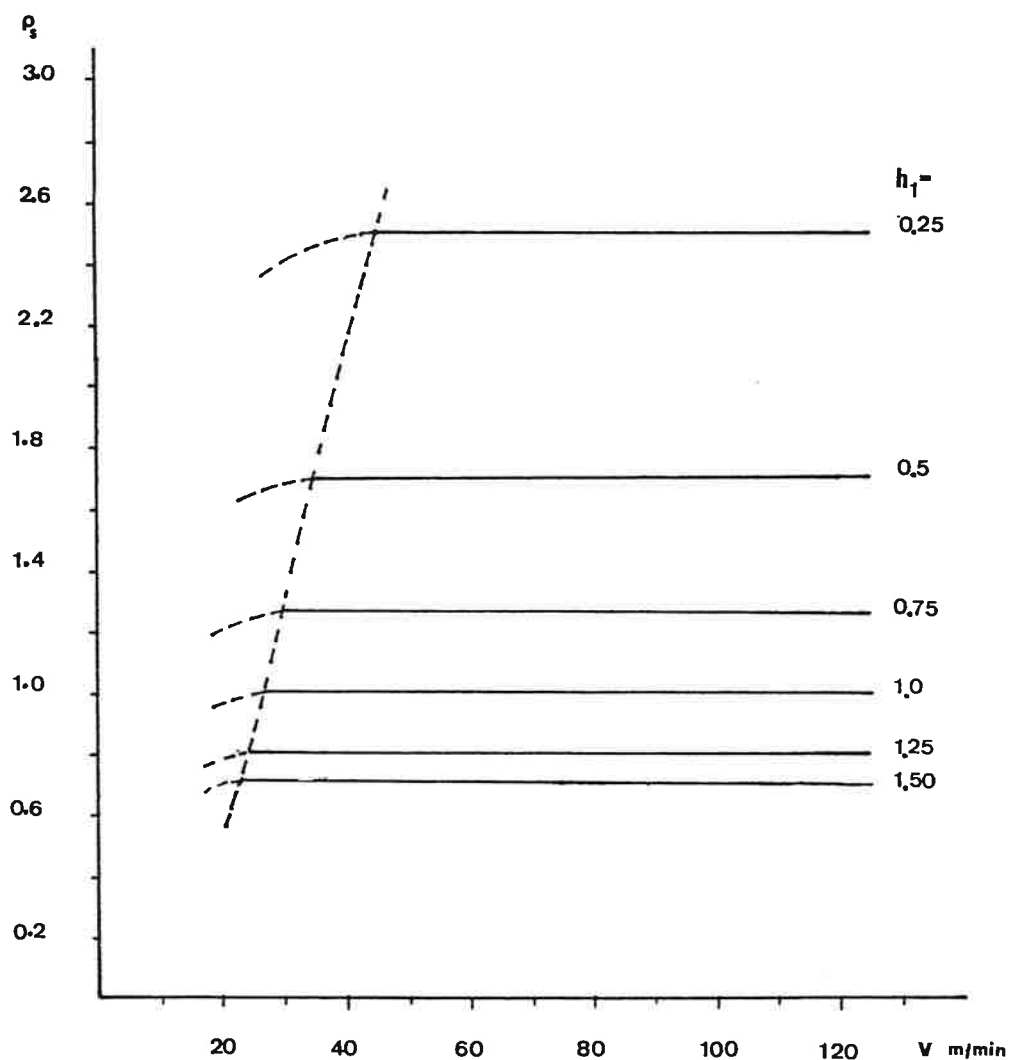
$e$  = densitet

$h_1$  = nominell spåntjocklek, ( $h_1 = ss \sin \alpha$ )

$s$  = matning

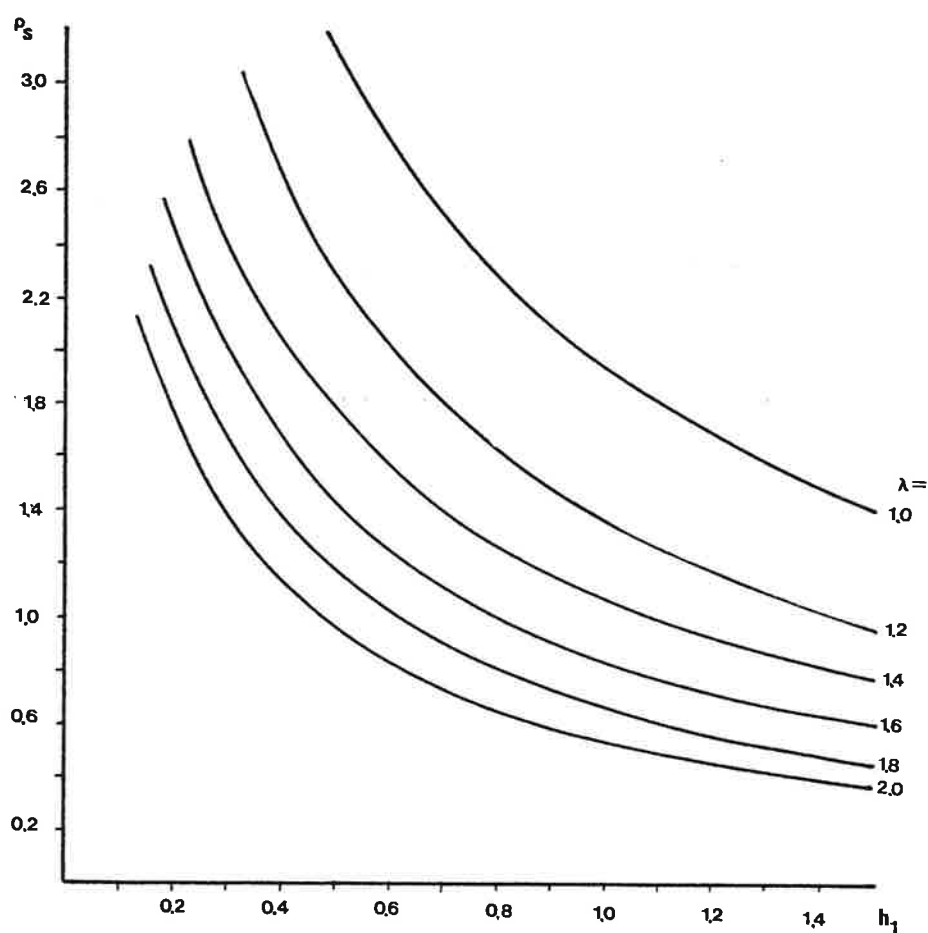
$\alpha$  = ställvinkel

I det området där störtalet är oberoende av skärhastigheten kan störtalet ritas mot den nominella spåntjockleken med spånstukningen som parameter. För det tidigare undersökta perlitiska segjärnet visas detta samband i figur 20.



Figur 19 Segmentbildningens störtal som funktion av skärhastigheten där den nominella spåntjockleken är parameter. Diagrammet är upptaget för perlitiskt segjärn där spånstukningens medelvärde skattades till 1.45, övriga förutsättningar enligt tidigare (fig.9).





Figur 20 Segmentbildningsstörtal som funktion av den nominella spåntjockleken  $h_1$  där spånstukningen  $\lambda$  är parameter för ett perlitiskt segjärn. Resultatet bygger på diagram presenterat i figur 18.

## 5. SPECIELLA IAKTTAGELSER I ANSLUTNING TILL PRAKTISKA FÖRSÖK

Alteftersom arbetet har fortskridit har en del intressanta iakttagelser gjorts vilka inte direkt kan anknytas till den målsättning som ställdes upp i inledningskapitlet. Vi har här för avsikt att kortfattat redogöra för några av dessa iakttagelser.

### 5.1 Deformation vid diskontinuerlig spänbildning

Under skärförloppets ingreppsfas (fas I) börjar en elastisk spänning att byggas upp. När denna spänning har nått ett kritiskt värde kommer arbetsmaterialet att plasticeras och "spänformningen" börjar. Då spånan i stora drag har tagit form sker deformationen av mer lokal karaktär i den sekundära deformationzonen och i snitt angränsande till grannsegmenten.

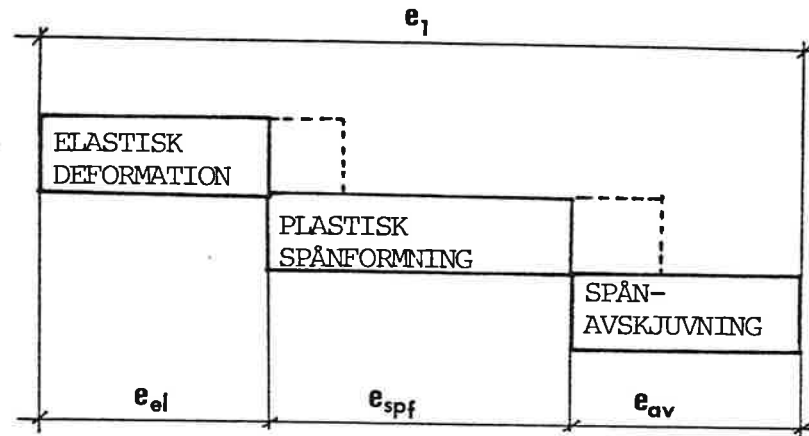
Det ovan beskrivna förloppet kommer att upprepas vid bildningen av varje segment. Som tidigare har framgått kommer denna cykel att motsvara en sträcka lika med  $e_1$  eller i tid uttryckt  $e_1/v$ . I figur 21 nedan visas principiellt hela segmentbildningscykeln. De olika fysiska stegen kommer mer eller mindre att överlappa varandra beroende av deformationens homogenitet. Om inte hänsyn tages till någon överlappning kan vi teckna  $e_1$  som summan av de tre stegen enligt följande:

$$e_1 = 1/e_s = e_{el} + e_{spf} + e_{av} \quad \text{--- (24)}$$

Den procentuella fördelningen mellan stegen har visat sig vara starkt beroende av skärdata och processens dynamik.

Den elastiska delen kan identifieras i störfördelningen då dess frekvenser är i vissa fall betydligt högre än motsvarande frekvenser tillhörande de plastiska stegen. Frekvenserna i den elastiska delen är nära nog linjärt växande med skärhastigheten vilket ger oss ett konstant störtal ( $e_{el}$ ).

Detta störtal finns inritat i den tidigare figuren 7 och markerat med tecknet +. Denna iakttagelse kan hänföras till arbetsmaterialets deformations-



Figur 21 Principiell framställning av de tre huvudsakliga grundstegen vid diskontinuerlig spånbildning.

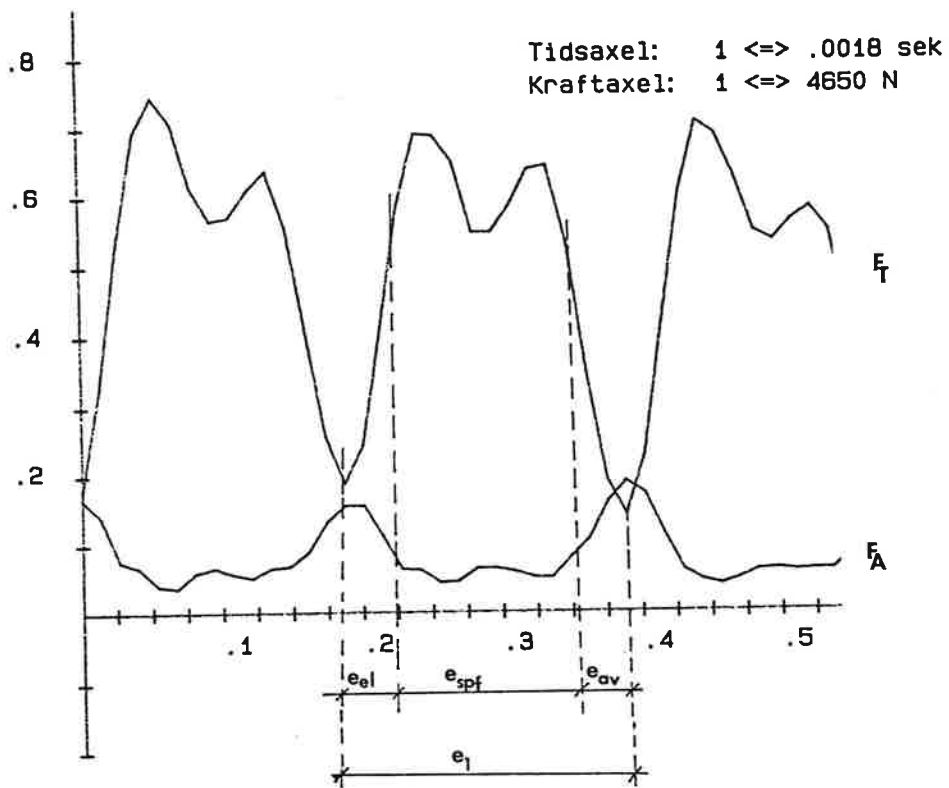
egenskaper och dess deformationshastighetsberoende. Sträckan  $1/e_{el}$  kan även bestämmas ur skärförloppets krafttidskurva, detta visas principiellt i figur 22 nedan.

För en känd skärhastighet kan den linjära delen skattas genom att fastställa dess utsträckning i tiden.

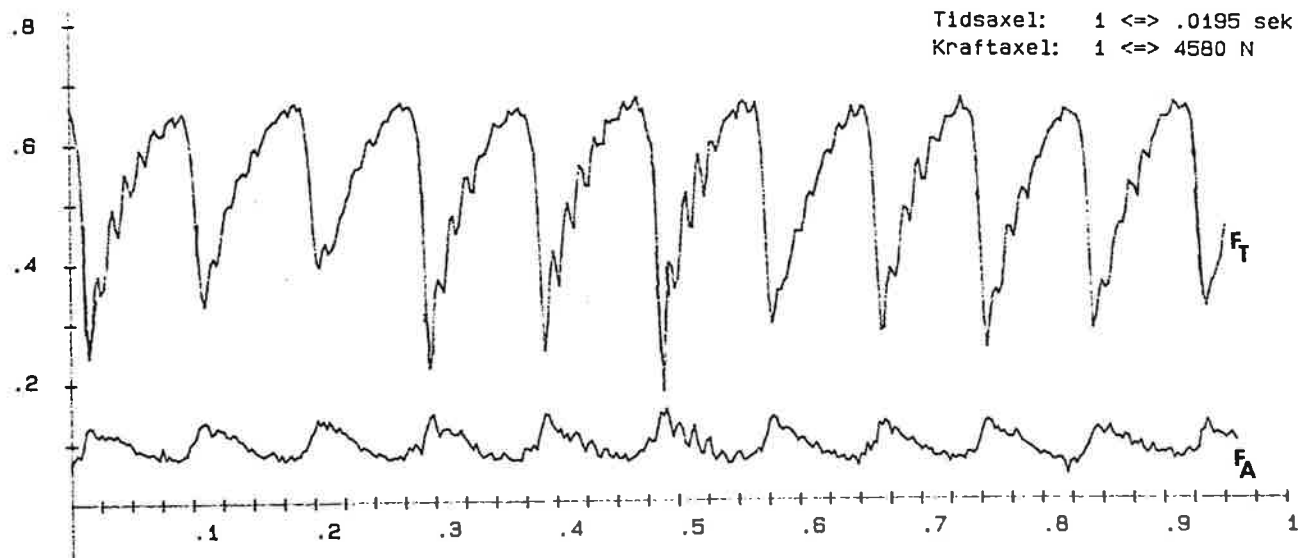
Segmentbildningens avskjuvningsdel är det steg som kommer att påverkas mest av bl.a. verktygsskaftets dynamiska egenskaper. Spånavskjuvningen kommer inte att kunna ske fortare än vad skaftets egenfrekvenser tillåter i kombination med aktuell skärhastighet. Kraftavlastningen kan ej ske snabbare än med den relativa hastighet som råder mellan spåna/arbetsstycke och verktyg. I figur 23 visas ett kraftförlopp som i avskjuvningssteget domineras av skaftets egenfrekvens. Vi kan se att lutningen på avskjuvningen är påfallande lika för i samtliga segment.

I figur 24 visas ett skärförlopp där egenfrekvensen medverkar i samtliga deformationssteg mer eller mindre. Denna situation uppträder i princip då  $e_s = e_e$  vilket tidigare är behandlat i rapporten.

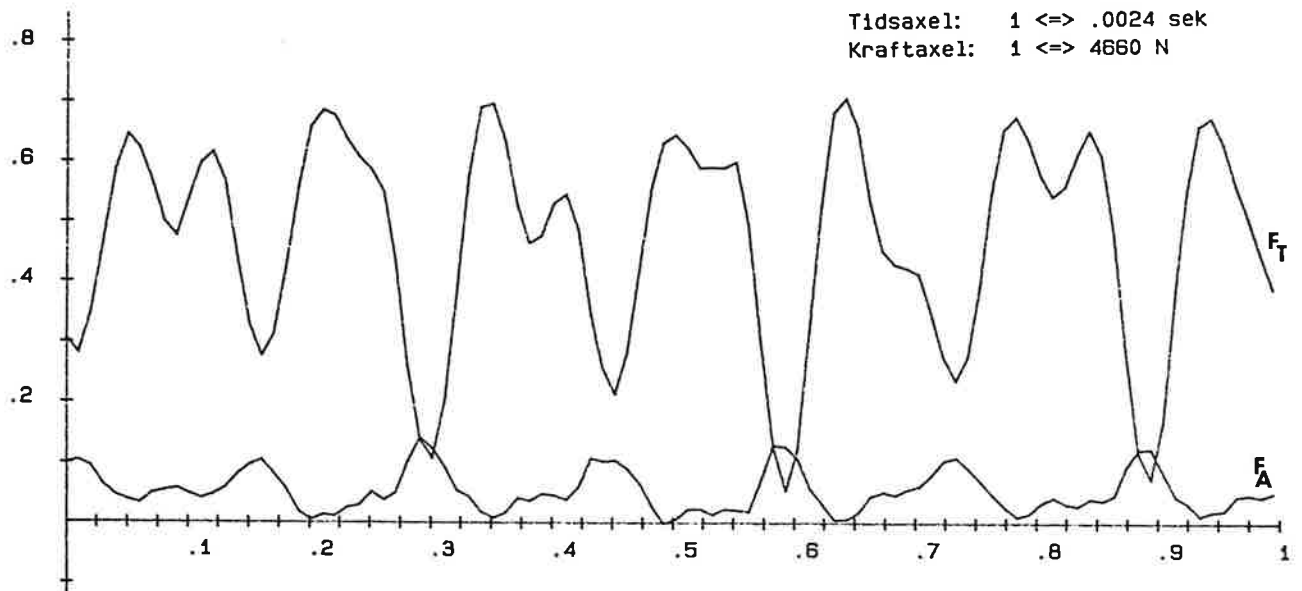
Vi bör notera att de mätta skärkrafterna inte i detta fall helt representerar de verkliga skärkrafterna på grund av de dynamiska omständigheterna.



**Figur 22** Skärkrafterna  $F_T$  och  $F_A$  under bildningen av ett spånsegment där de olika deformationsstegen är markerade.



**Figur 23** Skärkrafterna  $F_T$  och  $F_A$  med egenfrekvensdominerade avskjuvningssteg.



Figur 24 Skärförlopp där den dominerande egenfrekvensen medverkar i samtliga deformationsstegen.

## 5.2 Olika typfall av diskontinuerlig spånbildning

Under den diskontinuerliga spånbildningen kan ett antal typfall av spånor erhållas beroende på skärhastighet och processens dynamiska egenskaper. Med olika typfall avses det inbördes förhållandet mellan de olika deformationsstegen relaterat till den dominanta egenfrekvensen. I tabellen nedan finns de kombinationsmöjligheter i frekvenser redovisade som kan existera i skärprocessen under de olika deformationsstegen. Förekommande frekvenser kan vara av tre typer enligt följande:

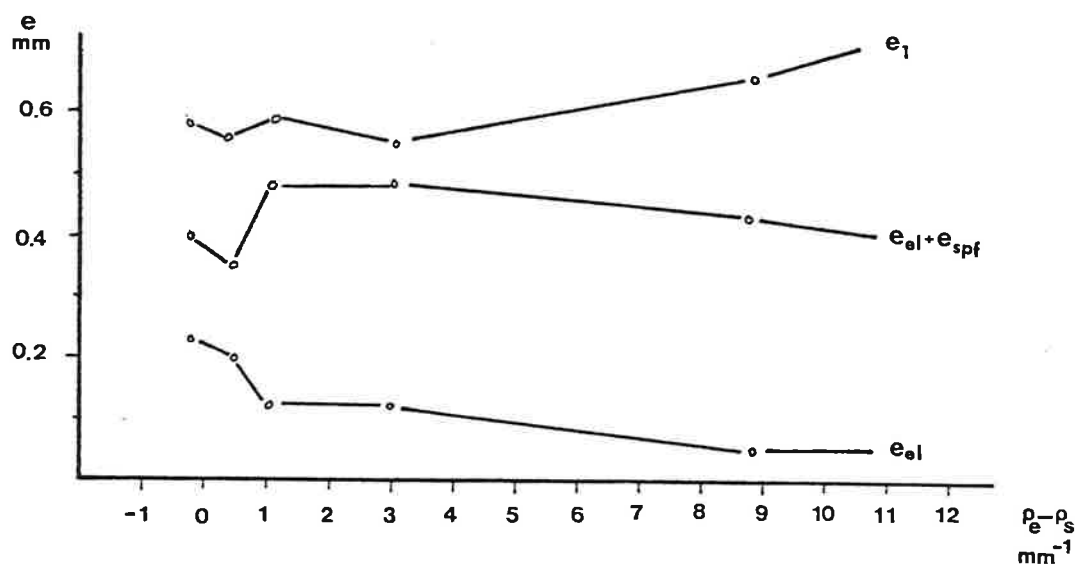
- Lägre än systemets dominanta egenfrekvens
- Samma som systemets dominanta egenfrekvens
- Högre än systemets dominanta egenfrekvens

Dessa tre typerna finns dock inte helt renodlade utan uppdelningen får ses som schematisk.

	$< f_e$	$= f_e$	$> f_e$
- Det elastisk deformationssteget	*-I	*-II	** -III
- Spånformnings- steget	** -IV	*-V	(*)-VI
- Avskjuvnings- steget	*-VII	** -VIII	—IX

Alla typfall har observerats under försök utom fall IX . Under "normala" skärdata är vissa typfall mer förekommande än andra dessa är markerade med \*\*.

Slutligen visar vi hur den inbördes fördelningen är mellan de olika deformationsstegen för ett perlitiskt segjärn som funktion av differensen  $\epsilon = \epsilon_e - \epsilon_s$ . Övriga betingelser finns angivna i anslutning till figur 9.



Figur 25 Inbördes fördelning mellan de olika deformationsstegen för olika differenser  $\epsilon_e - \epsilon_s$ .

## 6 SKÄREGGENS BELASTNINGSBILD FÖR OLIKA FÖRHÅLLANDE MELLAN STÖRTALEN

Teorin bakom större delen av detta kapitel finns beskriven i referens /5/. Vi kommer här att direkt presentera de samband som erfordras för att beskriva en tvådimensionell skärengs mekaniska belastningsbild. Med mekanisk belastningsbild avses fördelning och utseende på de spänningar som verkar på kontaktytorna mellan skäreng och arbetsstycke och mellan skäreng och spåna.

### 6.1 Allmän teori för skärengs belastningsbild

Verktygets belastning kommer till stor del att bestämmas av det aktuella arbetsmaterialets skärmotstånd ( $C_r$ ). Skärmotståndet för arbetsmaterial med ett diskontinuerligt spånuppträdande definieras enligt ekvation 25.

$$\text{eller} \quad C_r = F_T / st + \phi F_T / st \quad \text{--- (25)}$$

$$C_r = F_T (1 + \phi) / st = C_r (1 + \phi) \quad \text{--- (26)}$$

där:  $C_r$  = skärmotståndet baserat på tangentialkraftens medelvärde

$C_r$  = skärmotståndet vid godtycklig tidpunkt

$F_T$  = tangentialkraftens medelvärde

$s$  = matningen

$t$  = skärdjupet

$\phi$  = variationstal

Variationstalet tar hand om spridningen i tangentialkraft och definieras enligt nedan. Variationstalet ger även amplituden för det symmetriska skärmotståndet enligt ekvation 28.

$$\phi(e) = (F_T(e) / F_T) - 1 \quad \text{--- (27)}$$

$$\Delta C_r = 2\phi C_r \quad \text{--- (28)}$$

där:  $F_T$  är tangentialkraften vid en godtycklig ingreppssträcka  $e$ .

Tangentialkraften kommer att fördela sig mellan skärengs spån respektive släppningssida på eggen och kan skrivas som summan av två krafter. På samma sätt kommer axialkraften ( $F_A$ ) att uppträda.

Detta kan vi skriva enligt ekvationerna nedan som:

$$F_T = T_{sl} + T_{sp} \quad \text{_____ (29)}$$

$$F_A = A_{sl} + A_{sp} \quad \text{_____ (30)}$$

där  $T_{sl}$  = tangentialkraft på släppningsidan

$T_{sp}$  = tangentialkraft på spånsidan

$A_{sl}$  = axiellkraft på släppningssidan

$A_{sp}$  = axiellkraft på spånsidan

För att beskriva eggens totala lastfördelning inför vi lastfördelningsfunktionerna  $\varphi_S$ ,  $\varphi_T$  och  $\varphi_A$  dessa definieras enligt följande:

$$\varphi_S = F_A / F_T \quad \text{_____ (31)}$$

$$\varphi_T = T_{sl} / F_T \quad \text{_____ (32)}$$

$$\varphi_A = A_{sl} / F_A \quad \text{_____ (33)}$$

Genom kombination av ekvationerna ovan kan vi uttrycka lasterna som verkar i tangetiell respektive axiell riktning på eggens belastade ytor med hjälp av skärmotståndet och lastfördelningsfunktionerna på följande sätt:

$$T_{sl} = \varphi_T \bar{C}_r (1+\phi) st \quad \text{_____ (34)}$$

$$T_{sp} = (1-\varphi_T) \bar{C}_r (1+\phi) st \quad \text{_____ (35)}$$

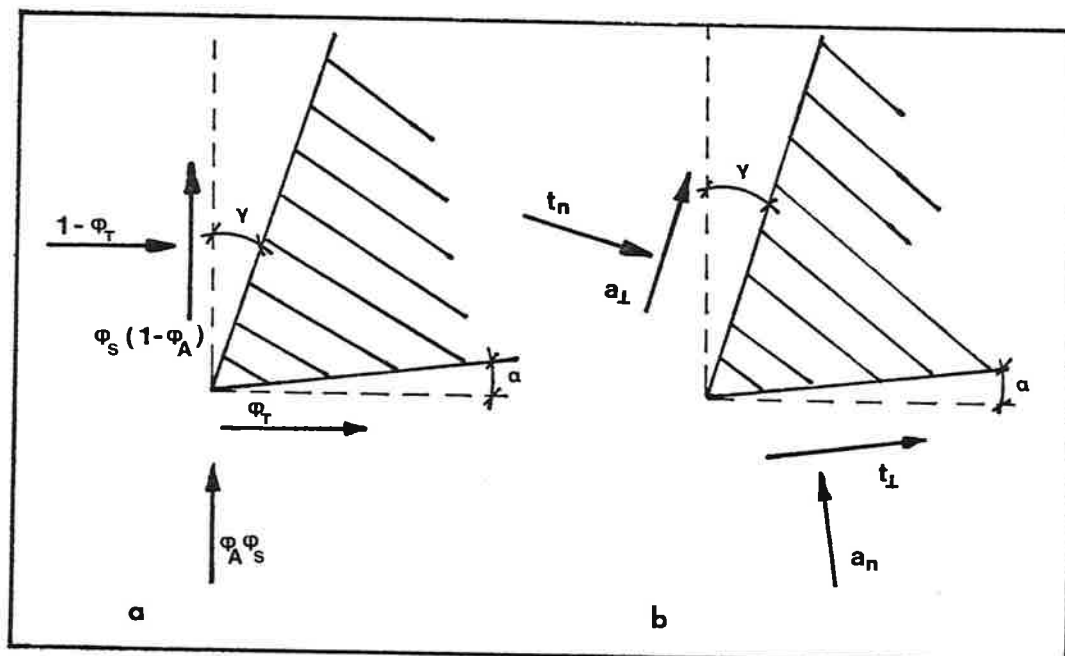
$$A_{sl} = \varphi_A \varphi_S \bar{C}_r (1+\phi) st \quad \text{_____ (36)}$$

$$A_{sp} = (1-\varphi_a) \varphi_S \bar{C}_r (1+\phi) st \quad \text{_____ (37)}$$

Om ekvationerna ovan divideras med termen  $\bar{C}_r (1+\phi) st$  erhålles de dimensionslösa lastfördelningarna vilka är inritade i figur 27a.

För att bestämma lasterna som verkar på skäreppens ytor måste eggens geometri införas. För en skarp egg kan krafterna i tangetiell respektive axiell riktning delas upp i en normalkraft och en mot denna vinkelrät skjuvkraft som verkar på skäreppens ytor enligt figur 27b. Detta görs genom att ställa upp eggens kraftjämvikt och införa spånvinkeln ( $\gamma$ ) samt släppningsvinkeln ( $\alpha$ ).





Figur 27 De dimensionslösa lastfördelningarna inritade på en tvådimensionell skärepp.

Denna betraktelse tar inte hänsyn till den stagnationspunkt som erhålles på eggens spånsida vilket medför att skjuvspänningen byter tecken. Denna approximation kan anses vara tillåten då spänningen i detta område inte är av kritisk storlek. Följande samband erhålles ur kraftjämvikten:

$$t_n = \varphi_S \varphi_a \sin \gamma - \varphi_T \cos \gamma + \varphi_S \sin \gamma + \cos \gamma \quad \text{---(38)}$$

$$t_l = \varphi_S \varphi_A \sin \alpha + \varphi_T \cos \alpha \quad \text{---(39)}$$

$$a_n = \varphi_S \varphi_A \cos \alpha - \varphi_T \sin \alpha \quad \text{---(40)}$$

$$a_l = -\varphi_S \varphi_A \cos(2\alpha + \gamma) + \varphi_T \sin(2\alpha + \gamma) + \varphi_S \cos \gamma + \sin \gamma \quad \text{---(41)}$$

De verkliga krafter som verkar på eggens ytor erhålles genom att multiplicera komponenterna ovan (ekv.38-ekv.41) med termen  $\bar{C}_r(1+\phi)st$ . Spänningen i verktyget som är baserad på ekvationerna 38-41 är den dimensionslösa inre spänningen  $\sigma_0$ .

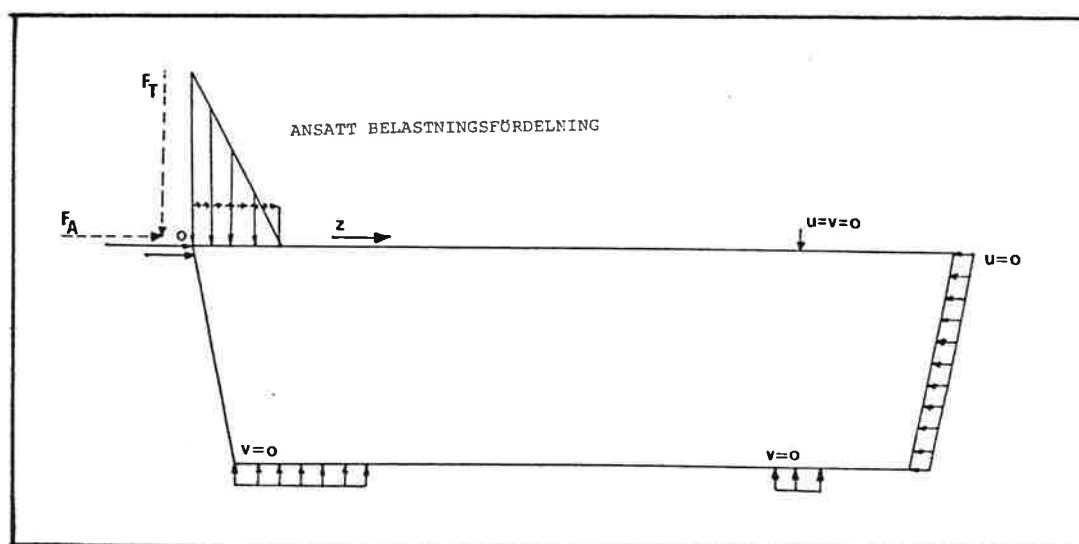
I nästa steg gäller det att beskriva hur lasterna fördelar sig på respektive eggyta. Som exempel kan vi nämna att ett sprött material typ gjutjärn har i stora drag en linjärt avtagande normalspänning /6/ från eggen räknat, vilken kan tecknas enligt ekvation 42. Koordinatriktningen  $z$  visas i figur 28.

$$\sigma_{nsp} = 2t_n C_r (1+\psi) s t (1-z/l_c) / t l_c \quad \text{---(42)}$$

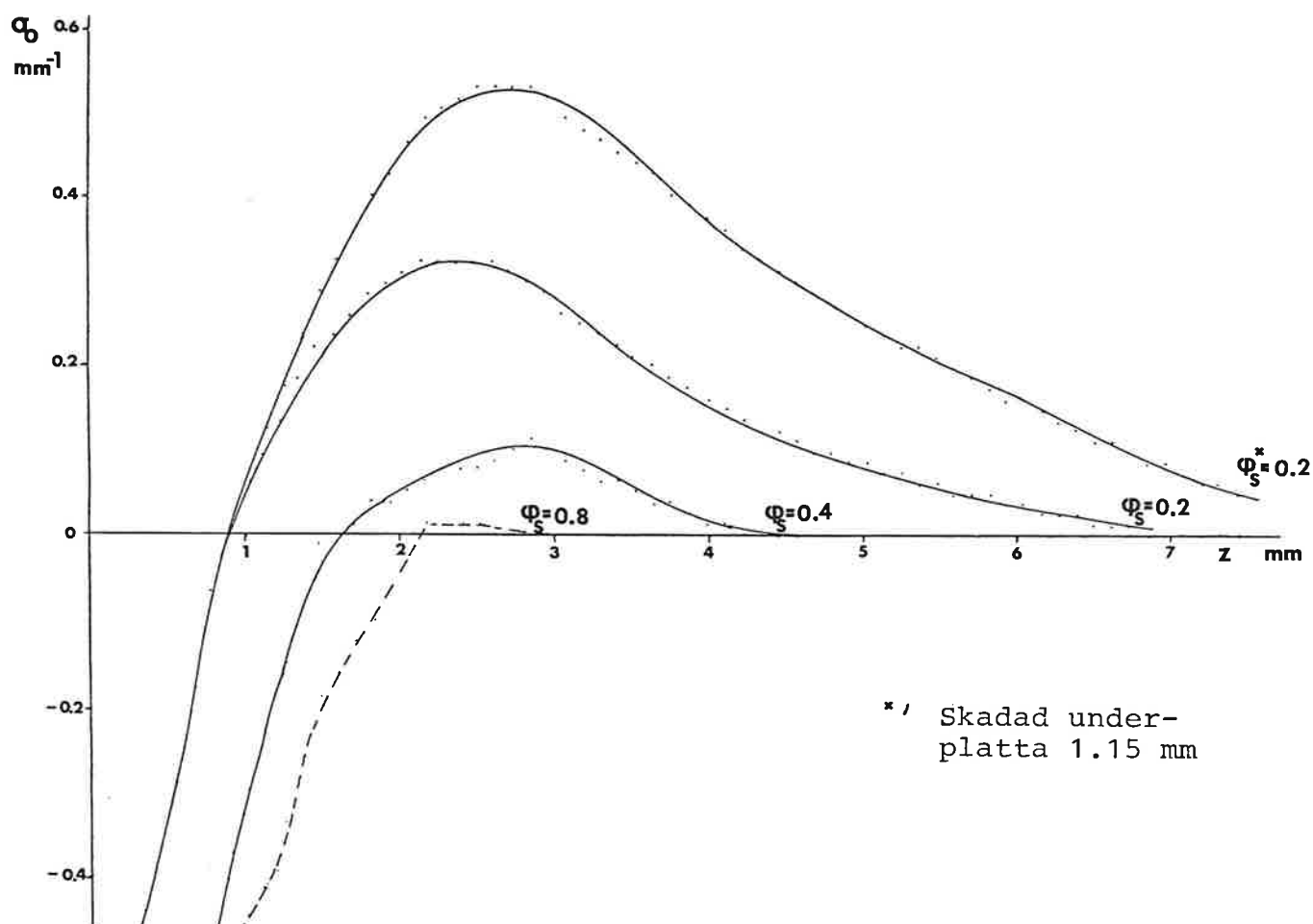
För vårt fall med diskontinuerligt spänupträdande kan kontaktlängden  $l_c$  mellan spåna och verktyg antas variera mellan en till två segmentbredder ( $e_2 \leftrightarrow 2e_2$ ). Genom att ansätta normal respektive skjuvspänningar och anta randvillkor för skäregegen kan eggens inre spänningsfält beräknas m.h.a. finita elementmetoden.

Spröda eggmaterial typ hårdmetall visar sig vara betydligt känsligare för dragspänningar än för tryckspänningar. Dragspänningar erhålles i skäregegen för bl.a. små  $\varphi_s$ . I figur 28 visas en belastningsansättning för finita elementberäkningar /6/. Vid dessa beräkningar fastställdes eggens största spänning för olika värden på kraftförhållandet  $\varphi_s$ .

Resultaten från försöken finns redovisade i figur 29. Spänningen  $\sigma_{0max}$  är den dimensionslösa spänningen baserad på de dimensionslösa lastfördelningsfunktionerna. I det fall då  $\varphi_s$  ansattes till värdet 0.8 erhöles nära nog endast tryckspänningar i hela eggen vilket medför en låg brottrisk. Den verkliga spänningen  $\sigma_{max}$  erhålles genom att multiplicera den dimensionslösa spänningen med termen  $C_r(1+\psi)s$ .



Figur 28 Ansättning av belastningsfördelning och randvillkor på en tvådimensionell skäregegen för FEM-beräkningar /6/.



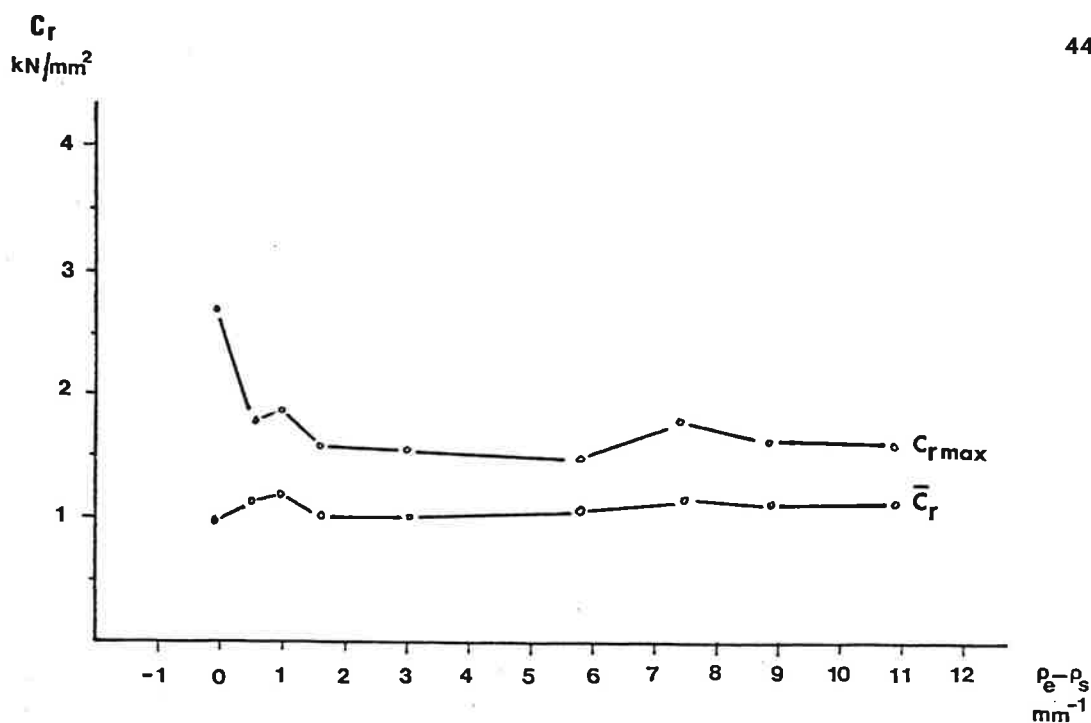
Figur 29 Den dimensionslösa spänningen  $\sigma_{0\max}$  som funktion av avståndet från eggen där olika  $\varphi_s$  är parameter /6/.

## 6.2 Störtalets inflytande på skäreggens belastningsbild

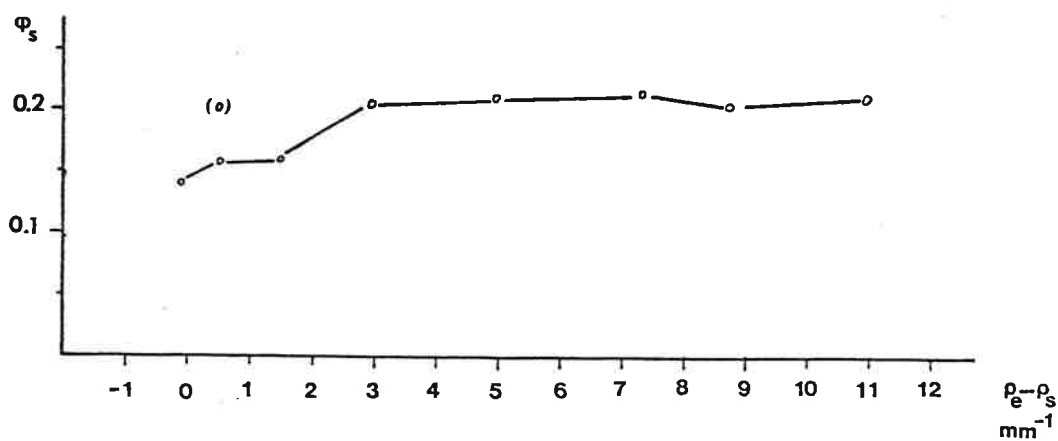
I ekvationerna 33 till 37 ingår de parametrar som styr de laster som verkar på skärebben. Det största inflytandet har arbetsmaterialets skärmotstånd  $C_r$ . Tillsammans med lastfördelningsfunktionerna bestämmer skärmotståndet och eggens randvillkor det inre spänningsfältet för ett givet verktyg.

Under bearbetning i dynamiskt kritiska förhållanden kommer båda de ovan nämnda parametrarna att fluktureras och då i vissa fall kraftigt. I figur 30 visas skärmotståndet och dess amplitud samt lastfördelningsfunktionen  $\varphi_s$  som funktion av differansen  $e_e - e_s$  eller skärhastigheten för det för det tidigare använda perlitiska segjärnet.

Det framgår i figur 30 och figur 31 att det ogynnsamma inträffar att både



Figur 30 Skärmotståndet och dess amplitud som funktion av differensen  $e_e - e_s$  och skärhastigheten.



Figur 31 Kraftförhållandet  $\varphi_s$  som funktion av differensen  $e_e - e_s$ .

skärmotståndet och dess amplitud ökar samt att belastningsfördelningsfunktionen  $\varphi_g$  minskar d.v.s. att båda parametrarnas värde bidrar till en ökad mekanisk belastning på skäregegen. Anledningen till  $\varphi_g$  uppträdande finn förklarat i referens/5/.

Då skärmotståndets amplitud ökar kommer risken för utmattningsbrott att öka vilket kan förklara varför man erhöill ett ökat antal egghaverier. Under försöken visade det sig att i vissa fall då differansen  $e_e - e_g$  justerades in till mycket nära noll erhöills haveri redan efter ca. 1 meters ingreggs-längd. Under denna tid (sträcka) utsattes eggen för ca. 2000 belastningsväxlingar. Antalet belastningsväxlingar under en ingreppsmeter kommer att vara lika med segmentbildningens störtal

Vi bör ytterligare pångtera att det beräknade skärmotståndet kommer inte helt att överensstämma med det verkliga p.g.a. de dynamiska omständigheterna. Mätssystemet och programvara för signalanalys kommer att behandlas under kapitel 8.

De uppmätta höga amplituderna vid svängningskritisk bearbetning kan främst anses bero på systemets vekhet och otillräckliga dämpningsförmåga, vilket i sin tur återverkar på matningsdjupet. Matningen kommer att variera kring det på maskinen inställda värdet vilket då medför varierande skärkrafter. Denna iakttagelse kan göras på den skurna ytan. Ytans vågighet motsvar en våglängd på ca. 5 ggr.  $e_1$ .

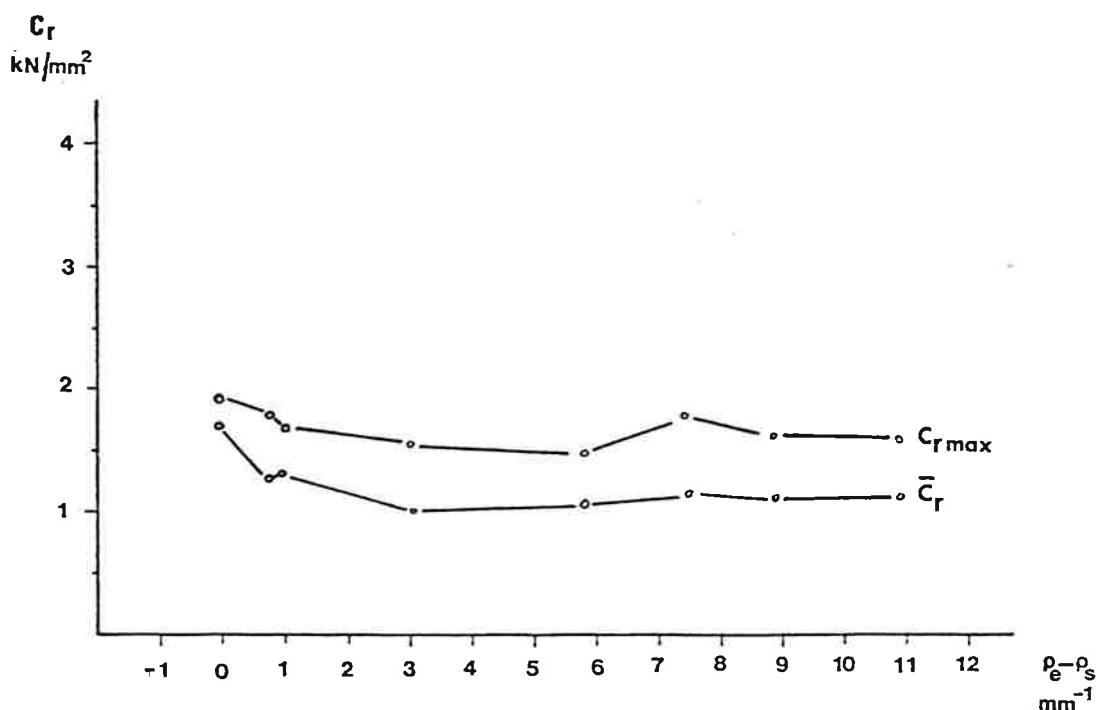
En materialteknisk förklaring till ett högt mätt skärmotstånd är att den verkliga skärhastigheten i ingreppet är högre än den nominella skärhastigheten vilket medför en hög deformationshastighet som i sin tur medför ett högt skärmotstånd. Med tanke på de bearbetade materialen som är tämligen spröda och därför deformerar relativt lite är den ovan angivna effekten troligen av underordnad betydelse.

Den dominerande faktorn är att man mäter en rörelse främst hos verktygsskäftet som är orsakad av att man "pumpar" in svängningsenergi i systemet. Skäftets rörelse dvs den mätta spänningen kommer att öka vid varje belastningsväxling till en sådan nivå som systemets dämpning tillåter (jfr. figur 3). Detta syns väl på de kraftförlopp som är upptagna under kritisk

bearbetning. Vid ingreppet kommer skärkrafterna att öka för varje bildat segment tills det når ett visst värde detta kan ses i figur 9a fil 84.

Ett skärmotstånd som bättre överensstämmer med det verkliga kan beräknas genom att basera detta på den mätta skärkraften för de inledande spånsegmenten, d.v.s. innan vi hunnit "pumpa" in för mycket svängningsenergi. I figur 32 nedan finns skärmotståndet uppritat mot differansen  $\rho_e - \rho_s$  som bygger på tangentialkraften för det tredje bildade spånsegmentet efter ingrepp.

Det framgår både från teorin och från praktiska försök att spänningen i skärebben ökar med minskad differens mellan segmentbildningens störtlal  $\rho_s$  och egenstörtlal  $\rho_e$ . Spänningen kommer att vara som mest kritisk när differensen är noll.



Figur 32 Skärmotståndet för det tredje bildade spånsegmentet efter ingrepp som

funktion av differensen  $\rho_e - \rho_s$ .

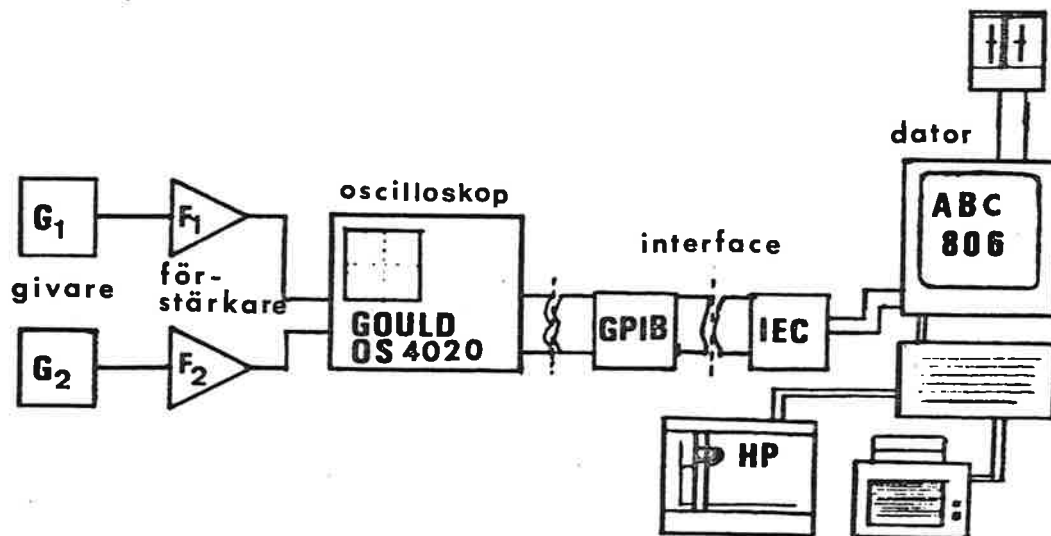
## 7 BESKRIVNING AV MÄTSYSTEM FÖR INSAMLING AV MÄTDATA

Det mätsystem vi har använt för insamling av data från skärprocessen har till största delen utvecklats i ett examensarbete utfört vid institutionen /7/. Mätsystemet bygger på att skärkrafterna i ett verktygskraft registreras via trådtöjningsgivare och senare omvandlas till krafter mha kalibreringspolynom.

Mätsystemets delar är följande:

- Givare
- Signalförstärkare
- Digitalt minnesoscilloskop
- Dator med tillbehör
- Programvara

Mätsystemets uppbyggnad framgår av figur 33. Givare, signalförstärkare och oscilloskop fungerar som mätvärdesinsamlare, där mätdata primärlagras i oscilloskopets minne på 4 kbytes. Datorn arbetar som kontrollenhet i



Figur 33 Mätsystemets uppbyggnad

mätssystemet och styr oscilloskopets inställning, start av mätning, överföring av data, lagring av data samt beräkning och presentation av resultatet.

Anledningen till att ett oscilloskop används är att oscilloskopet har en så pass stor samplingsfrekvens så att vi, i denna del av mätssystemet, inte ska förlora någon information av intresse. En lösning med en A/D-omvandlare (Analog/Digital-omvandlare) kopplad direkt till datorn ger ej tillräcklig samplingsfrekvens. I dagens läge finns det snabbare A/D-omvandlare som skulle klara av oscilloskopets uppgift men det kräver omfattande programmeringsarbete i assembler, för att erhålla samma snabbhet.

Det som nu begränsar mätssystemets noggrannhet och snabbhet är främst typen av givare, dess placering, signalförstärkarens bandbredd samt maskinsystemets egenskaper i form av egenfrekvenser och dämpning. Maskinsystemet består i vårt fall av en chiphyvel med ett verktygsskaft på vilket 8 folietöjningsgivare är pålimmade. Egenfrekvensen hos systemet utgör gränsen för hur snabba förlopp vi kan registrera då krafterna faller. Vid kraftuppbyggnaden kommer inte egenfrekvensen att innebära någon begränsning för snabbheten på kraftförloppet. Detta kan ses i kraftdiagrammen såsom att stigtiden vid en belastningscykel är kortare än falltiden.

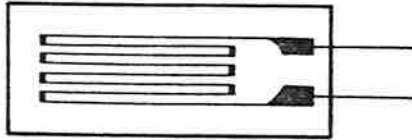
I följande avsnitt beskrivs de ovan angivna delarna i mätssystemet.

### 7.1 Givare

Vi har valt att utnyttja folietöjningsgivare till att registrera töjningarna i verktygsskaftet. Folietöjningsgivaren är en nyare typ av givare än trådtöjningsgivaren, här är trådslingan ersatt med en slinga av metallfolie med ett mönster som framgår av figur 34.

Vi har använt konstantan-givare av fabrikat Hottinger, 3mm lång. Givarens längd är en begränsande faktor när det gäller att kunna registrera snabba förlopp. Givaren känner av en medeltöjning under sin utsträckning. Om givaren täcker en hel våglängd kommer den registrerade töjningen att vara noll. Detta betyder att givarens längd ska vara liten i förhållande till den





Figur 34 Folietöjningsgivare /8/.

transienta töjningens våglängd. I ekvation 43 kan vi ansätta en maximalt tillåten våglängd och därefter beräkna den högsta frekvens som kan registreras då vågutbredningshastigheten är känd.

$$v = f \cdot \lambda \quad \text{---(43)}$$

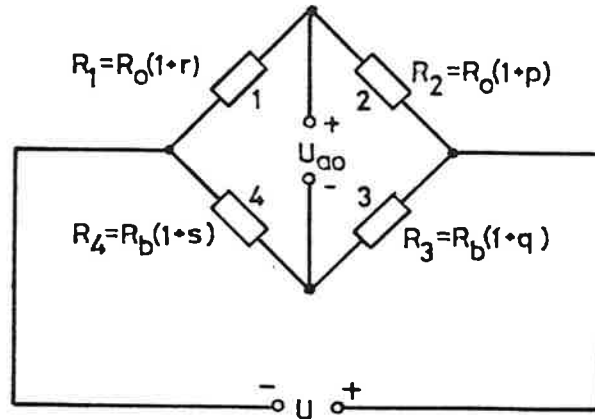
Vi sätter våglängden till 20 gånger töjningsgivarens längd samt utbredningshastigheten i stål till 5000 m/s. Vi erhåller då en maximal signalfrekvens på:

$$f_{\max} = \frac{v}{\lambda} = \frac{5000}{20 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 85 \text{ kHz} \quad \text{---(44)}$$

Givarna har kopplats i en fullbrygga enligt figur 35.

Bryggan matas med 4 volt likspänning från ett delat bilbatteri för att erhålla en stabil och störningsfri spänningskälla. Vanligtvis uppträder obalans i bryggan vilket får utbalanseras med yttre precisionsmotstånd. Vi har löst detta genom att i förstärkaren placera en flervarvig precisionspotentiometer som ger möjlighet till att balanserar ut offsetspänningen. En viss drift förekommer i bryggan pga att temperaturen varierar, men eftersom vi har kört våra försök i en kipphyvel där vi inte ligger i ingrepp hela tiden får vi inga stora temperaturförändringar av själva skärförloppet. Driften förekommer istället i början då vi lägger på matningsspänningen på givarbryggan, vilket innebär att spänningen bör vara påslagen ett tag innan mätningar utförs.

Två givarbryggor används, en till tangentialkraften och en till matningskraften. Givarnas placering framgår av figur 36.



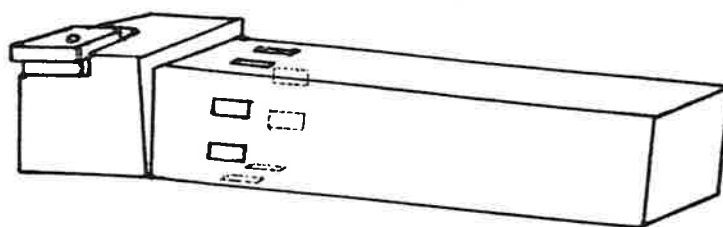
Figur 35 Givare kopplade i fullbrygga /8/.

Ett problem med töjningsgivare är att de måste placeras en viss sträcka från själva verktygseggen. Detta innebär att en viss information går förlorad "på vägen" pga dämpningen i skaftet och dessutom fås en viss fördröjning av mätsignalen. Den signal som registreras av töjningsgivarna kommer att bli ett medelvärde av de krafter som verkar på skaftet.

## 7.2 Signalförstärkare

Den mätförstärkare som vi har använt är konstruerad av oss själva, eftersom de mätförstärkare som vi har funnit på marknaden ej har tillräcklig bandbredd.

Förstärkaren är uppbyggd i tre steg med tre operationsförstärkare i serie för att erhålla en högre bandbredd. I det första förstärkningssteget har vi använt  $\mu A$  714 HC. Denna förstärkare är en instrumentförstärkare för noggrann förstärkning av små signaler. Förstärkaren ger lågt brus, låg drift och har en maximal förstärkning på 400 000 gånger. Genom att reglera offsetspänningen kan vi ställa in önskad nollnivå och på detta sätt kompensera eventuella obalanser i givarbryggorna. I de två följande stegen har vi använt operationsförstärkaren LF 355. Dessa har till uppgift att förstärka upp signalen till en spänningsnivå som passar oscilloskopgångarna, utan att



Figur 36 Givarnas placering på verktygsskaftet.

nåmnvärt sänka bandbredden på signalen. Vid konstruktionen av mätförstärkaren har vi försökt att minimera antalet komponenter samt att skärma av själva förstärkarenheten och alla anslutningskablar. Detta för att minimera störningar och brus. Störningar i form av brus och spänningsspikar utgör ett problem som är svårt att komma till rätta med, då detta ger felaktigheter i mätsignalen.

Denna förstärkare har för ändamålet en tillräcklig prestanda med en förstärkningskurva, som är relativt rak upp till minst 110 kHz, vid 1300 gångers förstärkning samt att den maximala förstärkningen ligger på 2500 gånger. I figur 37 finns kopplingschemat för förstärkaren.

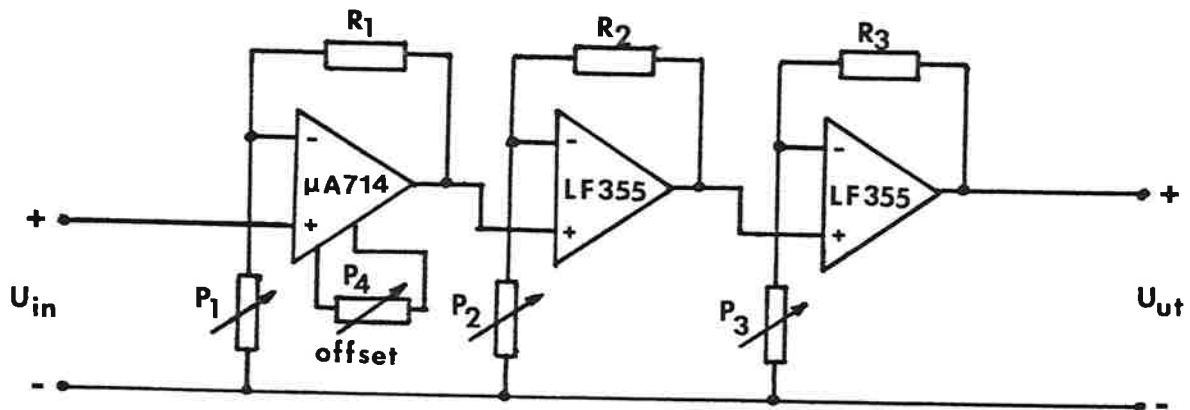
Potentiometrarna är av typen flervarviga precisionspotentiometrar och dess placering beror på att de har en viss "strökapacitans", vilket orsakar en brytfrekvens kring 20 kHz. Nackdelen med placeringen är att förstärkningskurvan ej blir linjär utan enligt sambandet.

$$F = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad \text{---(45)}$$

där:

$R_2$  är fix och  $R_1$  är variabel

Till signalförstärkaren finns det ett filter för varje kanal. Filtret är en enkel RC-krets där brytfrekvensen kan ställas in med en potentiometer. Filtringen utförs så att frekvenser som är högre än samplingfrekvensen hos oscilloskopet filtreras bort. Detta för att vi inte ska erhålla sk vinkningeffekter, alias-effekter, vilka ger felaktiga frekvenser i mätsignalen.



Figur 37 Kopplingsschema till signalförstärkaren.

### 7.3 Oscilloskop med GPIB

Ett oscilloskop används till att samla in de förstärkta signalerna från givarna. Oscilloskopet är av fabrikat Gould med beteckningen Digital Storage Oscilloscope OS 4020. Två kanaler finns för mätning och lagring av signalerna. Kanalerna klarar var för sig att lagra 2048 punkter (2 kbyte) med en maximal samplingsfrekvens på 1 MHz. Om endast en kanal används fördubblas samplingsfrekvensen. Denna maximala samplingsfrekvens utgör ingen begränsning för de skärförlopp vi har mätt upp.

Upplösningen är i horisontell led 400 samples/cm, skärmbredden är 10 cm. I vertikal led 32 steg/cm och skärmhöjden är 8 cm, dvs varje mätvärde omfattar 8 bitar.

Till oscilloskopet finns ett GPIB (General Purpose Interface Bus) inkopplat. Detta har till uppgift att möjliggöra överföring och kommunikation med andra enheter, såsom olika mätinstrument, plotter eller dator. Vi har kopplat ihop en dator med oscilloskopet. GPIB möjliggör full kontroll över oscilloskopet från en dator, endast känsligheten och nollnivån på ingångarna behöver ställas in för hand. Interfacet styrs via kommandon från datorn där man ställer in de önskade parametrarna och därefter, också på kommando, startar mätningen. Interfacet kan även skicka ut statusinformation på hur oscilloskopet är inställt.

#### 7.4 Dator med kringutrustning

Datorn, vilken utgör kontrollenheten i mätsystemet, är en Luxor-dator med beteckningen ABC 806. Till datorn är en mängd kringutrustning inkopplad för presentation och anpassning av styrsignaler. Datorsystemet består av följande enheter.

- Dator, ABC 806
- Färgmonitor, ABC 812
- Diskettstation, ABC 832
- Expansionsenhet, ABC 890
- Skrivare, Epson RX-80
- Plotter, Hewlett & Packard
- IEC-interface till ABC 806

Datorn har till uppgift att via programvara interaktivt arbeta med användaren så att mätningar enkelt, säkert och effektivt ska kunna göras. Den styr mätningen och överföringen av data och utför kalibreringsberäkningar så att krafter erhålls. Lagring av data är möjlig på diskettstationen som innehåller två diskdrivar med en kapacitet på 640 kbyte på varje diskett. Dessutom finns i datorn ett primärminne på 32 kbyte samt en sk RAM-floppy på 128 kbyte, ett RAM vilket fungerar såsom en extra diskdrive, men med betydligt kortare accesstid.

Till datorn är även en expansionsenhet ansluten till vilken vi i sin tur kan ansluta extra minne, A/D-omvandlare och andra kommunikationskort främst för extra lagringskapacitet i form av winchesterdiskar.

Till hjälp för att kunna presentera resultat av mätningar och beräkningar finns det en högupplösande färgmonitor, en 8 pennors plotter samt en skrivare med grafikmöjligheter för sk hardcopys.

IEC-interfacet är den europeiska motsvarigheten till GPIB eller IEEE-interfacet, det är i stort sett endast kontakten som skiljer dem åt. IEC-kortet anpassar ABC-bussen till oscilloskopets GPIB och möjliggör

kommunikation och överföring av data. Kortet anropas med hjälp av speciella funktioner i BASIC och kan därmed enkelt styras i ett program.

### 7.5 Programvara för mätning och signalanalys

Två olika programpaket finns tillgängliga till mätsystemet. Det första kallat IECMAT utför följande.

- Mätning
- Kalibreringsberäkning
- Lagring
- Presentering

Mätningen går till så att först utförs en nollnivåbestämning där inställningsparametrar matas in därefter visas en meny där inställning av oscilloskopet görs tex inställning av svephastighet, triggningspunkt och antal kanaler som ska användas. Efter att inställningen är klar och en "kvittens" på inställningen erhållits så visas en ny meny i vilken själva mätningen kan utföras. Mätning kan göras utan att överföring behöver utföras genom att mätsignalen visas på oscilloskopet.

Då en mätsignal har erhållits, som ser "intressant" ut ges kommando om överföring. Mätdata finns nu i datorn och en ny meny visas där användaren väljer om lagring ska utföras eller om presentation av resultatet ska göras direkt.

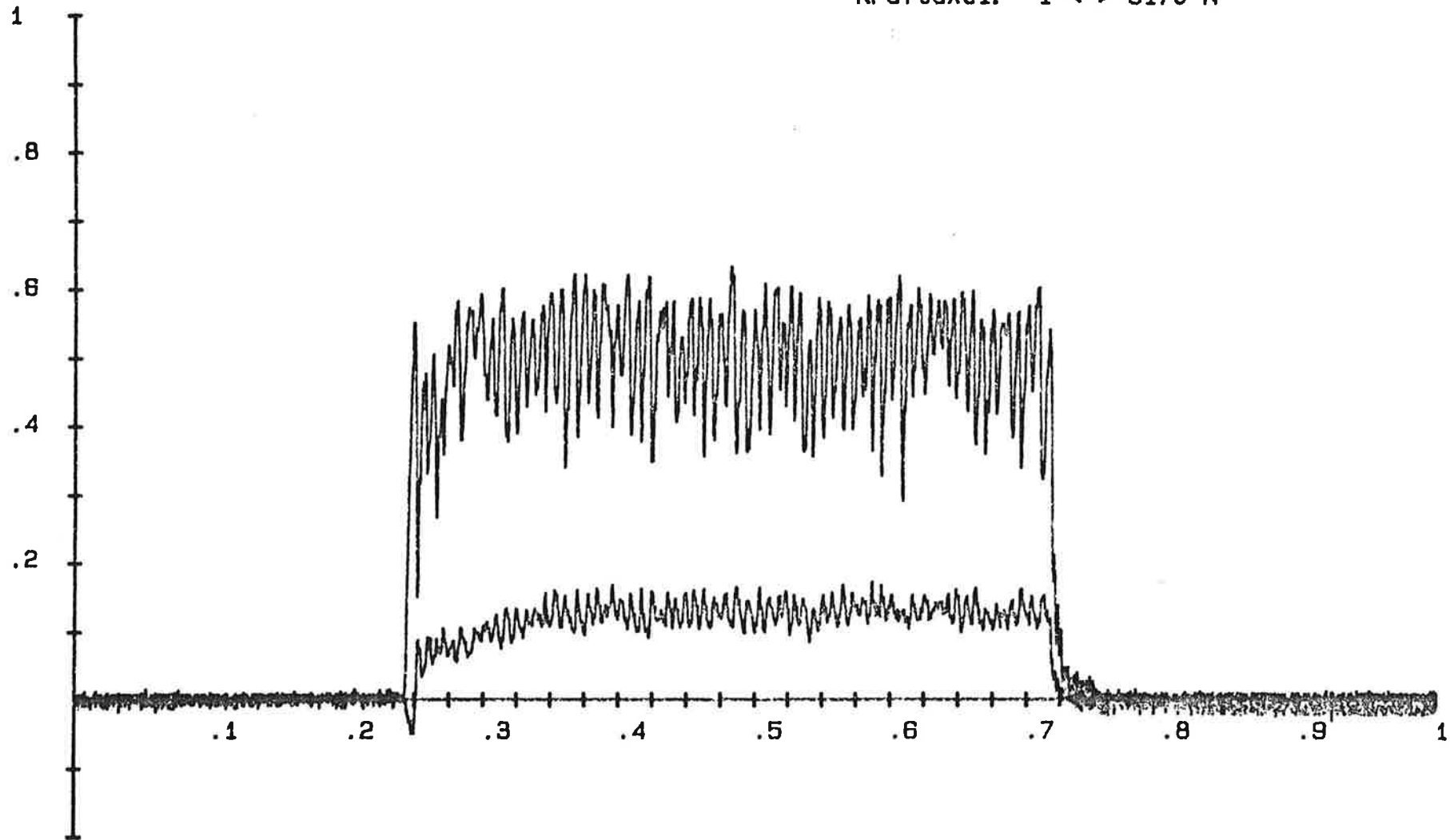
Resultatet kan presenteras på olika sätt.

- Kraft-tidsdiagram plottad på plotter eller skrivare
- Kraft-kraftdiagram plottad på plotter eller skrivare

Kurvorna kan även fås uppritade på skärmen. I figur 38 nedan visas ett kraft-tidsdiagram där y-axeln anger tangentialkraft respektive axialkraft. Tidsaxeln omfattar ett skärmsvep på oscilloskopet och är graderad i sekunder.

VIBRATION7 840514

Tidsaxel: 1 <=> .0999 sek  
Kraftaxel: 1 <=> 5170 N

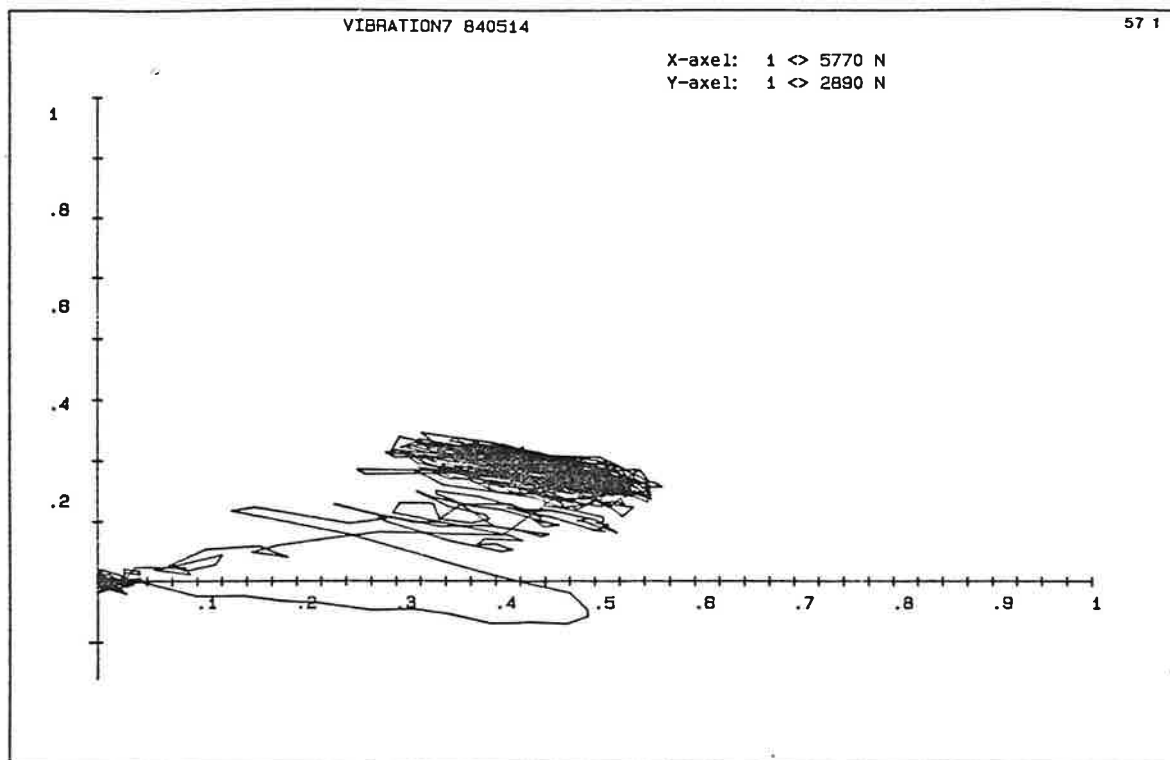


Figur 38 Kraft-tidsdiagram

I kraft-kraftdiagrammet är axialkraften ritad mot tangentialkraften och vi får en belastningsbild uppritad vid varje tidpunkt. I figur 39 visas en belastningsbild.

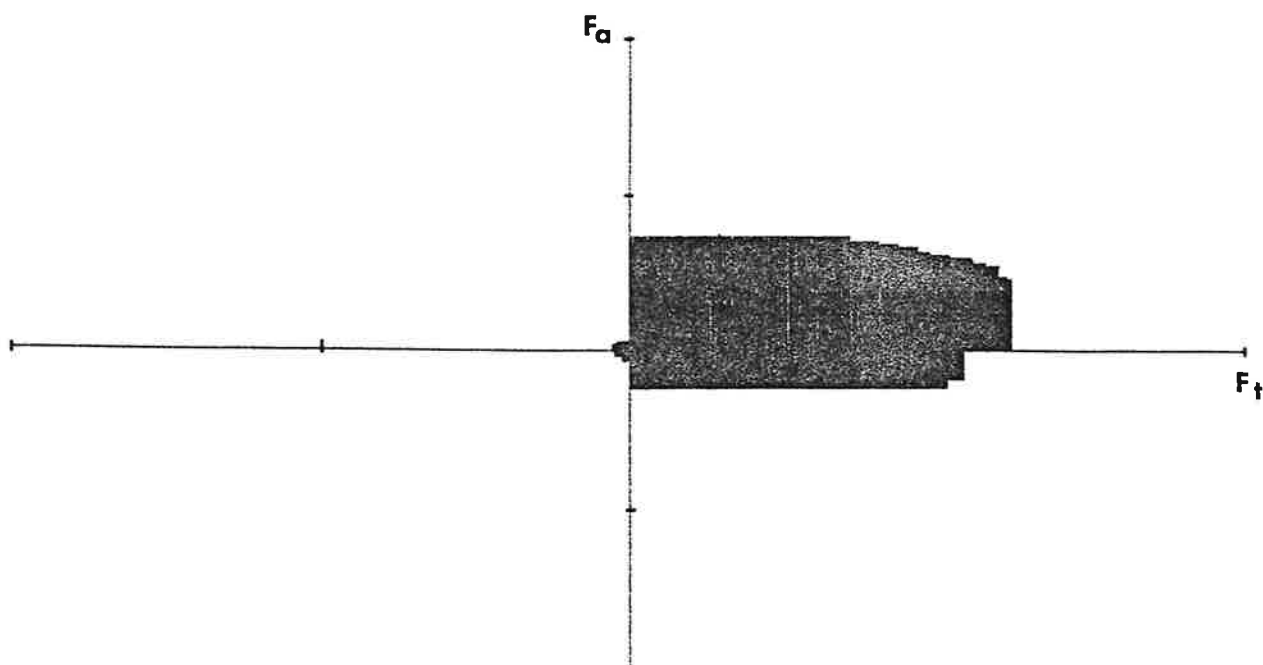
Belastningsbilden kan också fås presenterad så att resultanten av axialkraften och tangentialkraften ritas ut vid varje tidpunkt och bearbetningsförloppet kan följas i efterhand på skärmen. Samtidigt markeras maximivärden och som resultat erhålls en yta inom vilken skärkrafterna har varierat. Diagrammet visas i figur 40. Det ger dock en tydligare bild då man ser uppritandet av diagrammet på skärmen.

Programpaketet IECMÄT består av 11 delprogram. Dessa läses in i RAM-floppyn vid uppstartning och finns tillgängliga via en huvudmeny, så att delprogrammen bildar ett stort program. Övergången mellan de olika programmen blir därmed betydligt kortare än om programmen hade legat på disketter.



Figur 39 Belastningsbild





Figur 40 Diagram visande det område inom vilket skärkrafterna har varierat vid bearbetningen.

Det andra programpaketet, FOURPAC, innehåller program för frekvensanalys av skärförloppet. FOURPAC är uppbyggt av 7 delprogram, vilka läses in i RAM-floppyn vid uppstartning och körs på samma sätt som IECMÄT. Huvudprogrammet utför en fourieranalys på de mätsignaler som IECMÄT har lagrat i en fil på diskett. Programmet beräknar fourierkoefficienterna i serieutvecklingen.

$$a_0 + a_1 \sin x + a_2 \sin 2x + \dots + b_1 \cos x + b_2 \cos 2x + \dots \quad \text{---(46)}$$

Koefficienterna lagras på en fil på diskett. På grund av det begränsade primärminnet på 32 kbyte så kan ej fler punkter än 800 stycken behandlas samtidigt, 800 punkter utgör 1/4-del av en kanals mätdata. Detta kan dock lösas genom att lagra mätvärdena i RAM-floppyn och använda denna som en variabel-vektor. Begränsningen till 800 punkter betyder att lägre frekvenser ej kommer med i analysen, med lägre frekvenser menas frekvenser under ca 100 Hz, beroende på svephastigheten på oscilloskopet vid mättillfället. Den lägsta frekvensen kan beräknas ur.

$$LF = \frac{N_k / N_a}{T_s \cdot 10} \quad \text{---(47)}$$

där:

LF=lägsta frekvens

$N_k$ =totala antalet punkter för en kanal

$N_a$ =antalet analyserade punkter

$T_s$ =svephastigheten på oscilloskopet vid mättillfället

Högsta frekvensen som kommer med i analysen blir antalet analyserade punkter multiplicerat med den lägsta frekvensen.

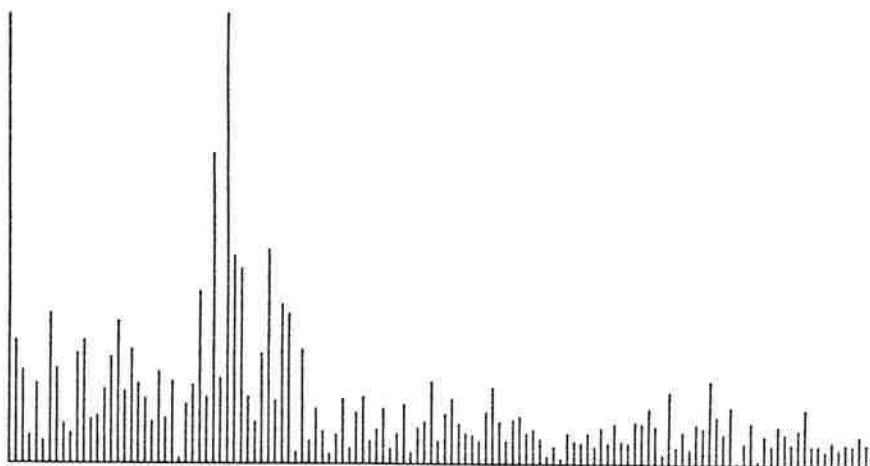
Fourieranalysen utförs med en algoritm som kallas Fast-Fourier-Transform, FFT. Beräkningen av fourierkoefficienterna tar ca 12 minuter för 800 punkter. Den långa tiden beror på att programmet är skrivet i BASIC.

Då frekvensanalysen är klar finns det olika sätt att presentera resultatet på. En listning av fourierkoefficienterna i tabellform är möjlig, se tabell nedan.

Frekvensspektrat kan även fås utritat på plotter eller skrivare, se figur 41. På y-axeln har vi vikten av fourierkoefficienterna, se samband 48, och på

#### FREKVENSPANALYS AV SKÄRFÖRLOPP

```
FIL57
skärhastighet= 41 m/min
lägsta frekvens= 40 Hz
Y-axel <> vikt
X-axel <> frekvens
```



```
normerad y-axel där 1 motsvarar 10.996
på x-axeln är avståndet mellan två linjer 40 Hz
max frekvens= 5080 Hz
```

Figur 41 Frekvensspektra plottat på skrivare.

x-axeln frekvens.

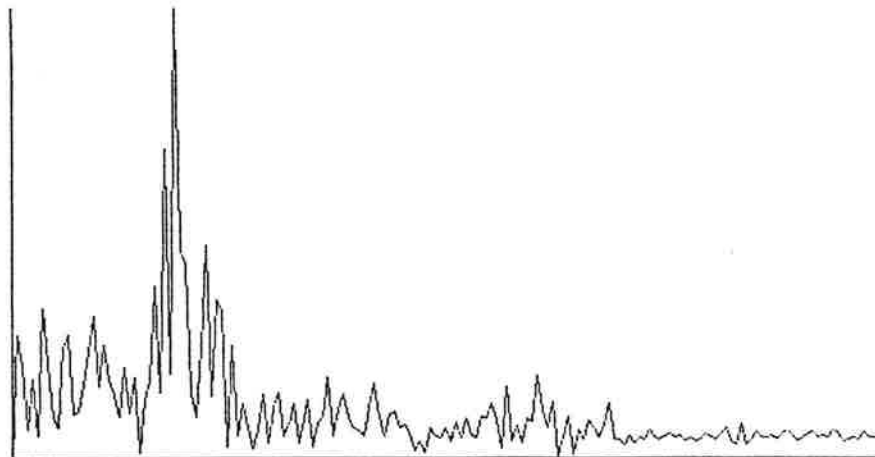
Ett annat diagram som kan fås på skrivaren är störfördelningen, se figur 42. I diagrammet har vi på y-axeln en viktning av fourierkoefficienterna enligt.

$$\text{Vikt}(f) = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{---(48)}$$

På x-axeln har vi störtalet  $\rho$  enligt.

$$\rho = \frac{60f}{v} \quad \text{---(49)}$$

Y-axel <> vikt  
Xaxel <>  $\rho$



normerad Y-axel där 1 motsvarar 10.996  
X-axel där 1 motsvarar 10000

Figur 42 Diagram beskrivande störfördelningen, plottat på skrivare.

## FREKVENSPANALYS AV SKÄRFÖRLOPP

Fourierkoefficienterna för: FIL57 1201 512  
 $A(I) = \text{cosinustermer}$   $B(I) = \text{sinustermer}$   
 $Rå = 60f/v$  (störtal) ,  $\text{vikt}^2 = A^2(I) + B^2(I)$   
 Material: SS-0125  
 Skärhastighet: 41  
 Matning: .5  
 övrigt:  $b=33.1$   $t=4.6$

\*\*\*\*\*

Frekv.	A(f)	B(f)	Rå	Vikt
0	172.43			
40	-2.63	1.41	58.5366	2.98
80	-.65	-2.15	117.073	2.25
120	.27	-.64	175.61	.69
160	-1.3	-1.4	234.146	1.91
200	-.51	-.2	292.683	.55
240	-2.4	2.71	351.22	3.62
280	-1.17	1.97	409.756	2.29
320	-.14	.98	468.293	.99
360	.64	-.31	526.829	.71
400	-2.61	.55	585.366	2.67
440	-.92	2.85	643.902	2.99
480	1.04	-.15	702.439	1.05
520	.82	.78	760.976	1.13
560	.24	1.79	819.512	1.81
600	-2.47	.78	878.049	2.59
640	.68	3.37	936.585	3.44
680	-1.74	0	995.122	1.74
720	.59	2.69	1053.66	2.75
760	-1.87	.45	1112.2	1.92
800	1.55	-.17	1170.73	1.56
840	-.82	-.57	1229.27	1
880	-2.2	-.27	1287.8	2.22
920	-.13	-1.09	1346.34	1.1
960	-.03	1.96	1404.88	1.96
1000	-.09	-.09	1463.41	.13
1040	-1.38	-.33	1521.95	1.42
1080	1.63	.92	1580.49	1.87
1120	-1.07	4.07	1639.02	4.21
1160	1.26	.98	1697.56	1.6
1200	-1.08	-7.45	1756.1	7.53
1240	-1.6	-1.33	1814.63	2.08
1280	-10.99	.18	1873.17	10.99
1320	3.4	-3.76	1931.71	5.07
1360	2.29	-4.16	1990.24	4.75
1400	1.59	.15	2048.78	1.6
1440	-.48	.9	2107.32	1.02
1480	-.25	-2.65	2165.85	2.66
1520	-5.12	.85	2224.39	5.19
1560	.78	-1.28	2282.93	1.5
1600	-3.7	1.05	2341.46	3.85
1640	-2.97	2.05	2400	3.61
1680	.14	.22	2458.54	.26
1720	-1.28	2.43	2517.07	2.75
1760	-.53	.06	2575.61	.53
1800	-.57	1.22	2634.15	1.35
1840	-.35	.72	2692.68	.8
1880	-.23	0	2751.22	.23
1920	-.17	.66	2809.76	.68
1960	-.37	-1.5	2868.29	1.54

## 8 SAMMANFATTNING OCH FÖRSLAG TILL FORTSATT ARBETE

Vi har i detta arbete presenterat ett nytt angreppssätt för att behandla påtvingade svängningar vid spånskärande bearbetning i material med cykliskt varierande skärmotstånd.

### 8.1 Sammanfattning av uppställd modell

Den teoretiskt uppställda modellen visar sig stämma väl överens med praktiskt gjorda skärförsök i grått gjutjärn och perlitiskt segjärn.

Genom studier av spånor eller genom signalanalys av upptagna skärkrafter kan belastningskritiska områden för skäreggen fastställas för ett maskinsystem med känd dynamik. Det sammanfattande resultatet kan skrivas i stördifferens sambandet nedan, vilket beskriver risken för att komma in i ett belastningskritiskt område pga att ha valt olyckliga kombinationer på skärparametrarna. Modellen beskriver inte hur pass kritiskt området är utan endast ger svar på om risk finns för svåra arbetsvillkor för skäreggen.

$$q_e(v, f_e) - q(h_1, \lambda) = \pm \varepsilon(\sigma_{qe}, \sigma_e) \quad \text{---(50)}$$

där följande funktioner är:

- $q_e$  = egenstörfördelningen
- $q$  = arbetsmaterialets störfördelning
- $\varepsilon$  = kritisk differensvidd

med följande huvudsakliga ingående variabler:

- $v$  = skärhastigheten
- $f_e$  = maskinens egenfrekvensspektra
- $h_1$  = nominell spåntjocklek,  $h_1 = s \sin \alpha$
- $\lambda$  = spånstukningen,  $h_2/h_1$
- $\sigma_{qe}$  = spridning i egenstörtal
- $\sigma_e$  = spridning i arbetsmaterialets störfördelning

Vi har under arbetets gång inte direkt behandlat vilka  $\epsilon$  som medför " trygg" bearbetning under olika dämpningsförhållanden utan talat endast om det mest kritiska fallet då  $\epsilon = \text{noll}$ . Under praktiska försök har det visat sig att svåra belastningsfall kan uppkomma i vissa fall då  $\epsilon$  har varit ca. 0.2 per mm utan att några andra indikationer har iakttagits, typ missljud eller vibrationsmönster på bearbetad yta. Vi har även teoretiskt visat att den typ av belastning som uppkommer vid påtvingade svängningar medför högre inre spänningar i eggen än vanligt vilket då ökar risken för skärbrott.

I kapitel 7 har vi beskrivit vårt mätsystem som är uppbyggt för att mäta och signalbehandla bla skärkrafterna som uppkommer under bearbetning. Vi har visat att via signalanalys av skärkrafterna kunnat tala om hur processen uppträder vad beträffar segmentbildning och dess geometriska spridning.

Teknik för att kunna processidentifiera ett skärförloppet (dvs tala om vad som händer) kommer att vara en av grunderna för en framgångsrik bearbetningsövervakning.

## 8.2 Användningsområden för utarbetad modell

Man kan urskilja tre huvudsakliga användningsområden för den uppställda modellen, vilka kan beskrivas som:

- 1- Modellen skall kunna ur belastningssynpunkt bidra till bättre val av skärdata dvs undvika skärdata kombinationer som bidrar till svåra belastningssituationer för skäregegen.
- 2- Modellen skall kunna användas som ett hjälpmedel för att utveckla och testa skärverktyg avsedda för bearbetning under ogynnsamma situationer.
- 3- Modellen skall kunna användas för att utveckla och karakterisera ett arbetsmaterial avsett för skärande bearbetning.

## 8.3 Förslag till fortsatt arbete

Vi kommer här nedan att punktvis föreslå delområden eller frågeställningar som bör undersökas eller besvaras, vilka mer eller mindre anknyter till den uppställda modellen.

- 1- Hur pass allmängiltig är den uppställda modellen för olika arbetsmaterial? Vilka arbetsmaterial kan modellen tillämpas på?
- 2- Kan modellen appliceras på adiabatiska deformationsförlopp? Kan adiabatiska deformationer grupperas på ett motsvarande sätt som har gjorts för diskontinuerlig spånbildning i kapitel 5.
- 3- Undersökning av vilka metallografiska och fysikaliska faktorer som styr ett materials störfördelning. Och hur kan detta bidra till en utveckling av arbetsmaterialet?
- 4- Vi har i huvudsak endast behandlat störfördelningar baserade på tangentialkraften hur uppträder de övriga skärkrafternas störfördelningar? Vilka kopplingar finns mellan de olika skärkrafternas störfördelningar?

- 5- Kan den axiella störfördelningen användas vid förslitningsövervakning och i så fall hur då? Hur förändras störfördelningen med textfasförslitningen? Kan den axiella störfördelningen geometriskt återfinnas på spånorna på ett motsvarande sätt som den tangentiella störfördelningen gör?
- 6- Kan störfördelningen på något sätt återfinnas i den bearbetade ytans karaktär, och hur i så fall?
- 7- Vid bestämning av störfördelningen "on line" hur många mätvärden erfordras för att få tillräcklig noggrannhet? Hur fort kann denna beräkning göras? Hur skulle detta kunna användas vid bearbetningsövervakning?



- 8- Modellen bör testas då följande förhållanden råder:
- överkritisk bearbetning
  - med skärmedia vilket medför ett annat friktionsförhållande
  - där man systematiskt ändrar systemets egenfrekvensfördelning
  - bearbetning med flera dominanta egenfrekvenser
- 9- Hur kan modellen användas "on line" för att övervaka spånbrytning? Vid ca. 1200 m/min kommer spånbrytnings frekvensen att sammanfalla med dominanta egenfrekvenser kan modellen användas i dessa sammanhang?
- 10- Vid kritisk bearbetning inträffar det ofta att eggen "släpper" arbetsstycket detta kan vi registrera till viss del som negativa tangentialkrafter (se Fil84 i fig.9a). Hur påverkar detta eggens förslitning? Ökar syretillförslen till eggen, har detta någon betydelse?
- 11- Vilken blir eggens verkliga och ur förslitningssynpunkt effektiva skärhastighet under kritisk bearbetning? Hur ser VT-kurvorna ut för kritisk bearbetning?
- 12- Vilka övriga tekniska tillämpningar är tänkbara?
- Vibrationsövervakning och adaptiv styrning av slipprocessen.
  - Studier av ytkontakter, friktionsmätningar mm.

## 9 REFERENSER

- /1/ Pahlitzsch G. Terminology and procedures for turning resurch, CIRP group C Delft 1961
- /2/ Boothroyd G. Fundamentals of Metal Machining and Machine tools McGraw-Hill Book Company Washington D.C 1975.
- /3/ Banerjee H. Metal cutting with a diskontinuos chip, Machin Tool And Resurch s.405 1965.
- /4/ Eder V.E. Entfernung der Spänelemente von einander und ihre Bildungsfrequenz beim Drehen im Fließanbereich, VDI-Zeitschrift Bd.107 Nr.11 s.489.
- /5/ Ståhl JE. Inledande studier av spontana egghaverier, Inst. för Mekanisk Teknologi Luds Tekniska Högskola 1984 (under utskrift).
- /6/ Ståhl JE. Finita element beräkningar gjorda på skärverktyg, Inst. för Mekanisk Teknologi, Lunds Tekniska Högskola Dec. 1983.
- /7/ Östholm S. Datorbaserat mätsystem för skärkraftmätning, Examensarbete utfört vid inst. för Mekanisk Teknologi LTH, Lund 1984 (under utskrift).
- /8/ Lindahl PE. Industriell elteknik, Studentlitteratur 1978.

### Övriga nära anknyttande arbeten:

- /a/ Landberg P. Vibrations caused by chip formation, CIRP-Annalen 1955 vol.4 s.55-65.
- /b/ Merchant M.E. Mechanics of Formation of the Discontinuous Chip in Metal Cutting, Tans. of the ASME 71(1949) p.421-

- /c/ Brown R.H. On the Mechanics of Chip Segmentation In Machining, Journal of engineering for Industry 103(1981):1 p.33-51
- /d/ Lindberg B. Measurment of the Segmentation Frequency in the Chip Formations Process, Annals of the CIRP Vol.32/1/1983.
- /e/ van Luttervelt The split shearzone-mechanism of chip segmentation, Annals of the CIRP Vol.25/1/1977.
- /f/ Ueda N. An Analysis ot Saw-Toothed Chip Formation, Annals of the CIRP Vol.31/1/1982