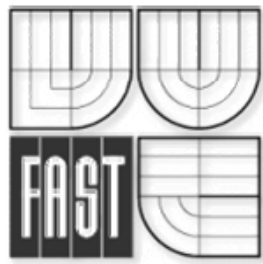


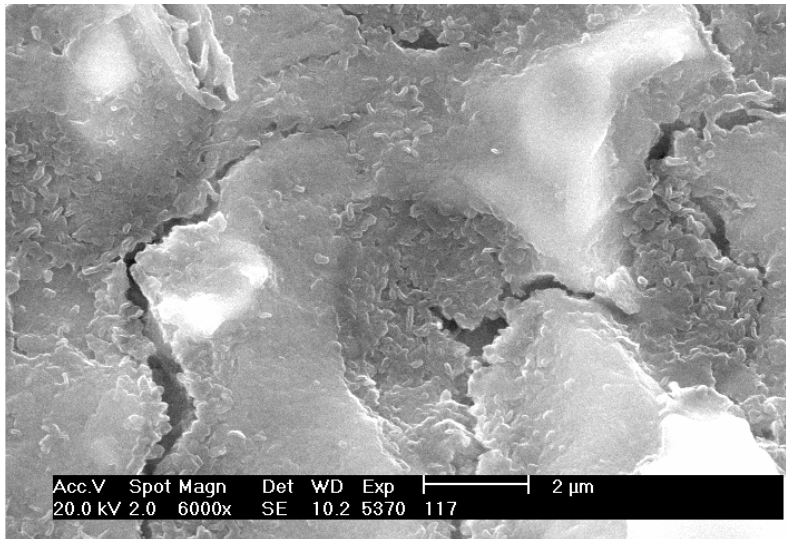
ÚVOD DO PROBLEMATIKY LOMOVÉ MECHANIKY KVAZIKŘEHKÝCH MATERIÁLŮ



Zbyněk Keršner
Ústav stavební mechaniky
FAST VUT v Brně

Motivace: trhliny v betonu

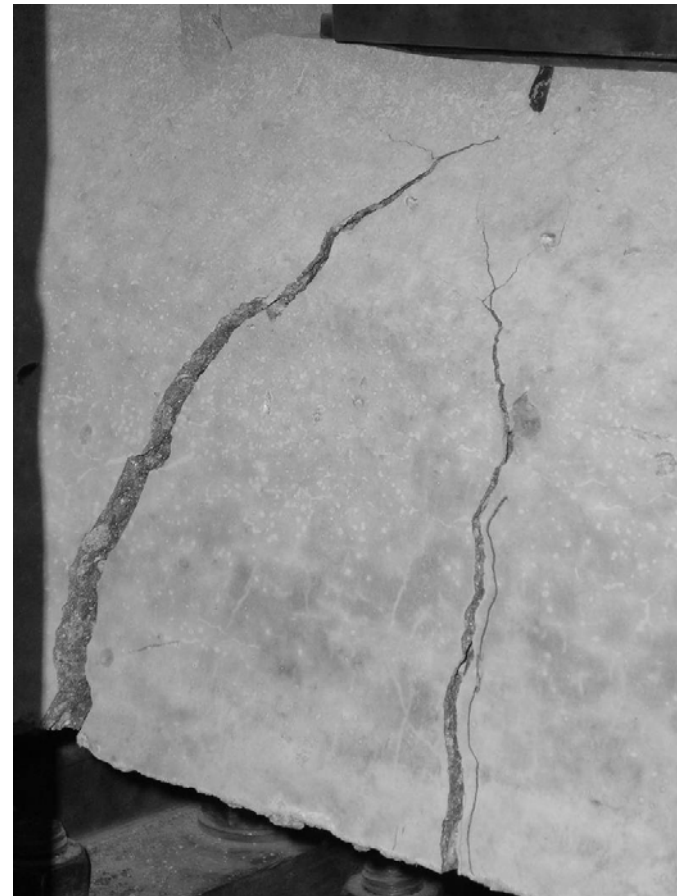
- mikrostruktura



Vyhojování trhlín

- konstrukce

Pražec po kontrolní zkoušce



Lomová mechanika betonu?

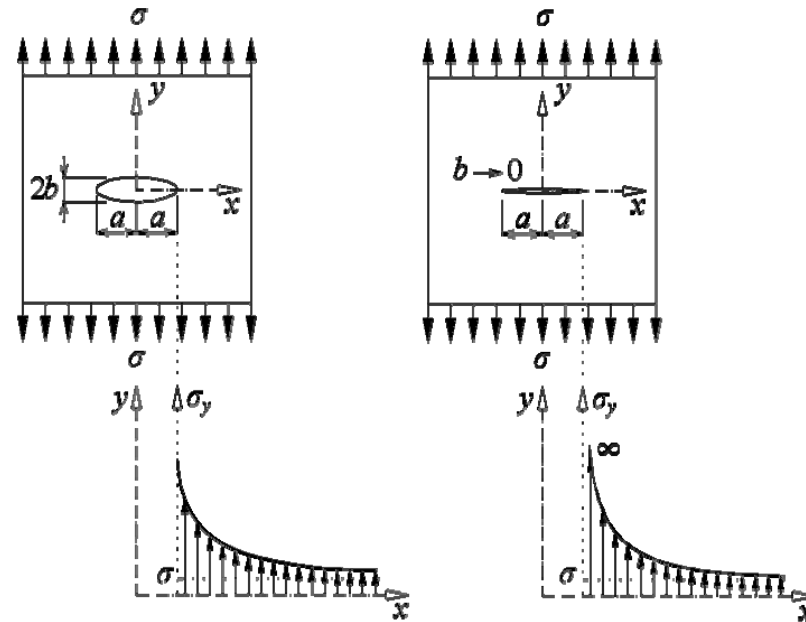
Přístupy lomové mechaniky (LM) v návrhu konstrukcí z prostého i vyztuženého betonu:

- významný ekonomický přínos
- dosažení vyvážených návrhových pravděpodobností poruchy pro betonové konstrukce různých rozměrů, zvýšení jejich spolehlivosti
- použití nového způsobu navrhování i nových druhů betonu, např. s vysokými pevnostmi

Lineární elastická LM

Griffithova teorie křehkého lomu:

- Inglisovo řešení napjatosti v okolí eliptického otvoru v tenké stěně



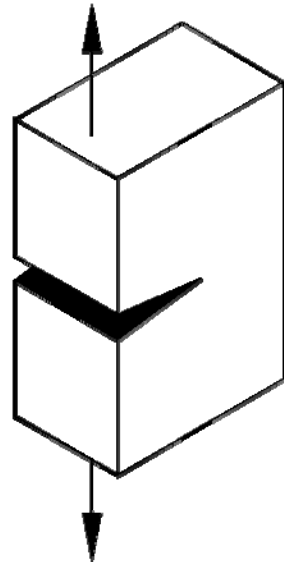
- energetická bilance tělesa s trhlinou

$$\frac{\partial \Pi_c}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} (-W + \Gamma) = 0$$

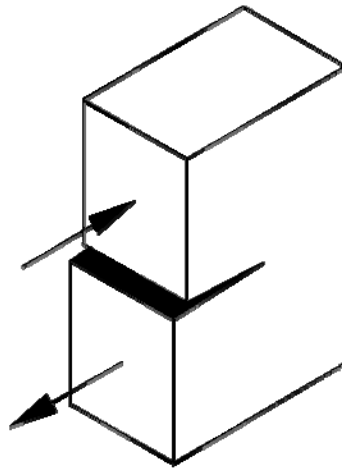
Lineární elastická LM

Irwinova teorie křehkého lomu:

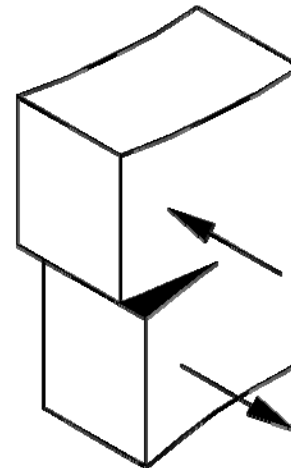
- rozložení napjatosti v tělese s trhlinou do tří módů – tahový, rovinný smykový, tzv. antirovinný smykový



mód I



mód II



mód III

Lineární elastická LM

Irwinova teorie křehkého lomu:

- rozložení napjatosti v tělese s trhlinou do tří módů
- pole napětí v okolí vrcholu trhliny charakterizováno faktorem intenzity napětí K

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a} \quad K_{II} = \tau \sqrt{\pi a} \quad K_{III} = \tau \sqrt{\pi a}$$

kritická hodnota K

$$K_{Ic} = \sqrt{2 E' \gamma} = \sqrt{E' G_c}$$

K_c ... lomová houževnatost

$$K_{Ic} = \sigma_{\max} \sqrt{\pi a}$$

G_c ... houževnatost, krit. hodnota hnací síly trhliny

$$K_{Ic} = \sigma \sqrt{\pi a_{\max}}$$

Lineární elastická LM

Irwinova teorie křehkého lomu:

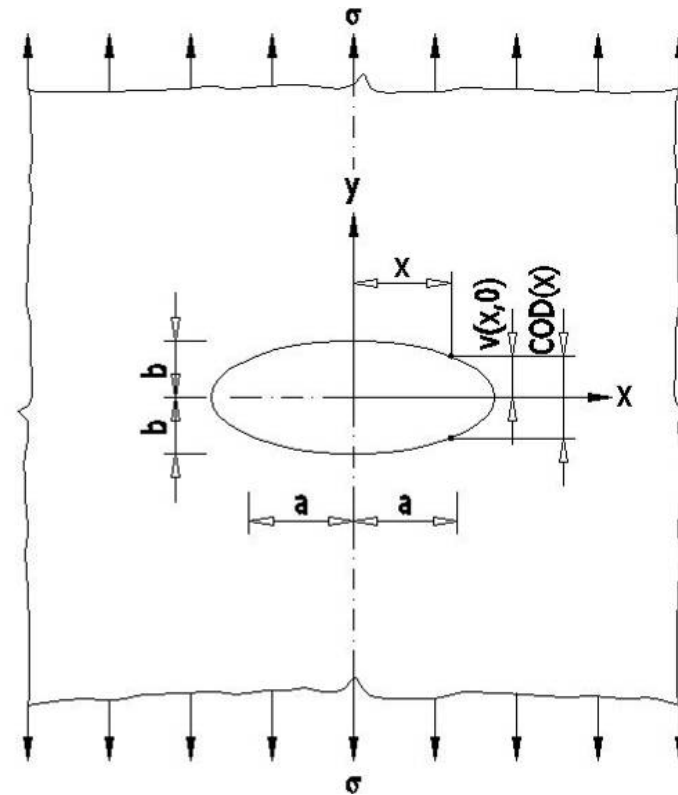
- rozložení napjatosti v tělese s trhlinou do tří módů
- pole napětí v okolí vrcholu trhliny
charakterizováno faktorem intenzity napětí K
kritická hodnota K -faktoru
 K_c ... lomová houževnatost
- kritérium stability $K \leq K_c$

Základní pojmy nelineární LM

- otevření trhliny COD ,
resp. kořene trhliny
 $CTOD$
- kritérium stability

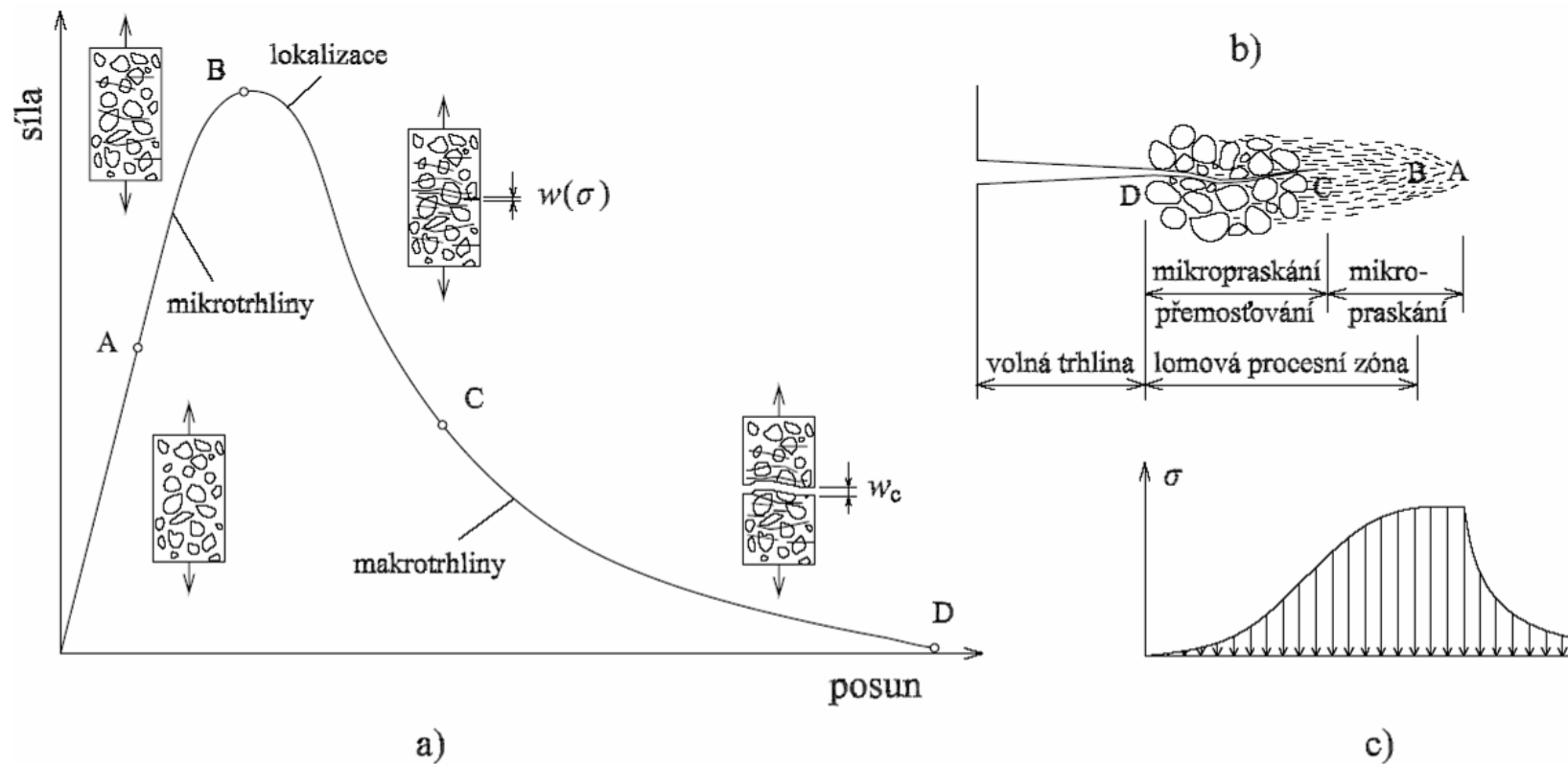
$$CTOD < CTOD_c$$

- J-integrál
- R-křivky



Nelineární lomové modely betonu

- Lomová procesní zóna

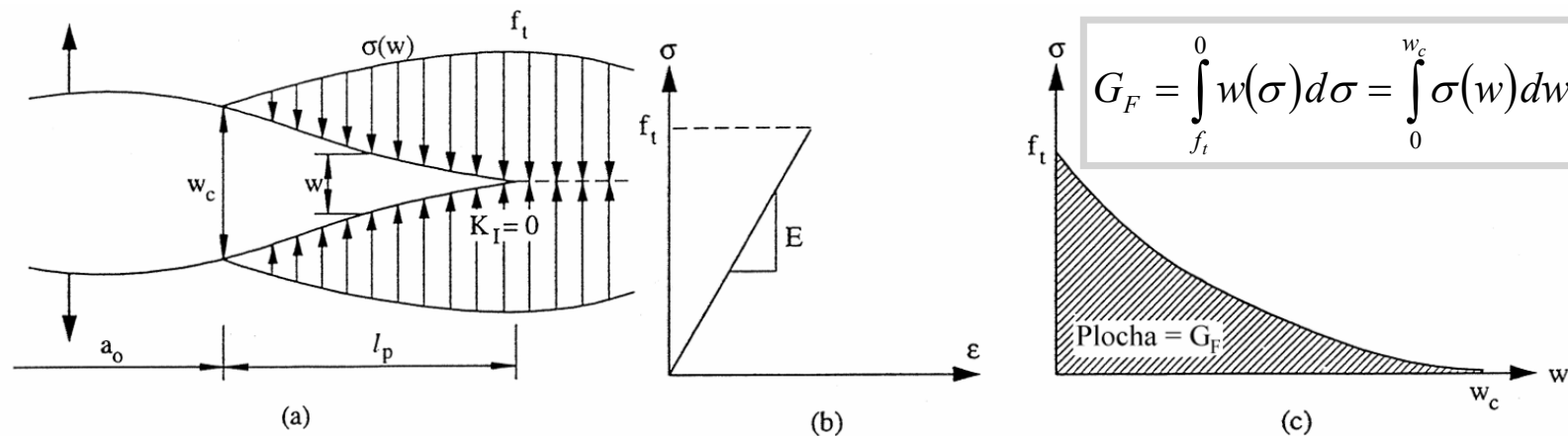


Karihaloo, 1995; Veselý, 2004

Nelineární lomové modely betonu

Model fiktivní trhliny:

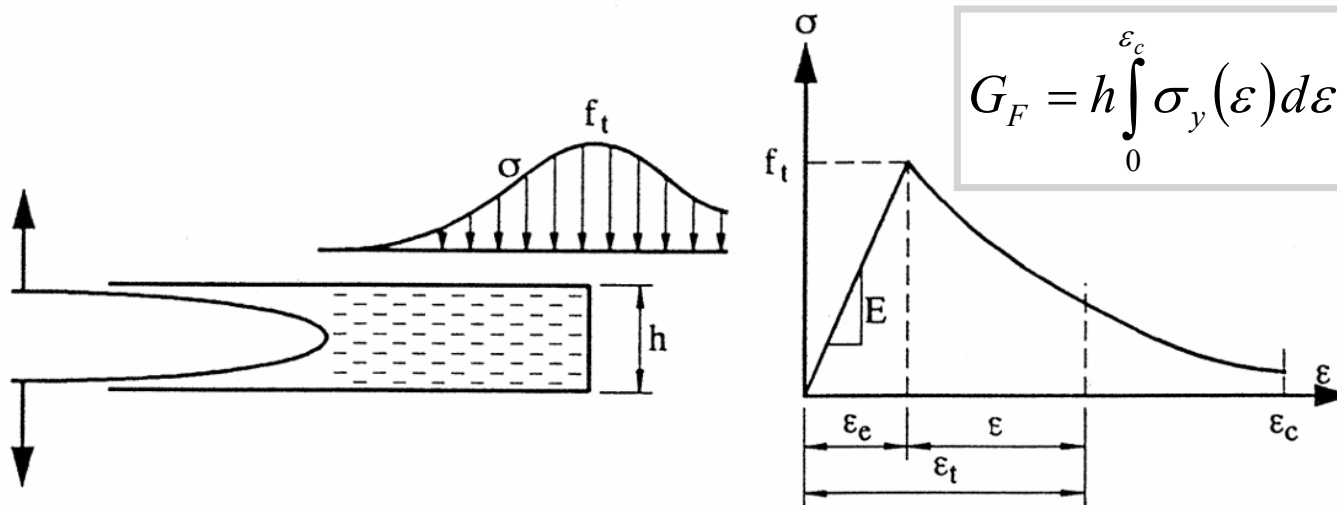
- vztah mezi uzavíracím napětím a otevřením fiktivní trhliny $\sigma(w)$ v zóně změkčování
- plocha pod křivkou tahového změkčení – lomová energie G_F



Nelineární lomové modely betonu

Model pásu trhlin:

- mikrotrhliny lomové procesní zóny jsou koncentrovány před čelem trhliny v pásu o šířce h



Přibližné nelineární lomové modely

Adaptace LELM:

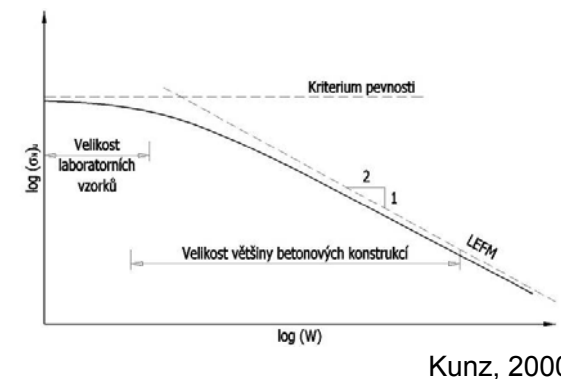
- nelineární chování je bráno do úvahy přibližným způsobem
- reálná konstrukce je nahrazena ekvivalentní pružnou konstrukcí obsahující tzv. efektivní trhlinu

Model o dvou parametrech

Model efektivní trhliny

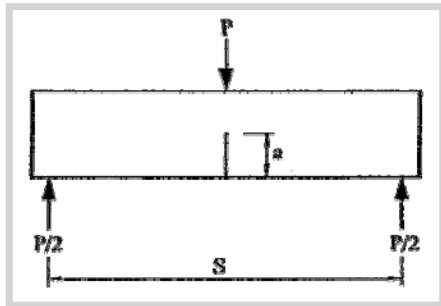
Model rozměrového efektu

Model dvojí K



Model o dvou parametrech Jenq & Shah

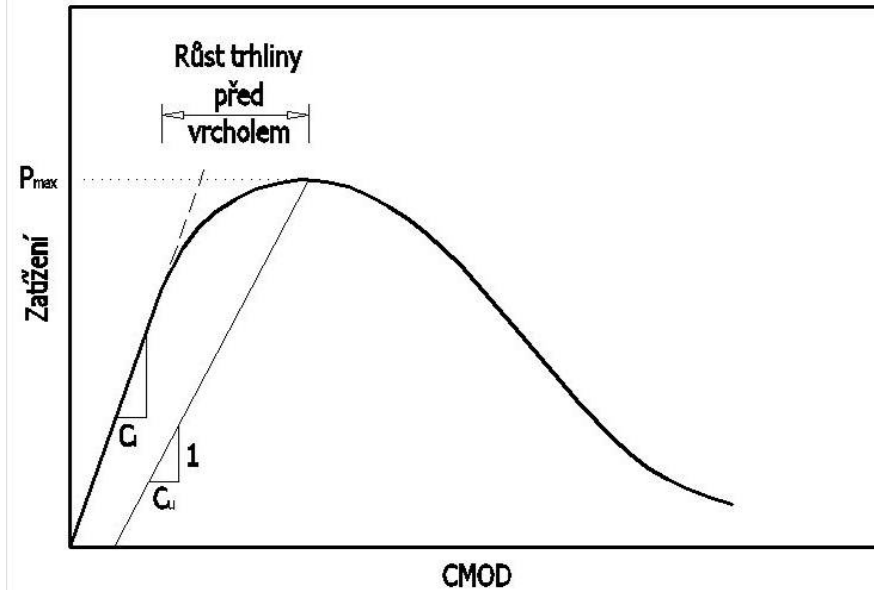
- Konfigurace zkoušky



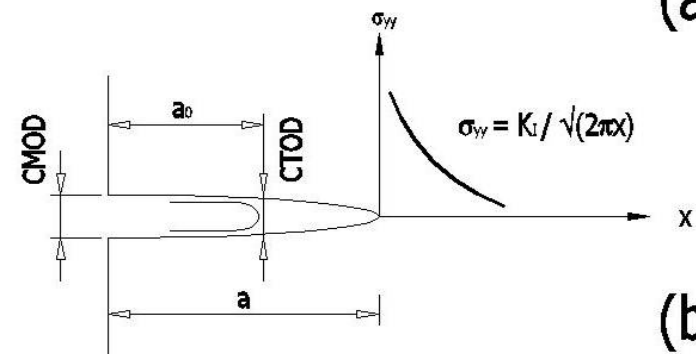
- Lomová kritéria

$$K_I = K_{IC}^S$$

$$CTOD = CTOD_C$$



(a)

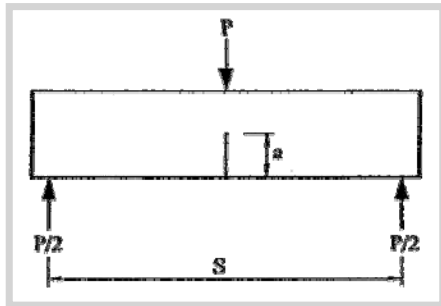


(b)

Model efektivní trhliny

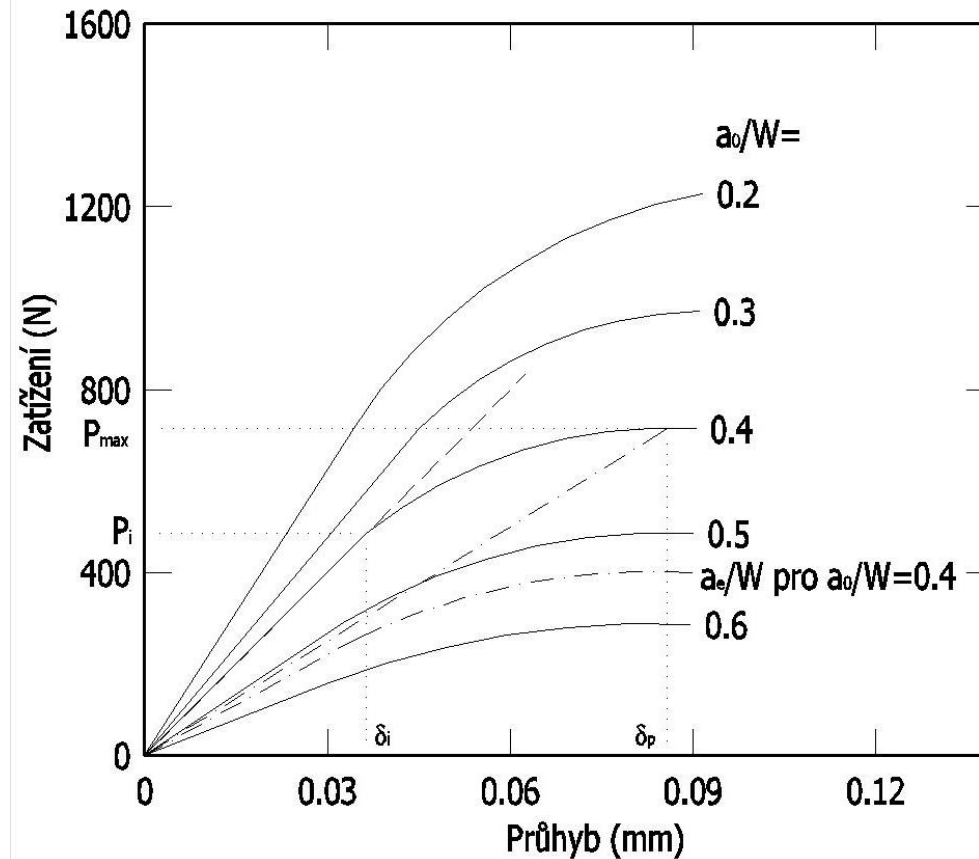
Nallathambi & Karihaloo

- Konfigurace zkoušky



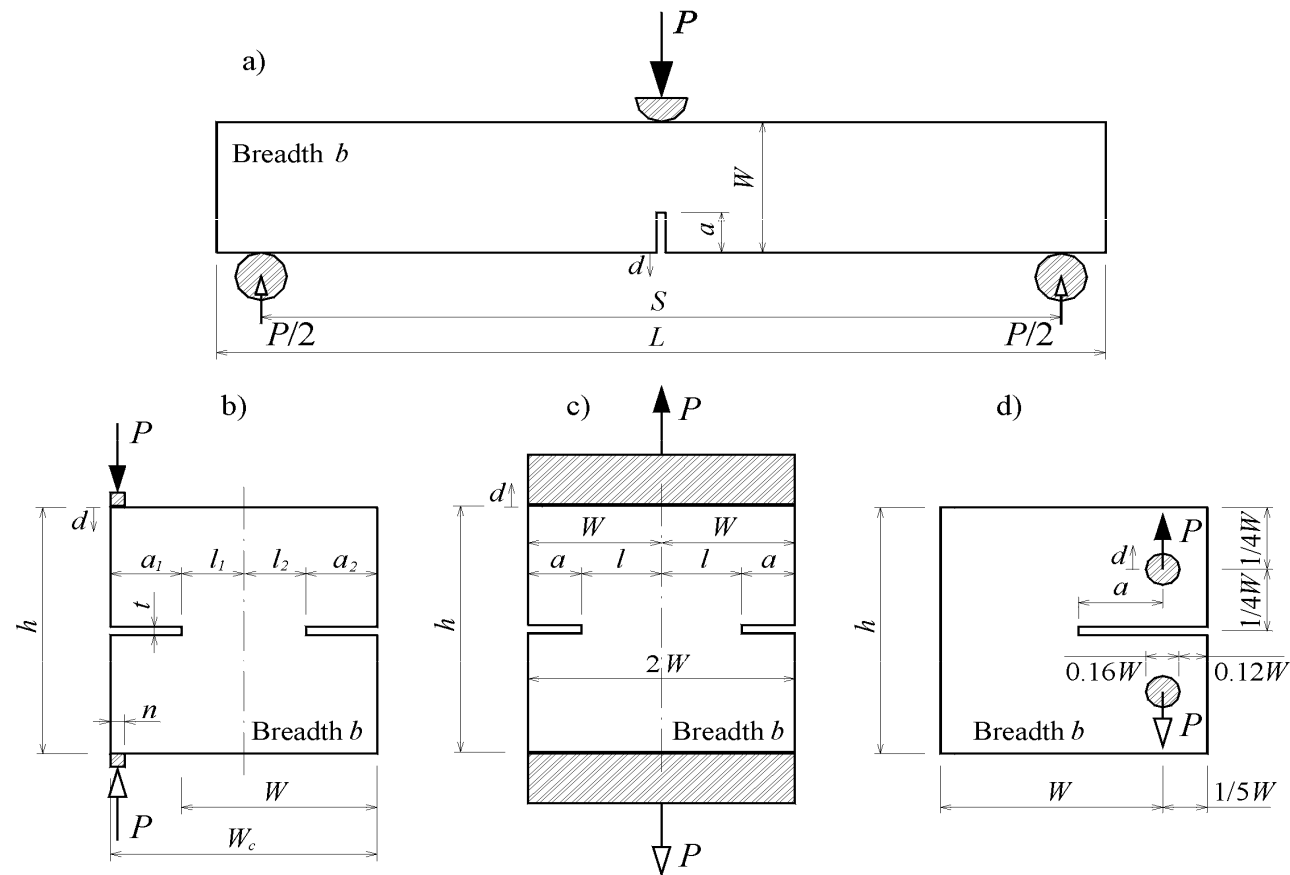
- Kritérium lomu

$$K_I = K_{Ice}$$
$$a_0 = a_e$$



Určení lomových parametrů

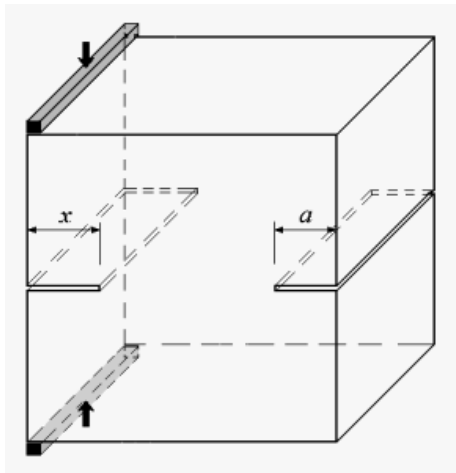
- Zkušební konfigurace používané u betonu



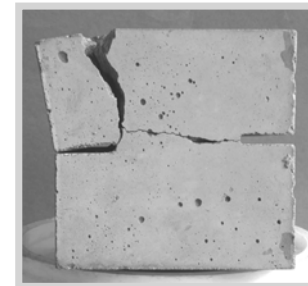
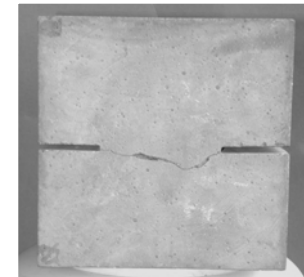
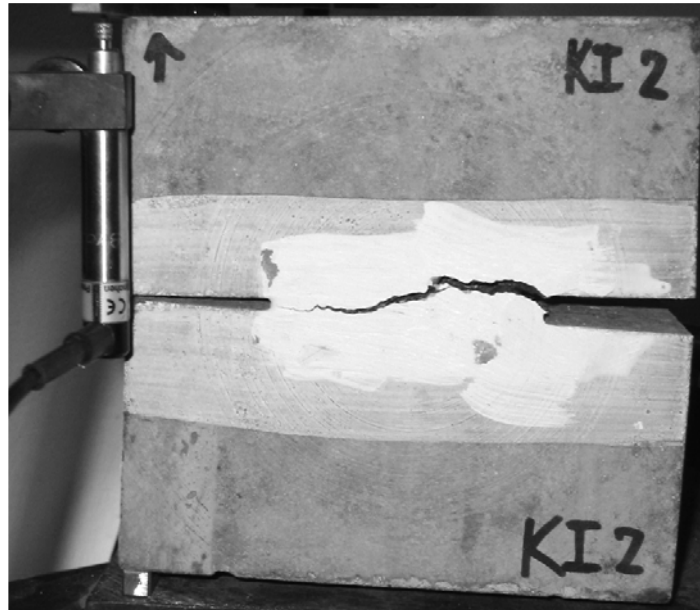
Veselý, 2004

Modelování lomových experimentů

- excentrický tlak krychle se zářezy – mód I
- použitelný poměr délek zářezů

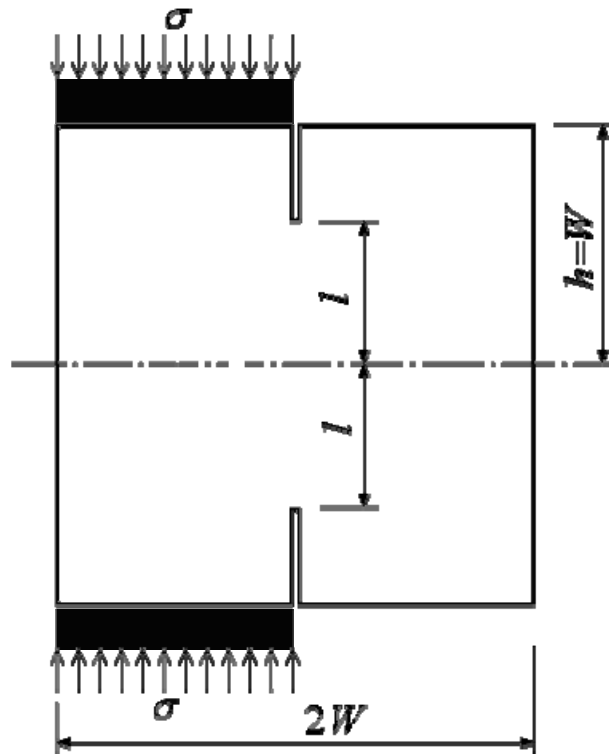


Veselý, 2004



Modelování lomových experimentů

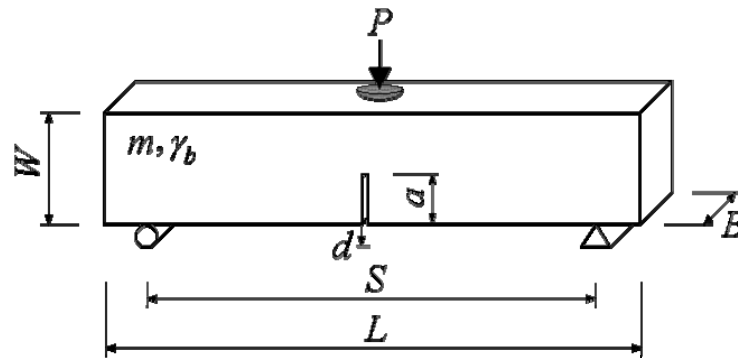
- krychle se dvěma zářezy – mód II
- použitelné délky zářezů



Veselý, 2004

Třibodový ohyb trámů se zářezem

- konfigurace zkoušky

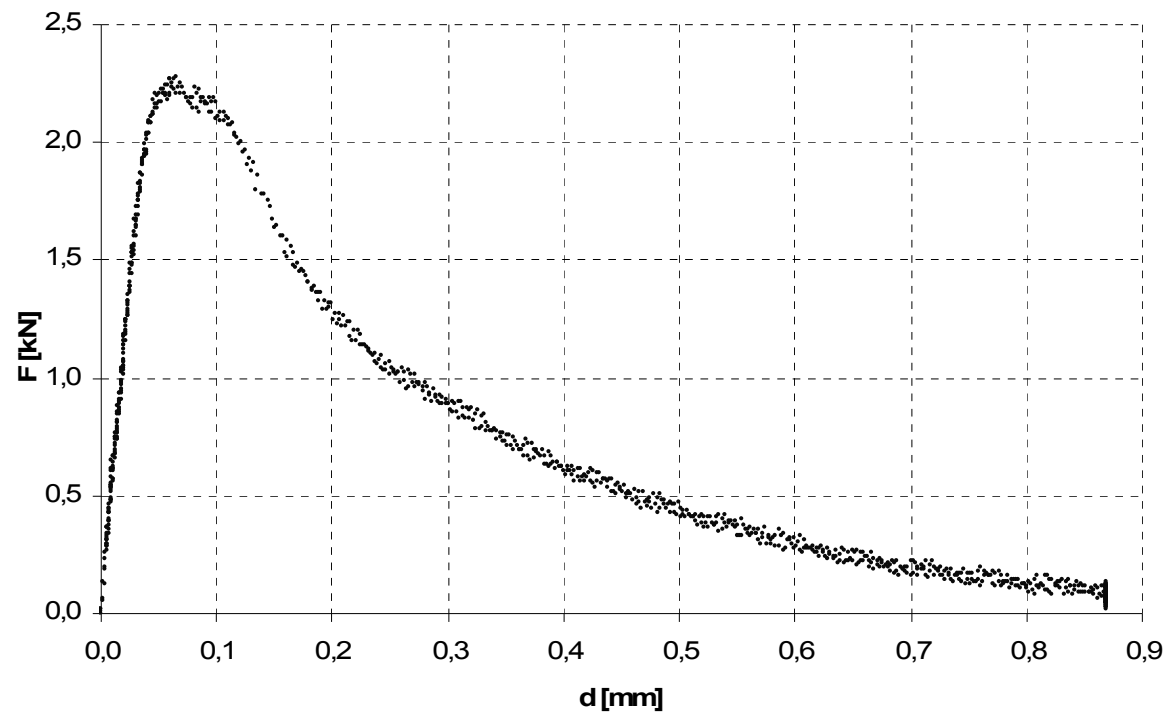


- průhyb uprostřed rozpětí

$$d = \frac{P}{4EB} \left[\frac{S^3}{W^3} + 2\kappa(1+\nu) \frac{S}{W} \right] + \frac{q}{4EB} \left[\frac{5}{8} \frac{S^4}{W^3} + \kappa(1+\nu) \frac{S^2}{W} \right] + \frac{9}{2EB} \left(\frac{S}{W} \right)^2 \left(P + \frac{qS}{2} \right) \int_0^\alpha x Y^2(x) dx ,$$

Zkouška třibodovým ohybem

- výstupem záznam zatížení–průhyb (I - d diagram), typický průběh:



Zkouška tříbodovým ohybem

Lomově-mechanické charakteristiky:

- lomová práce W_F
 - lomová energie G_F
- $$G_F = \frac{W_F}{A_{lig}} \quad [\text{J} \cdot \text{m}^{-2}]$$
- lomová houževnatost K_{Ic}
 - efektivní lomová houževnatost K_{Ice}
 - modul pružnosti E
 - charakteristická délka l_{ch}

Strukturní křehkost betonu

- model fiktivní trhliny:
charakteristická délka l_{ch}
- model o dvou parametrech:
křehkostní číslo Q
- model efektivní trhliny:
efektivní prodloužení trhliny
- model vlivu velikosti:
velikost lomové procesní zóny c_f

$$l_{ch} = \frac{EG_F}{f_t^2}$$

$$Q = \left(\frac{E.CTOD_c}{K_{Ic}^S} \right)^2$$

$$\Delta a = a_e - a_0$$

Strukturní křehkost: srovnání

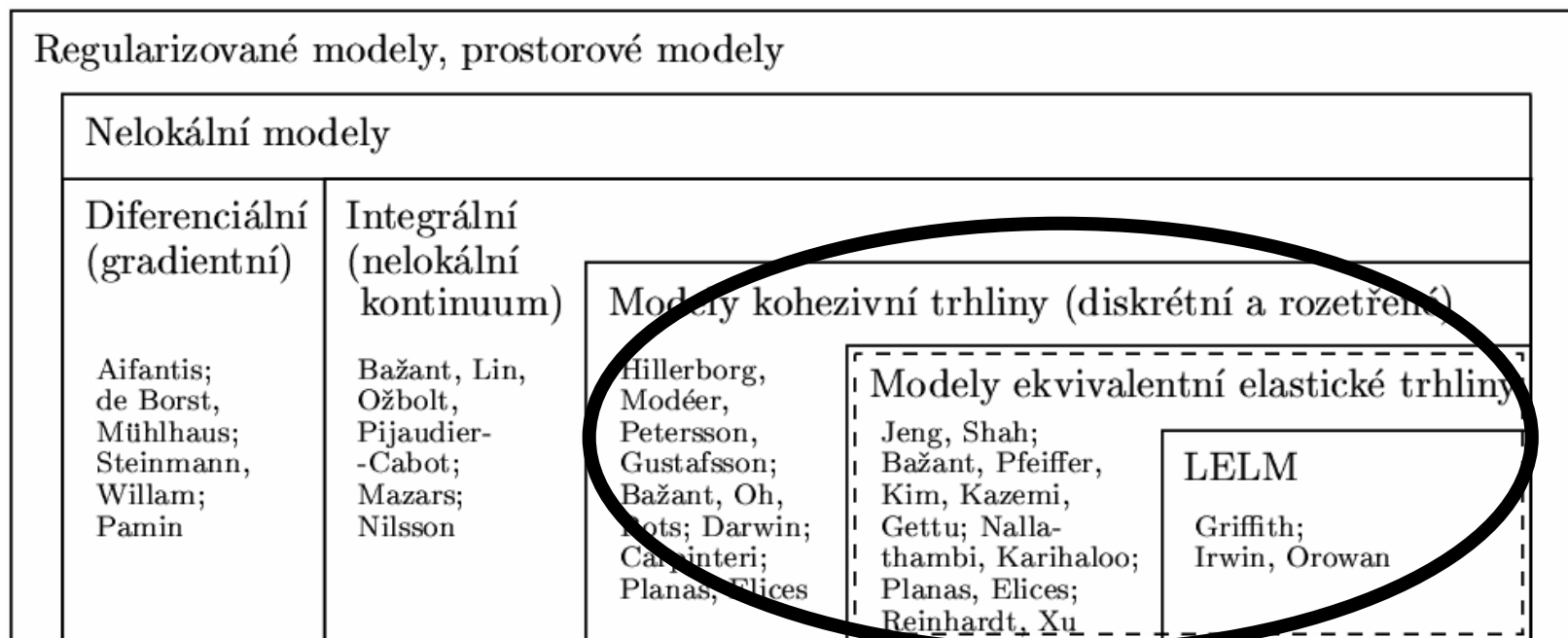
- charakteristická délka l_{ch}

Materiál	l_{ch} [mm]
Zatvrdlá cementová pasta	5–15
Malta	100–200
Běžný beton	150–500
Přehradní beton	700

- křehkostní číslo Q
- velikost lomové procesní zóny c_f

Modely pro popis lomu betonu

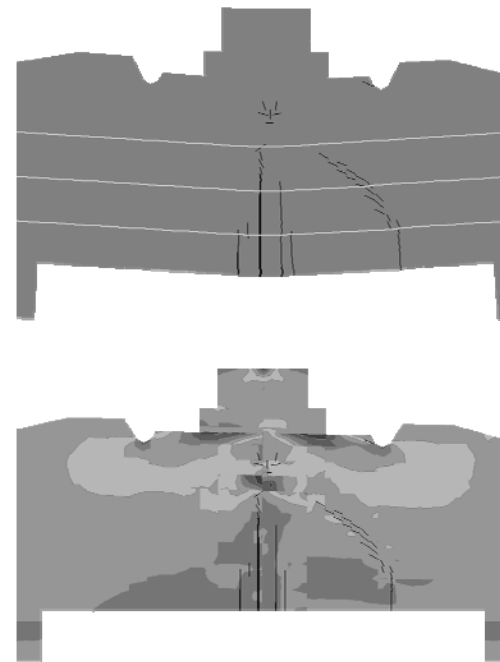
- struktura lomových modelů používaných pro popis porušování kvazikřehkých materiálů



Elices & Planas, 1996; Veselý, 2005

Závěr

- Lomová mechanika kvazikřehkých materiálů: nezbytný nástroj pro vyšetřování a popis chování konstrukcí s trhlinami.



Veselý et al., 2005