

# Kapittel 7

## Bruddseighetsprøving av metaller

Forelesningsnotater i MEK 4520 Bruddmekanikk

Hans A. Bratfos

Lærebok: T.L. Anderson, Fracture Mechanics Fundamentals and Applications, 3rd edition.

## Generelle betraktninger (Kap. 7.1)

### Uttak og behandling av prøver

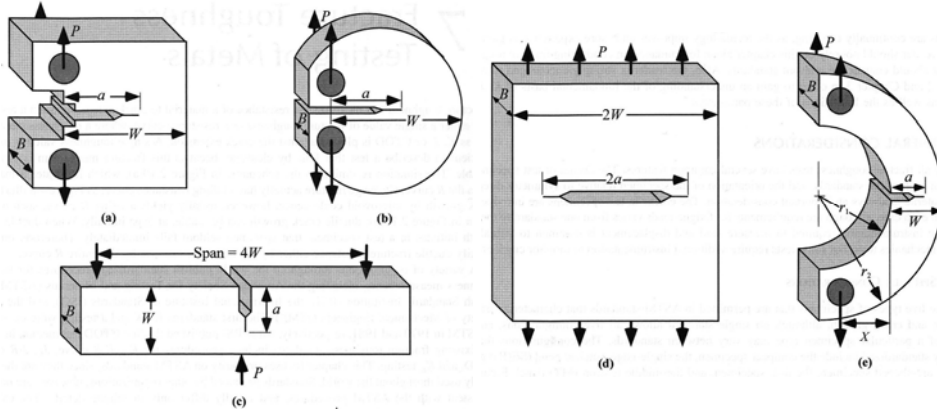
I enhver bruddmekanisk analyse kreves det informasjon om materialets motstand mot brudd. Vi har derfor vært inne på bruddmekanisk prøving allerede, men skal her gå litt mer i detalj.

Bruddmekanisk testing er godt standardisert. De viktigste standardene er:

- ASTM (American Association for Testing and Materials)
- BSI (British Standards Institution)
- ISO (International Institute of Standards)

Typen av prøver

De mest vanlig standardiserte prøvegeometriene er vist under. Av disse er (a) og (c) de desidert mest anvendte.



(a) Compact Tension (CT)

(b) Disk Shaped CT

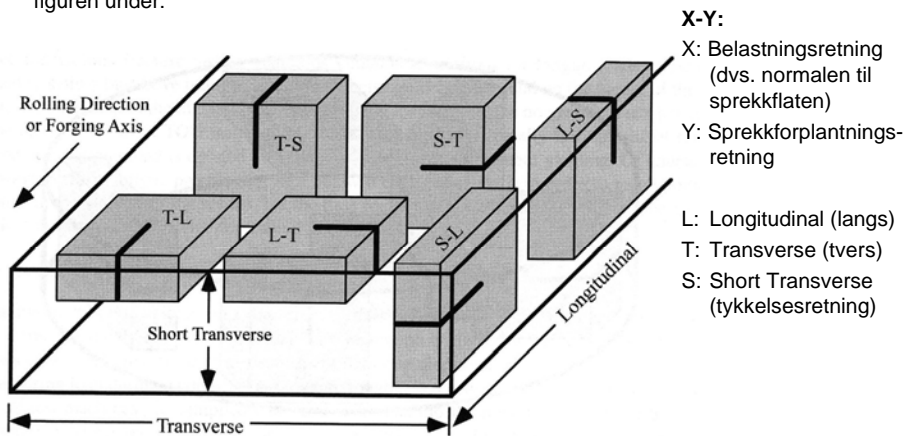
(c) Single-Edge-Notched Bend (SE(B) eller SENB)

(d) Middle Tension (MT)

(e) Arc-shaped

Prøveorientering

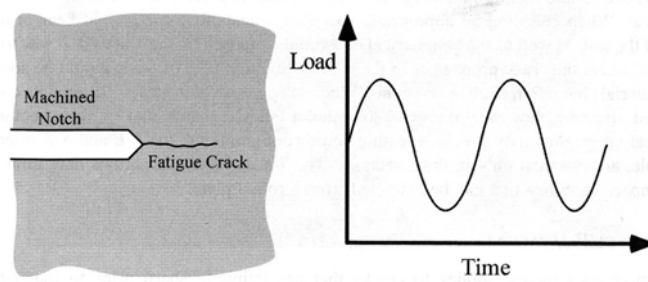
Materialer er vanligvis ikke anisotrope. Spesielt for valsede plater vil man ha tekstur; kornene blir langstrakte i valseretningen. Vi må derfor ta hensyn til orienteringen av prøven. Ideelt vil man la sprekken i prøven vokse i samme plan som man forventer i den virkelige komponenten. For å holde styr på dette har man en felles notasjon som vist i figuren under:



### Precracking

Ideelt skal sprekken i prøven være fullstendig skarp. Sprekkene lages derfor normalt ved hjelp av utmatting.

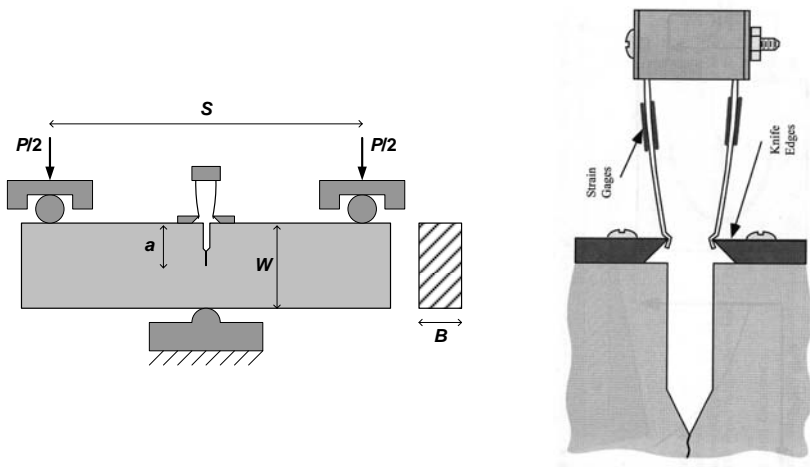
Først maskineres en slisse som er noe kortere enn det sprekken skal bli. Deretter settes prøven i en utmattingsmaskin inntil den ønskede sprekkelengden er nådd.



### Instrumentering

Både ved  $K_{Ic}$ - og CTOD-testing måles lasten mot sprekåpninge, ( $V_g$ ). Dette er også blitt vanlig innen  $J$ -testing. En metode er å feste en *klypemåler* ved sprekens åpning. Den festes til prøven ved hjelp av *kniver* som skrues eller limes fast til prøven.

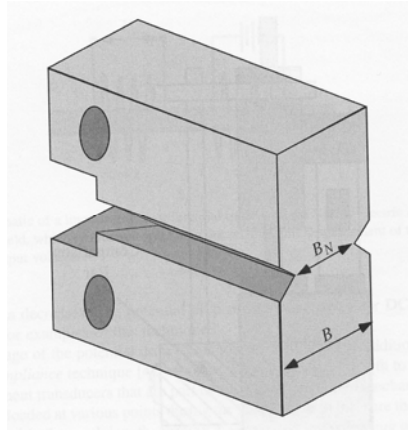
Lasten måles ved hjelp av last-celler som normalt er integrert i prøvemaskinen.



### Sidéfuging (side groove)

Til tider benyttes prøver med side-fuger. Dette har primært sammenheng med at man får plan spenning ved yterflatene. Fugene besørger økt rad av treksialitet (plan tøyning). Dermed blir kravet til prøvestørrelse noe mildere.

Sidéfuger benyttes også for å styre retningen på sprekkforplantningen bedre.



## $K_{Ic}$ -testing (Kap. 7.2)

$K_{Ic}$  er en lineærelastisk parameter, og det tillates derfor kun meget begrenset grad av ikke-lineæritet. Figuren under viser i prinsippet tre forløp av last-forskyvnings-kurver.

Først trekkes 5%-sekanten, altså en kurve med 5% mindre vinkelkoeffisient enn den elastiske kurven. Lasten i skjæringspunktet betegnes  $P_5$ .  $P_Q$  betegner den største lasten som er oppnådd ved eller forut for  $P_5$ . En foreløpig bruddseighet beregnes så som:

$$K_Q = \frac{P_Q}{B\sqrt{W}} f(a/W)$$

hvor  $f(a/W)$  er en geometri-funksjon. Dernest sjekkes om vi har en gyldig verdi ut fra følgende kriterier:

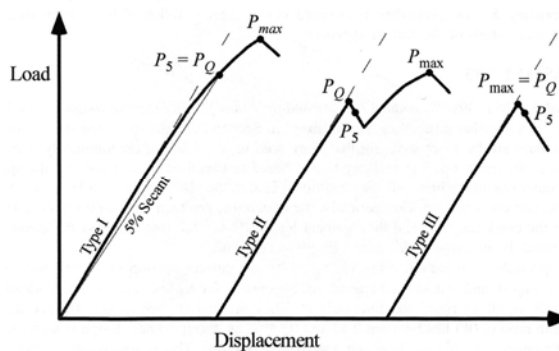
$$0.45 \leq a/W \leq 0.55$$

$$B, a, (W - a) \geq 2.5 \left( \frac{K_Q}{\sigma_{YS}} \right)^2$$

$$P_{\max} \leq 1.10 P_Q$$

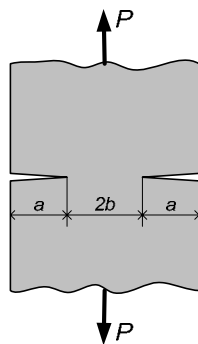
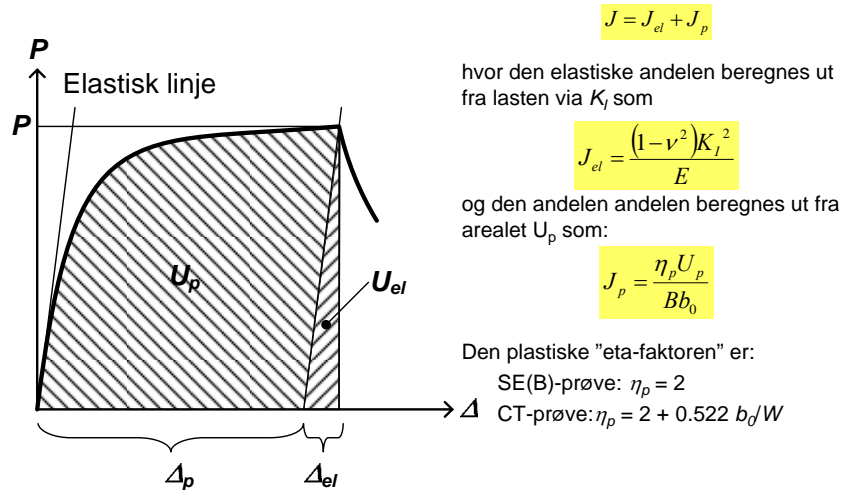
Hvis gyldig:  $K_{Ic} = K_Q$

Hvis ugyldig:  $K_c = K_Q$



## J-testing (Kap. 7.4)

Vi har tidligere vist  $J$  kan beregnes ut fra energien som tilføres prøver; altså arealet under last-forskyvningskurven. Vi deler  $J$  inn i en elastisk og en plastisk komponent:

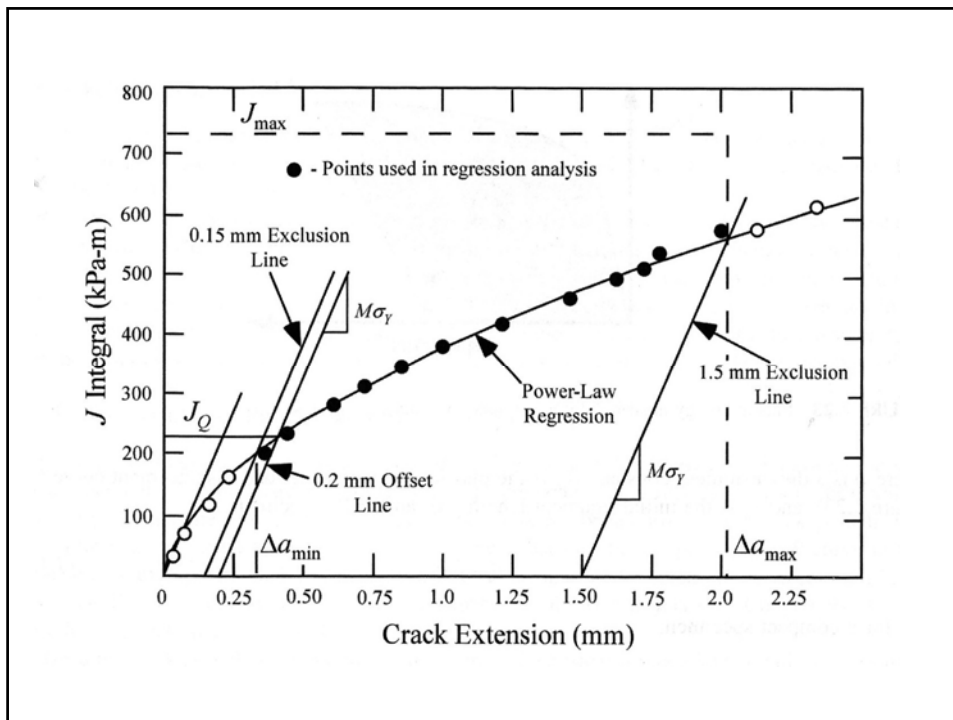


Vi har tidligere sett på eksempelet til venstre for å vise at  $\eta_p = 2$  i det dette tilfellet;

$$J_p = \frac{0.5U_p}{Bb_0}$$

Legg merke til at vi bruker spekkstørrelsen  $a_0$  og netto ligament  $b_0 = W - a_0$  i beregningene av  $K_I$  og  $J$ . M.a.o. korrigerer vi ikke for økende sprekkvekst under pålastningen.

I utgangspunktet er  $J$  definert som en verdi ved begynnende sprekkvekst, altså uavhengig av om sprekkveksten er duktil eller sprø. Det var da nødvendig å lage en prosedyre som gjorde det mulig å finne punktet for begynnende sprekkvekst. ASTM angir en metode hvor man først må fremskaffe en  $J$ - $R$ -kurve. Man kan da interpolere for å finne  $J$  ved  $\Delta a = 0$ .



Først legges inn en horisontal ekskluderingskurve:

$$J_{\max} = \frac{b_0 \sigma_{YS}}{15}$$

Punkter over denne verdien kan man ikke ta med. (For mange moderne materialer lar dette seg ikke gjøre da sprekkvekst starter først etter at  $J_{\max}$  er overskredet.)

Videre skal det tegnes inn den såkalte "blunting line". Denne representerer sprekkvekst pga av avrundingen i sprekkspissen. Hvis vi antar at denne sprekkveksted er gitt som  $\frac{1}{2}$  CTOD-verdien kan vi avlede fra sammenhengen mellom CTOD og  $J$  at:

$$J = 2\sigma_{YS}\Delta a$$

Vi trekker så en nedre og en øvre ekskluderingslinje som er parallell med "blunting line" gjennom  $\Delta a = 0.15$  mm og  $\Delta a = 1.5$  mm på x-aksen. Alle punkter mellom disse tas med i en kurvetilpassning til:

$$J = C_1(\Delta a)^{C_2}$$

Til slutt trekker vi enda en linje som er parallell med "blunting line" gjennom Vi trekker så en nedre og en øvre ekskluderingslinje som er parallell med "blunting line" gjennom  $\Delta a = 0.20$  mm på x-aksen. Krysningpunktet med den tilpassede kurven definerer da  $J_Q$ . M.a.o. er "begynnende sprekkvekst" definert i praksis som punktet hvor man har fått 0.2mm duktil sprekkvekst.

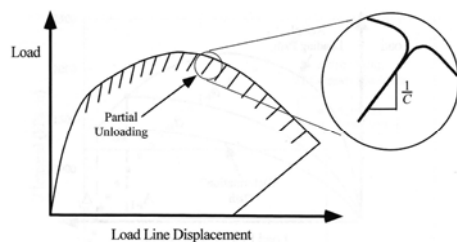
Til slutt har vi et krav til prøvestørrelse tilsvarende som for  $K_I$ :

$$B, b \geq \frac{25J_Q}{\sigma_{YS}}$$

Dette kriteriet er imidlertid ikke så strengt som for  $K_I$ . Her er det ikke utstrekningen av den plastiske sonen som er spørsmålet, men at det finnes en sone foran sprekkspissen hvor  $J$  ikke er gyldig pga. avrundingen av sprekkspissen. Hvis dette kriteriet er oppfylt betegner vi  $J_Q$  som  $J_{Ic}$ . Ellers betegnes den som  $J_c$ .

#### J-R kurver:

J-R kurver for sprekkvekst-analyser fremskaffes i prinsippet på samme måte som beskrevet foran, men det altså den tilpassede J-kurven i seg selv man er ute etter.



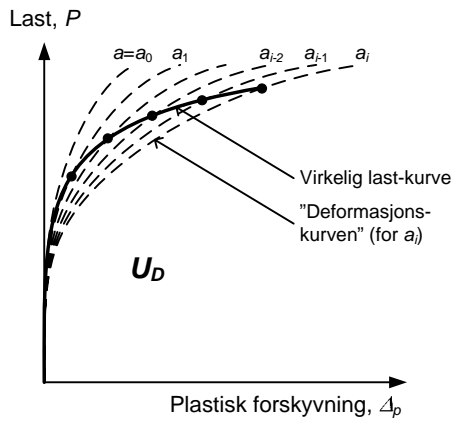
I begge tilfellene er det essensielt å ha en metode for å måle sprekkveksten:

Komplians-metoden: Prøvens komplians  $C$  (invers stivhet) øker med sprekk lengden. Denne sammenhengen er kjent for vanlige prøvegeometrier. Hvis man ved ulike mellomrom avlaster prøven noe vil man få frem den elastisk kurven og man kan måle ut  $C$  og regne ut  $a$  og dermed  $\Delta a = a - a_0$ .

Potensialfall-metoden: Hvis man kobler en elektrode på hver side av sprekk vil veien strømmen må gå rundt sprekkspissen øke med sprekk lengden. Altså øker den elektriske motstanden og potensialfallet. Sammenhengen mellom potensialfallet og sprekk størrelsen må kalibreres særskilt eksperimentelt.

Fler-prøve-metoden: Ved å benytte mange prøver (for eksempel 6 eller mer) vil man kunne avslutte prøvingen for hver av dem ved ulike forskyvninger for å måle  $a$  ved ulike  $J$ . Man kan markere sprekkfronten med farge (blekk eller oppvarming) for så å bryte dem av og måle sprekk lengden fysisk. Dette kan virke dyrt da det medgår flere prøver, men er ofte den enkleste og mest robuste metoden.

For J-R-kurven er det av betydning at sprekken faktisk vokser under prøvingen. For en stasjonær sprekk har vi



$$J = J_{el} + J_p = \frac{K_I^2}{E'} + \frac{\eta_p U_p}{Bb}, \quad U_p = \int_0^{\Delta_p} P d\Delta_p$$

Den virkelige last-kurven, som vi observerer ved testing, følger i begynnelsen kurven for en stasjonær sprekk med  $a = a_0$ . Når sprekken vokser til  $a = a_1$  krysser den kurven for en stasjonær sprekk av lengde  $a_1$ , deretter  $a_2$  osv. Ved beregning av  $U_p$  når  $a=a_i$  skulle vi ha benyttet kurven for en stasjonær sprekk med lengde  $a_i$ , kalt "deformasjonskurven". Arealet under deformasjonskurven betegnes  $U_D$ .

Dette tas høyde for ved at J beregnes inkrementelt for hvert målepunkt for  $a$ . (Proseduren er utledet i Appendix til kapittel 3 i T.L. Anderson.) For hvert målepunkt  $i$  beregnes:

$$J_{pl(i)} = \left[ J_{pl(i)} + \frac{\eta_{p(i-1)}}{Bb_{(i-1)}} \frac{(P_i + P_{i-1})(\Delta_{p(i)} - \Delta_{p(i-1)})}{2} \right] \left( 1 - \gamma_{i-1} \frac{a_i - a_{i-1}}{b_{i-1}} \right)$$

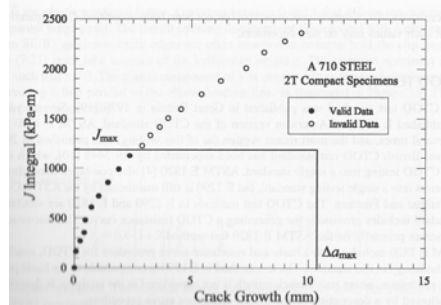
$\gamma_i$  er geometrisk avhengige uttrykk; 1.0 for SE(B) og  $1+0.76(b/W)$  for CT-prøven.

For J-R-kurver har ASTM relaxert kravet til prøvestørrelse:

$$B, b \geq \frac{20J_Q}{\sigma_{YS}}$$

I tillegg gjelder følgende begrensning i sprekkveksten:

$$\Delta a_{\max} \leq 0.25b_0$$

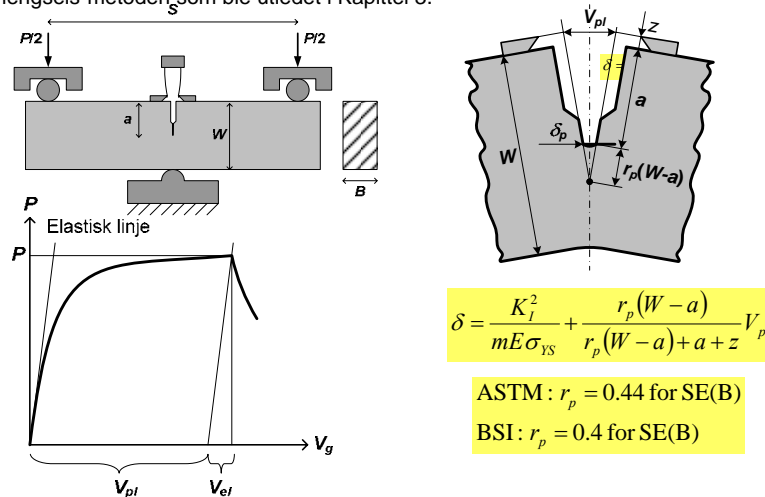


Eksempel på J-R-kurve for A 710 stål (T.L. Anderson Figure 7.27)



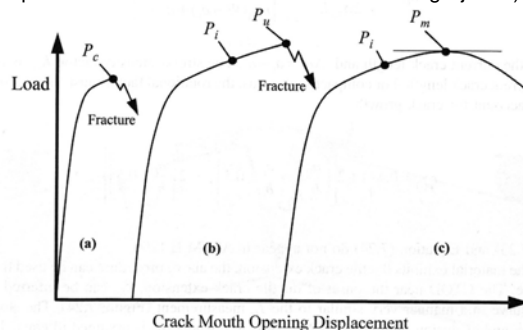
## CTOD-testing (Kap. 7.5)

Den rådende metoden for måling av materialets bruddseighet i form av CTOD er hengsels-metoden, som ble utledet i Kapittel 3.



For CTOD er det innført betegnelser som angir hva slags brudd man har. Som vist på kurven under angis lasten  $P$  samt den tilhørende  $\delta$  med en av følgende index:

- $P_c, \delta_c$ : "Critical" – Sprøbrudd inntreffer før duktil rivning
- $P_i, \delta_i$ : "Initiation" – Initiating av duktil rivning (ikke vanlig å måle for CTOD, men dette er parallelt med  $J_{Ic}$ )
- $P_u, \delta_u$ : "Ultimate" – Sprøbrudd skjer etter noe duktil sprekkvekst, men før en når et maksimum last- platå. (Blandingsbrudd)
- $P_m, \delta_m$ : "Maximum" – Maksimum lastnivå. (Materialet anses da å være fullstendig duktilt. Sprøbrudd som måtte inntreffe etter dette neglisjeres.)



For CTOD er det ingen gyldighetsgrense for prøvens størrelse. Regelen er at prøvens tykkelse skal tilsvare tykkelsen på komponenten som skal analyseres minus noe maskineringsmonn.