

vyvíjeny od:

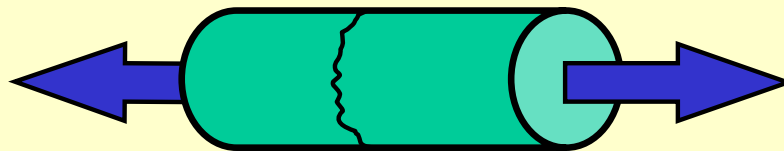
60. let 20. století (kovy)

70. let 20. století (beton)

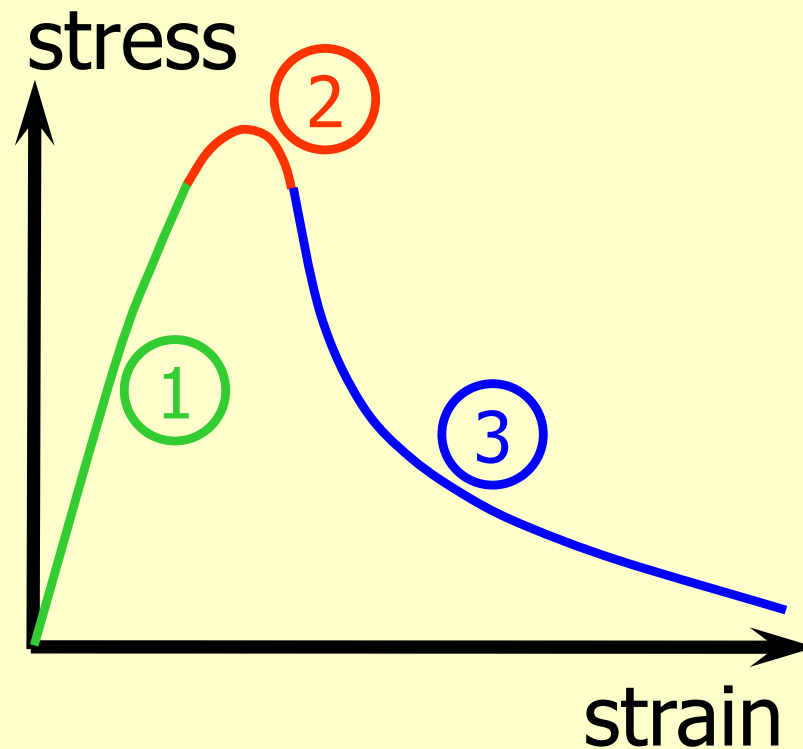
Klasické nelineární modely

- Projevy nelineárního lomového chování kvazikřehkých materiálů

Kvazikřehké materiály se v oblastech koncentrací napětí vyznačují vznikem nezanedbatelně veliké zóny nelineárně působícího materiálu (LPZ – lomová procesní zóna)



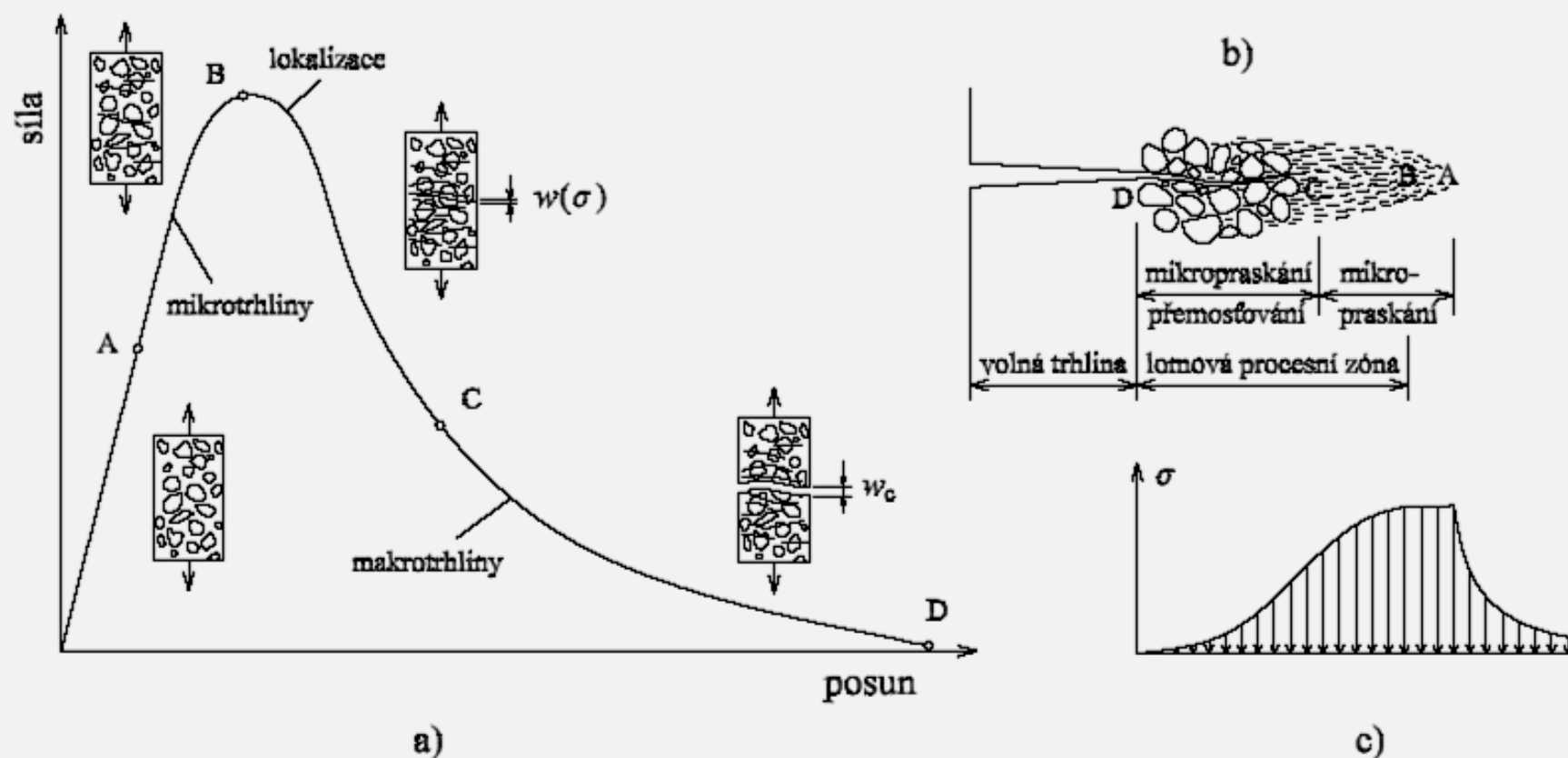
- ① Microcracking
- ② Localization
- ③ Macrocracking



Shah, S. P. (2002) High performance concrete: Strength vs. ductility and durability. In proceedings of conference Non-Traditional Cement and Concrete, Brno, 347-358.

Klasické nelineární modely

- Projevy nelineárního lomového chování kvazikřehkých materiálů – LPZ



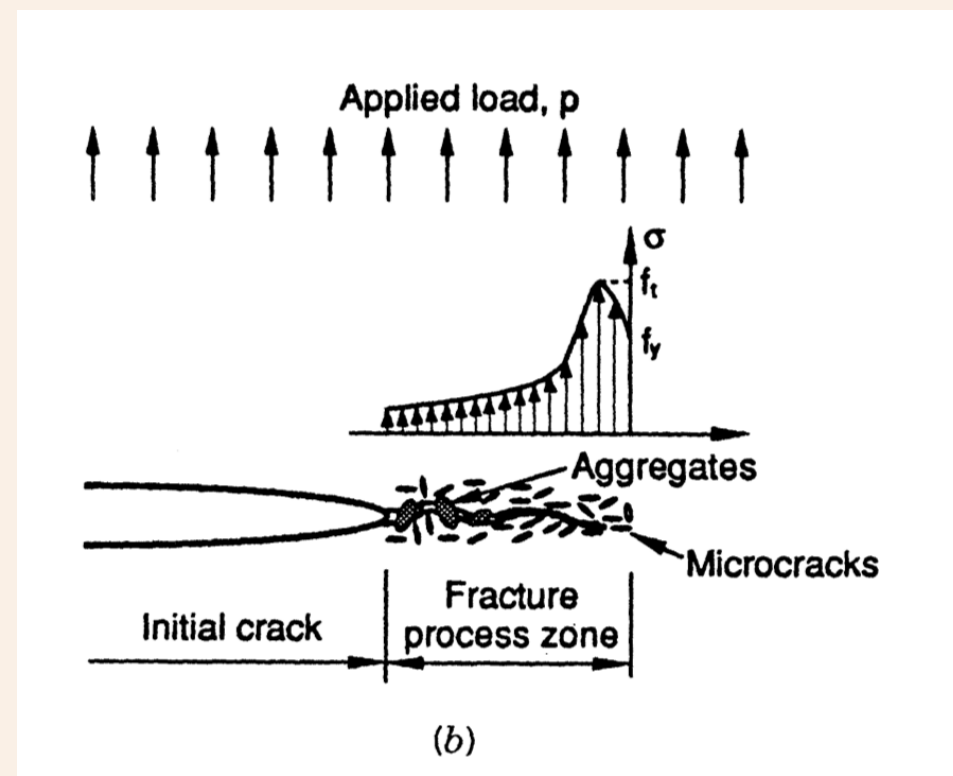
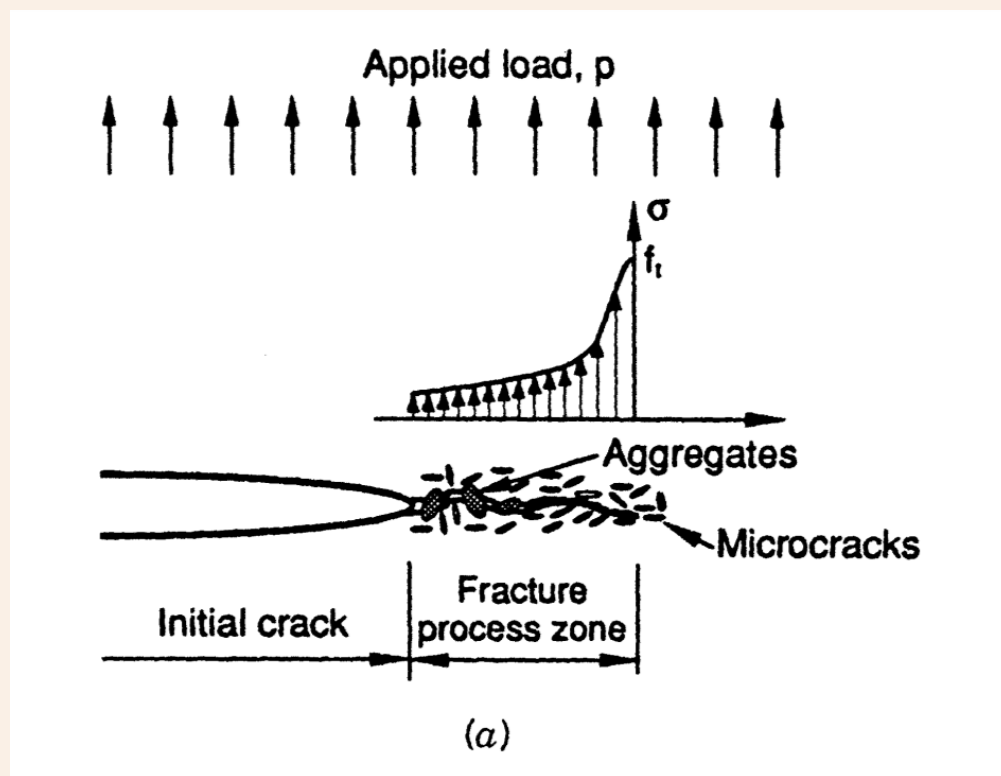
Obrázek 7.2: Formování nelineární zóny v kvazikřehkém materiálu – a) zatěžovací diagram taženého vzorku, b) schematické znázornění pochodů v obou částech neelastické zóny, c) zobrazení rozdělení napětí po délce nelineární zóny

Klasické nelineární modely

- Projevy nelineárního lomového chování kvazikřehkých materiálů – LPZ

LPZ bez uvažování vlivu pole mikrotrhlin před čelem trhliny

LPZ s uvažováním vlivu pole mikrotrhlin před čelem trhliny



Poznámka: za f_t obecně nelze uvažovat pevnost v tahu f'_t zjišťovanou z tahového testu

Klasické nelineární modely

• Příčiny nelineárního lomového chování kvazikřehkých materiálů

V LPZ probíhají mechanismy zhouževnatění materiálu.

Jsou příčinou tzv.

tahového změkčení

- stínění čela trhliny
- ohyb trhliny
- přemostování trhliny zrnky kameniva
- tření líců trhliny
- zaslepení čela trhliny v póru
- rozvětvení trhlín

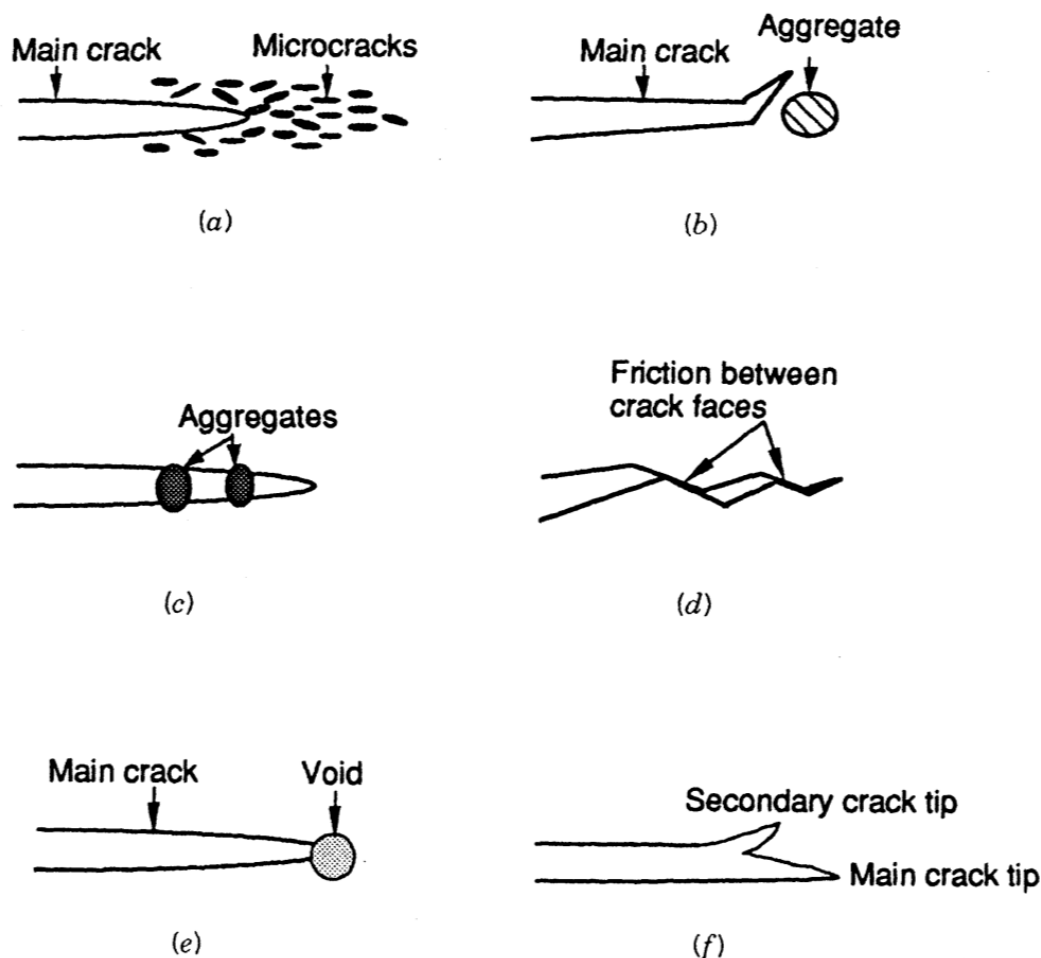


Figure 4-5 Some toughening mechanisms in fracture process zone: (a) crack shielding, (b) crack deflection, (c) aggregate bridging, (d) crack surface roughness-induced closure, (e) crack tip blunted by void, and (f) crack branching.

Klasické nelineární modely

• Modelování projevů nelineárního lomového chování

$$G_q = G_{Ic} + G_\sigma$$

G_q energie uvolňovaná při kvazikřehkém lomu
 G_{Ic} kritická hodnota energie dostupné pro šíření trhliny (lze spočítat pomocí LELM), tj. energie zkonsumovaná při lomu materiálu na vytvoření dvou povrchů, odpovídá povrchové energii materiálu

G_σ práce vykonaná kohezivními silami na lících trhliny vztažená na jednotku lomové plochy, tj. energie nutná k překonání kohezivních sil $\sigma(w)$ při oddělování líců trhliny

$$G_\sigma = \frac{1}{\Delta a} \int_0^{\Delta a} \int_0^w \sigma(w) dx dw = \int_0^{w_t} \sigma(w) dw$$

$$G_q = G_{Ic} + \int_0^{w_t} \sigma(w) dw$$

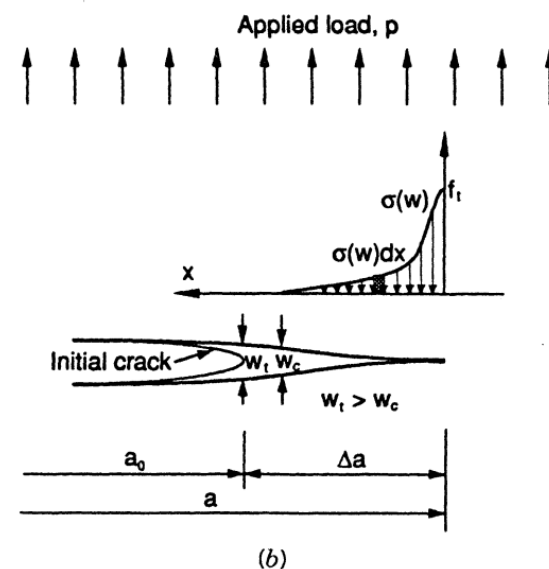
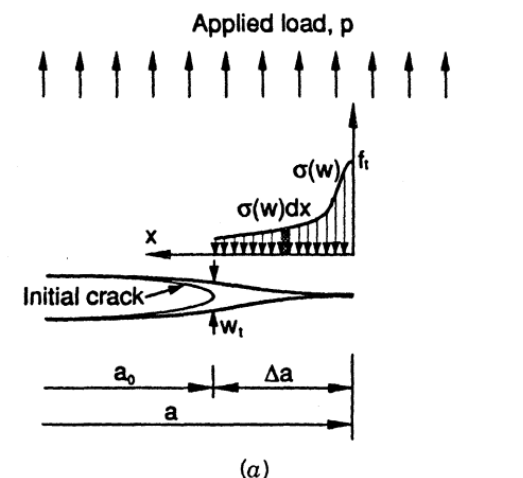


Figure 5-3 Modeling of quasi-brittle crack: (a) a cohesive crack with crack surfaces in contact, and (b) a cohesive crack with partially separated crack surfaces.

Klasické nelineární modely

- Modelování projevů nelineárního lomového chování

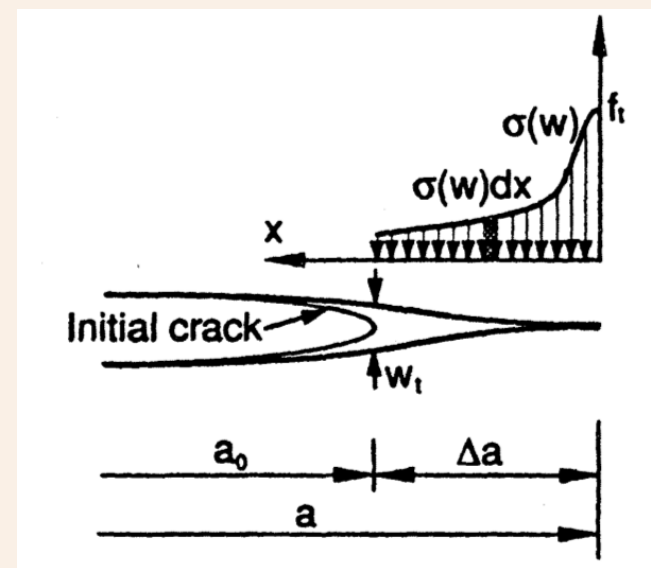
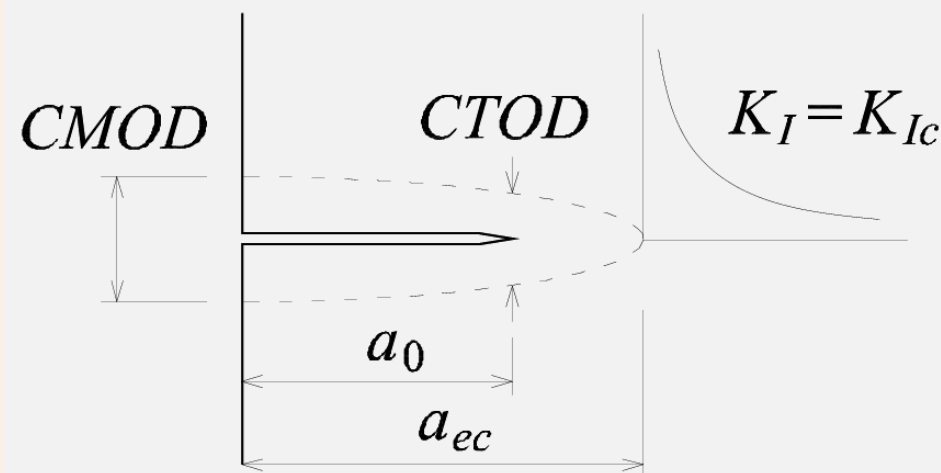
$$G_q = G_{Ic} + G_{\sigma}$$

Griffith-Irwinův mechanismus
disipace energie

Dugdale-Barenblattův mechanismus
disipace energie

modely ekvivalentní elastické trhliny
(modely efektivní trhliny)

modely kohezivní trhliny



Klasické nelineární modely

- **Modely ekvivalentní elastické trhliny**

K šíření trhliny dochází při překročení efektivní lomové houževnatosti (efektivní houževnatosti) (rozdíl oproti LELM)

K popisu porušení je potřeba dvou nezávislých parametrů (rozdíl oproti LELM)

Zůstává zachován výpočetní aparát LELM

- **Model o dvou parametrech**

Two-parameter Model – TPM (Jenq a Shah 1985)

- **Model efektivní trhliny**

Effective Crack Model – ECM (Nallathambi a Karihaloo 1986, Swartz a kol. 1989)

- **Model rozměrového efektu**

Size Effect Model – SEM (Bažant 1984, Bažant a Pfeiffer 1987)

Modely ekvivalentní elastické trhliny umožňují predikci kritického zatížení (kritické délky trhliny), nejsou schopny predikovat pokritické chování

Klasické nelineární modely

• Modely ekvivalentní elastické trhliny – parametry

Model o dvou parametrech

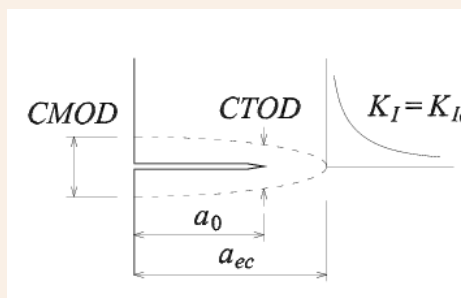
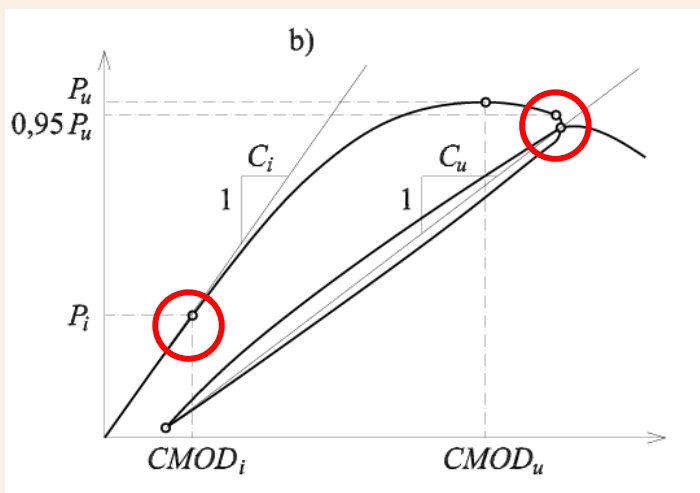
Model efektivní trhliny

PARAMETRY

K_{Ic}^S efektivní lomová houževnatost, tj. lomová houževnatost na špičce efektivní trhliny

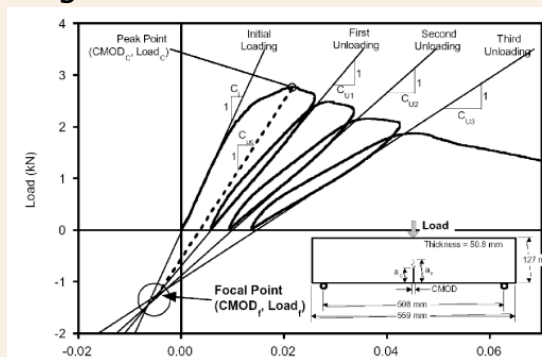
$CTOD_c$ kritické otevření kořene trhliny, tj. otevření kořene trhliny odpovídající maximálnímu zatížení

Určování parametrů ze zatěžovacího diagramu



K_I faktor intenzity napětí
 K_{Ic} lomová houževnatost
 a_0 počáteční délka trhliny
 a_e délka efektivní trhliny
 $CTOD$ otevření kořene trhliny (crack tip opening displacement)
 $CMOD$ otevření líců trhliny (crack mouth opening displacement)

Určování parametrů ze zatěžovacího diagramu – možná varianta



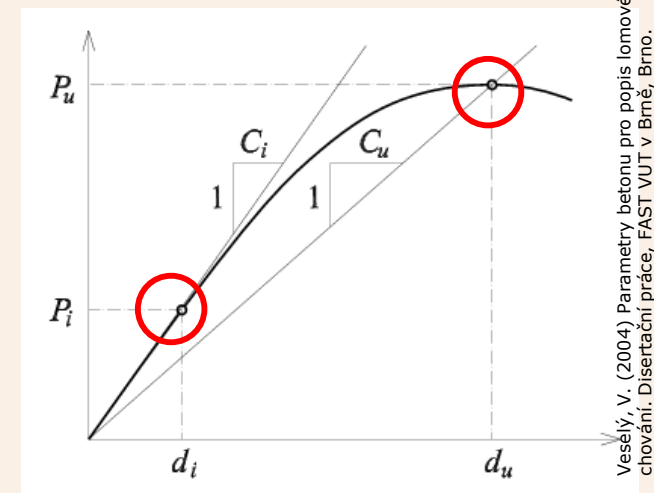
Jansen, D. C., Weiss, J. W., Schleuchardt, S. H. F. Modified Testing procedure for the two parameter fracture model for concrete. Zdroj <http://www.ce.utexas.edu/em2000/papers/DCJansen.pdf>.

PARAMETRY

K_{Ic}^e efektivní lomová houževnatost, tj. lomová houževnatost na špičce efektivní trhliny

a_{ec} kritická délka efektivní trhliny, tj. délka efektivní trhliny odpovídající maximálnímu zatížení

Určování parametrů ze zatěžovacího diagramu



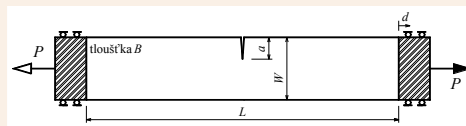
Klasické nelineární modely

• Modely ekvivalentní elastické trhliny – parametry

Model efektivní trhliny –

určování parametrů ze zatěžovacího diagramu na základě **poddajnosti** tělesa s trhlinou

Př.: tažený pás s postranní trhlinou



• Ze vztahu pro průhyb
$$d = d_1 + d_2 = \frac{P}{E'B} \left[\frac{L}{W} + 2 \int_0^\alpha x Y^2(x) dx \right]$$

se vyjádří modul pružnosti E' materiálu. Do vzorce se dosadí dvojice naměřených hodnot z počáteční lineární části zatěžovacího diagramu. Horní mez integrálu α je určena počáteční délkou zářezu a_0 , tedy $\alpha_0 = a_0/W$. Získaná hodnota E' je modulem pružnosti nepoškozeného materiálu.

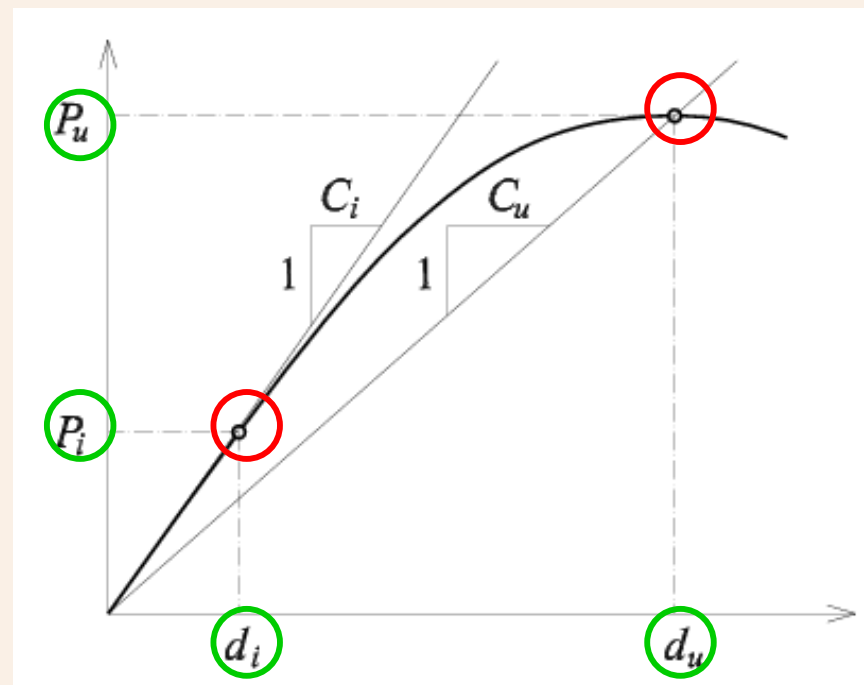
$$E' = \frac{P_i}{d_i B} \left[\frac{L}{W} + 2 \int_0^\alpha x Y^2(x) dx \right]$$

- Do vztahu pro modul pružnosti se následně dosadí souřadnice vrcholu zatěžovací křivky. Iterativně se pak hledá hodnota horní meze integrálu tak, aby se vypočtený modul pružnosti E'_{it} s určenou přesností rovnal modulu pružnosti nepoškozeného materiálu E' . Tato horní mez α_{ec} bude větší než α_0 a bude jí odpovídat délka trhliny a_{ec}

Analogie platí pro model o dvou parametrech

parametry

$$a_{ec}, K_{IC}^e$$



- Efektivní lomová houževnatost se vypočte ze vztahu pro faktor intenzity napětí s odpovídající funkcí geometrie $Y(\alpha)$

$$K_I = \sigma_N \sqrt{a} Y(\alpha)$$

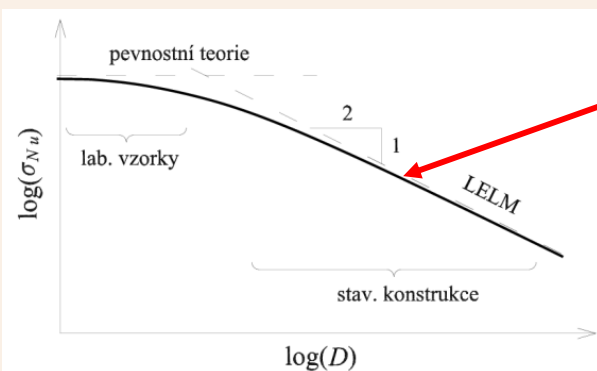
s dosazením hodnoty nominálního napětí σ_N odpovídající maximálnímu zatížení P_u a s dosazením hodnoty kritické délky efektivní trhliny a_{ec} .

Určování délky efektivní trhliny lze provádět i jinými metodami (penetrace kapalin s nízkým povrchovým napětím do otevírajících se trhlin, akustická a elektromagnetické emise, počítačová tomografie, rentgen, ...)

Klasické nelineární modely

• Modely ekvivalentní elastické trhliny – parametry

Model rozměrového efektu – vychází z Bažantova rozměrového zákona



$$\sigma_{Nu} = \frac{K_{Ic}}{\sqrt{D k^2 \left(\alpha_0 + \frac{c_f}{D} \right)}} = \sqrt{\frac{E' G_f}{g'(\alpha_0) c_f + g(\alpha_0) D}}$$

K_{Ic}	lomová houževnatost
G_f	lomová energie
c_f	efektivní délka lomové procesní zóny
D	velikost konstrukce, obvykle W
$k(\alpha), g(\alpha)$	funkce vztahující se ke geometrii tělesa (jednoznačný vztah s $Y(\alpha)$)

- dva parametry: G_f a c_f (resp. K_{Ic} a c_f kde $K_{Ic} = (G_f E)^{1/2}$)
- považovány nezávislé na velikosti konstrukce, asymptotické (definovány pro nekonečně velké těleso)

Lomová energie G_f a efektivní délka lomové procesní zóny c_f jsou hnací síla trhliny a vzdálenost kořene počáteční trhliny a kořene ekvivalentní elastické trhliny pro nekonečně velké těleso jakéhokoliv tvaru.

Určování parametrů pomocí metody rozměrového efektu

Tato metoda stanovuje lomové parametry na základě výsledků ze sady zkoušek na geometricky podobných zkušebních tělesech různých rozměrů se zářezy. Jedná se o kalibraci rozměrového zákona (viz výše). Z maximálního dosaženého zatížení se počítá nominální pevnost σ_{Nu} a vynáší se do grafu jako funkce velikosti vzorku D . Lomové parametry G_f (resp. K_{Ic}) a c_f se pak získají z aproximace zobrazených bodů metodou nejmenších čtverců.

Existuje několik dalších metod pro určování G_f a c_f - např. i z testů na tělesech bez zářezů

Parametry G_f a c_f jsou významnými charakteristikami materiálu také v rámci konceptu rezistenčních křivek

Klasické nelineární modely

• Koncept rezistenčních křivek

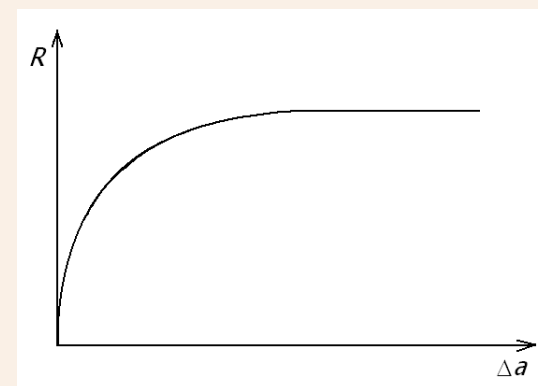
R-křivky založené na ekvivalentní elastické trhlině

Koncept R -křivek je zobecněním modelů ekvivalentní elastické trhliny. Zachovává výpočetní aparát LELM a doplňuje ho o předpoklady, které dovolují provádět celkovou konstrukční analýzu (popisují celý proces šíření trhliny – před dosažením maxima zatížení i po něm). Místo jediné hodnoty materiálového parametru pro posouzení stability trhliny ($G = R$, ekvivalentně $K_I = K_{IC}$) používá koncept rezistenčních křivek pravidlo vztahující hodnotu lomového parametru (R nebo ekvivalentně K_{IC}) k délce elastické ekvivalentní trhliny a_e , popř. velikosti jejího přírůstku $\Delta a_e = a_e - a_0$.

Definice R -křivky –

Pod pojmem R -křivka (ekvivalentně K_R -křivka) se rozumí vyjádření odporu proti šíření trhliny R (ekvivalentně lomové houževnatosti K_{IC}) jako funkce prodloužení elastické ekvivalentní trhliny Δa :

$$\mathcal{R} = R(\Delta a), \quad \text{resp. ekvivalentně} \quad K_{IC} = K_R(\Delta a)$$



Odpor proti šíření trhliny R lze pak pro libovolné prodloužení trhliny Δa vyjádřit jako:

$$\mathcal{R} = G_f R \left(\frac{\Delta a}{c_f} \right)$$

kde hodnoty parametrů G_f a c_f a tvar bezrozměrné funkce $R(\Delta a/c_f)$ jsou předpokládány jako materiálové parametry

(obecně to neplatí, R -křivka je závislá kromě materiálu také na velikosti a geometrii tělesa)

Klasické nelineární modely

Koncept rezistenčních křivek

Konstrukční analýza z R-křivek

R-křivka popisuje celý průběh šíření trhliny, je z ní možno vytvořit zatěžovací diagram konstrukce s trhlinou. Při předpokladu rovnosti $G = R$ v libovolném okamžiku lomového procesu lze $P-d$ diagram získat jako transformaci $R-\Delta a$ křivky za použití vztahů LELM:

$$\mathcal{G}(P, a) = \mathcal{R}(\Delta a) \quad a \quad d = C(a)P \quad \alpha(a) \text{ poddajnost konstrukce}$$

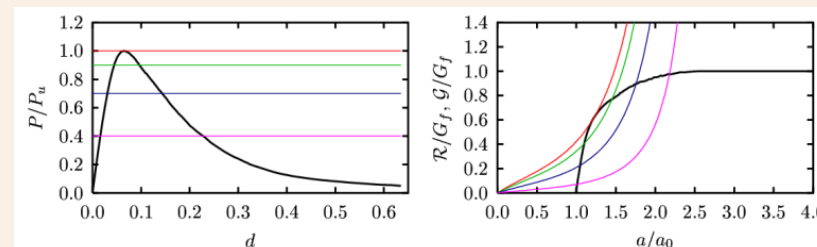
Pro libovolný bod R-křivky $[\Delta a_j, R_j]$ se z první rovnice určí odpovídající síla P_j a ze druhé se dopočte posun d_j

Určení bodu na R-křivce, který odpovídá bod vrcholu zatěžovací křivky odděluje část zpevnění a změkčení (vzestupné a sestupné větvi):

Z předpokladu platnosti kritéria $G = R$ pro kterýkoliv okamžik kvazistatického šíření trhliny je zřejmé, že jde o bod dotyku $R-\Delta a$ křivky a $G-a$ křivky pro maximální zatížení P_u .

Je to bod vyhovující soustavě rovnic

$$\mathcal{G}(P, a) = \mathcal{R}(\Delta a) \quad a \quad \frac{\partial \mathcal{G}(P, a)}{\partial a} = R'(\Delta a)$$



Obrázek 7.12: $P-d$ diagram a odpovídající $\mathcal{R}-\Delta a$ křivka. Barevně jsou vyznačeny průběhy hnačí síly \mathcal{G} po délce trhliny pro 40, 70, 90 a 100 procent maximálního zatížení

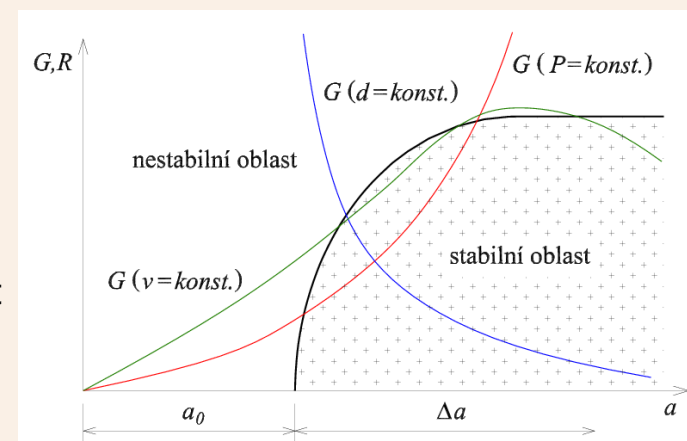
Stabilitní analýza z R-křivek

R-křivka je hranicí rozděluje prostor $G-a$ na stabilní a nestabilní region:

$G < R$: oblast pod R-křivkou – stabilní, trhlina se nešíří

$G > R$: oblast nad R-křivkou – nestabilní, dochází k šíření trhliny

$G = R$: body R-křivky – vyjadřují rovnovážný stav, přičemž rovnováha může být stabilní či nestabilní, a to v závislosti na režimu zatěžování. Přejde-li konstrukce při virtuálním přírůstku trhliny z bodu na R-křivce do stabilní oblasti, je tento bod R-křivky bodem stabilní rovnováhy a naopak.



Klasické nelineární modely

Koncept rezistenčních křivek

Určování R -křivek

Dvě skupiny metod:

- stanovení sad hodnot $[\Delta a, G]$ pro jednotlivé body $[d, P]$ zatěžovacího diagramu v různých stádiích kvazistatického růstu trhliny, pro který platí $G = R$. Prodloužení elastické ekvivalentní trhliny Δa se určuje:

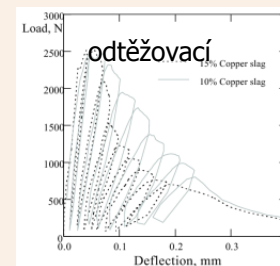
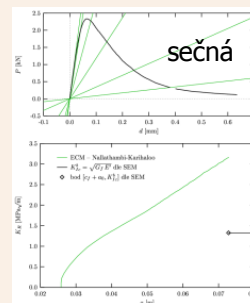
- přímým měřením** (různé techniky: opticky, akustická emise, ...)
- z poddajnosti** (sečná – viz ECM, odtěžovací – viz TPM)

- stanovení bodů rezistenční křivky na základě rovnic

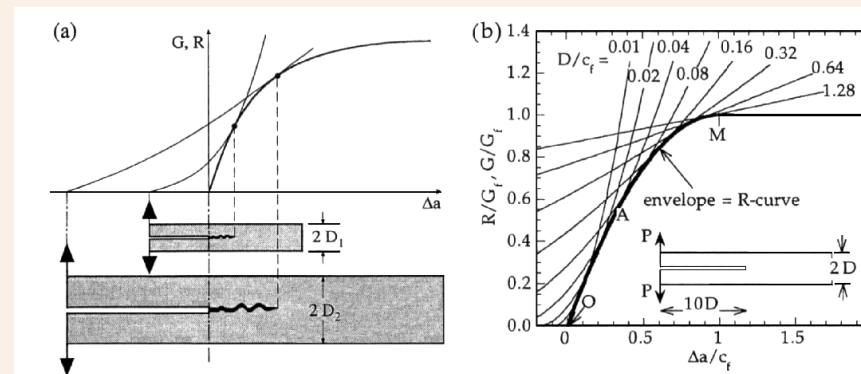
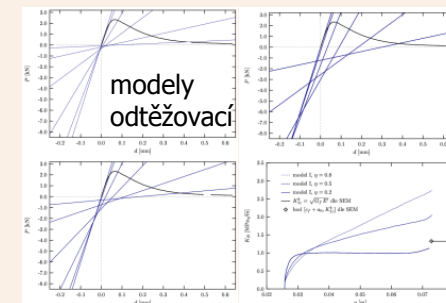
$$G(P, a) = R(\Delta a) \quad \text{a} \quad \frac{\partial G(P, a)}{\partial a} = R'(\Delta a)$$

R -křivkou je množina tečných bodů odpovídajících průběhů $G(a)$ a $R(\Delta a)$. K získání těchto bodů se používají tyto metody:

- stanovení R -křivky ze size effectu** (Pro sadu geometricky podobných zkušebních těles různých velikostí se provedou testy na maximální zatížení P_{ur} . Pro jednotlivé velikosti těles se vynesou křivky $G(P_{ur}, a)$, z nichž každá se musí dotýkat $R(\Delta a)$ křivky, avšak v jiném bodě. R -křivka tak vznikne jako obálka průběhů hnací síly trhliny pro všechny velikosti konstrukce – viz obr.)
- stanovení R -křivky ze shape effectu** (Využívají se tělesa stejné velikosti, avšak s různými délkami zářezů)



Mobasher, B., Devaguptapu, R., Arino A. M. (1996) Effect of copper slag on the hydration of blended cementitious mixtures. Proceedings of ASCE, Materials Engineering Conference, Materials for the New Millennium, ed. K. Chong, 1677-1686



Obrázek 7.22: R -křivka jako obálka průběhů G při maximálním zatížení pro různé velikosti konstrukce. Obrázek je převzat z BAŽANT A PLANAS 1998 [9]

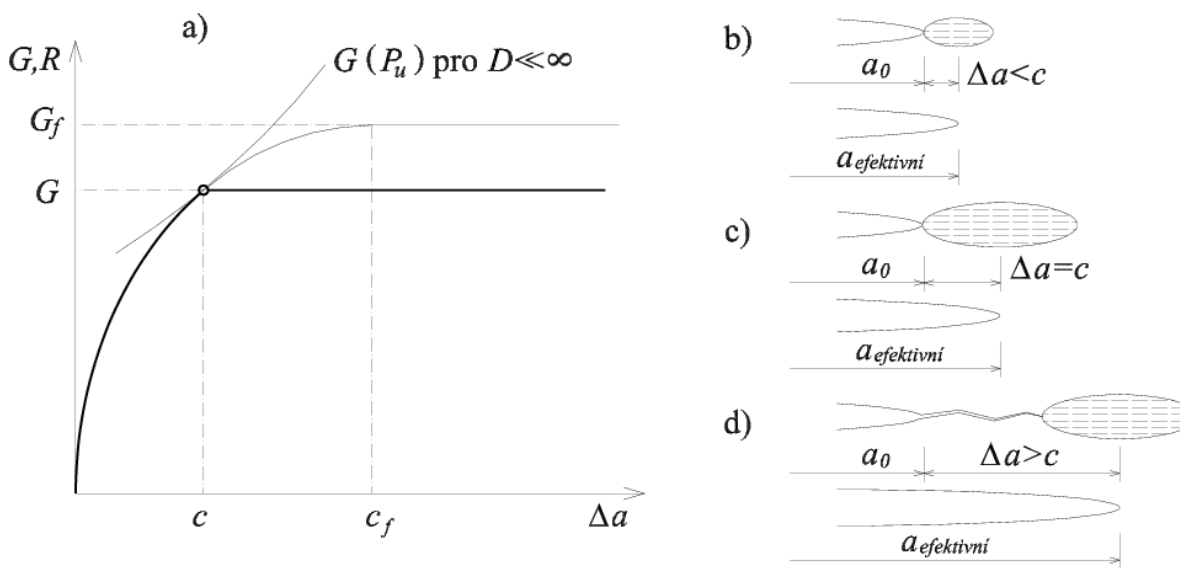
Klasické nelineární modely

• Koncept rezistenčních křivek

Popis šíření trhliny pomocí R -křivek z rozměrového zákona

Tvar vzestupné části zatěžovacího diagramu určeného z R -křivky z rozměrového zákona pro těleso o velikosti D odpovídá až po maximální zatížení realitě. Značné odchylky však byly pozorovány na sestupných větvích, zejména pro malá tělesa. Nepřesnosti se kumulují v oblasti pokritického chování (jejich rozsah klesá s rostoucí velikostí D). R -křivka ze size effectu popisuje chování nekonečně velkého tělesa (parametry G_f a c_f).

Pro těleso konečné velikosti D je R -křivka sledována jen do bodu, který odpovídá maximálnímu zatížení (dotkový bod průběhů R a G_u o souřadnicích $c < c_f$ a $G < G_f$). Za tímto bodem je průběh R -křivky nepředpovězen (předpokládá se konstantní – viz obr. Předpokládá se následující příčina tohoto jevu: v tělese konečné velikosti se po dosažení maxima zatížení lomová procesní zóna nemůže dále zvětšovat v důsledku poklesu zatížení. Místo toho se oddělí od špičky počáteční trhliny a bez změny velikosti se posouvá tělesem, přičemž za sebou nechává makroskopickou trhlinu, mezi jejímiž líci se nepřenáší napětí).



Obrázek 7.23: Popis šíření trhliny v tělese konečných rozměrů podle konceptu rezistenčních křivek. Vlevo: a) R -křivka z rozměru efektu je pro těleso o velikosti D platná po bod odpovídající vrcholu zatížení. Od tohoto bodu je odpor proti šíření trhliny R považován za konstantu. Vpravo: Schematický vývoj růstu lomové procesní zóny za čelem skutečné trhliny délky a_0 se znázorněním uvažované ekvivalentní elastické trhliny; b) stádium před dosažením maxima zatížení (růst LPZ), c) dosažení kritického zatížení a d) pokritické stádium (posouvání LPZ bez jejího růstu). Převzato a upraveno z BAŽANT A PLANAS 1998 [9]

Klasické nelineární modely

- **Modely kohezivní trhliny**

Ke vzniku trhliny dochází při překročení tahové pevnosti (rozdíl oproti LELM)

K popisu porušení je potřeba více než dvou nezávislých parametrů (rozdíl oproti LELM)

- **Model fiktivní trhliny**

Fictitious Crack Model – FCM (Hillerborg a kol. 1976)

- diskontinuita (trhlina) s kohezivní zónou
- mimo trhlinu kontinuum

- **Model pásu trhlin**

Crack Band Model – CBM (Bažant a Oh 1983)

- kontinuum všude
- rozetřené (rozmazané) trhliny (smeared cracks)

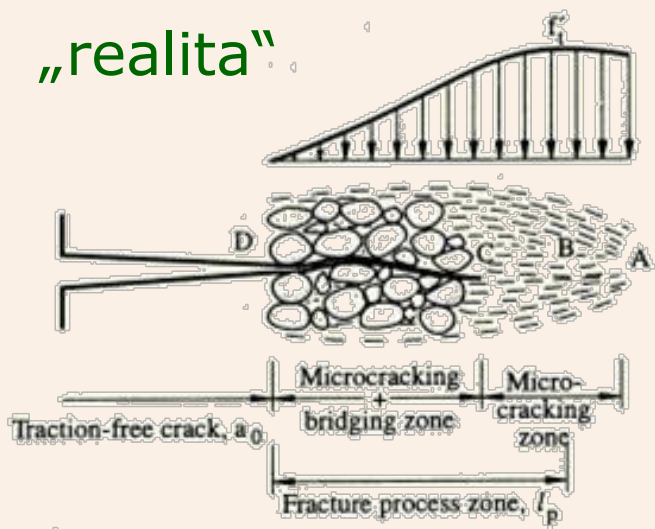
Modely kohezivní trhliny umožňují popis/predikci porušení konstrukce ze stavu bez trhlin až do úplného porušení

Klasické nelineární modely

• Modely kohezivní trhliny

Model fiktivní trhliny

„realita“



model

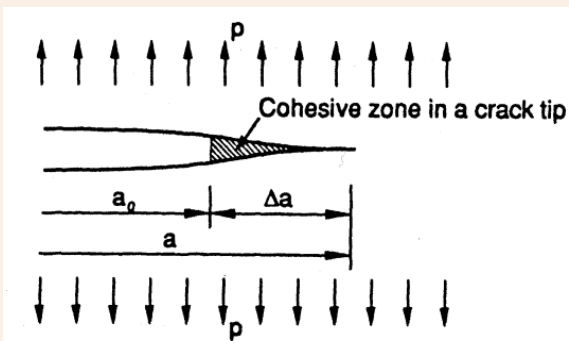
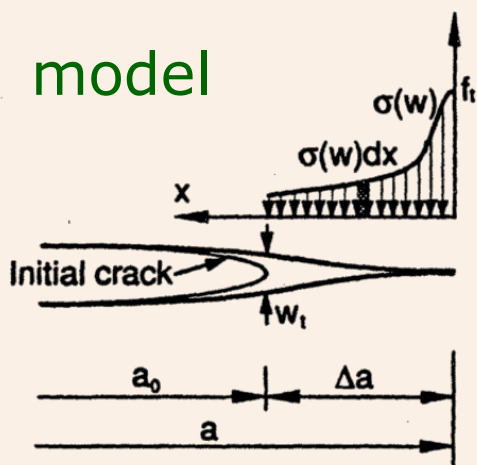


Figure 5-4 Mode I crack for fictitious crack approach.

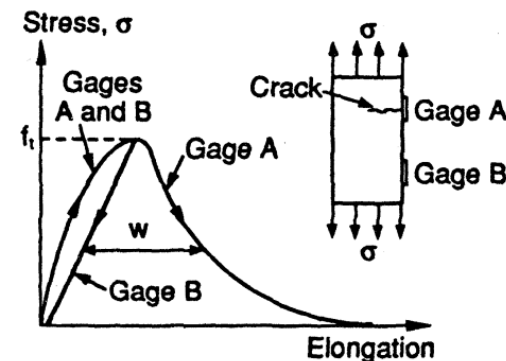
Převzato z Shah, S. P. et al. 1995: Fracture mechanics ...

3 nezávislé materiálové parametry modelu v diskontinuitě:

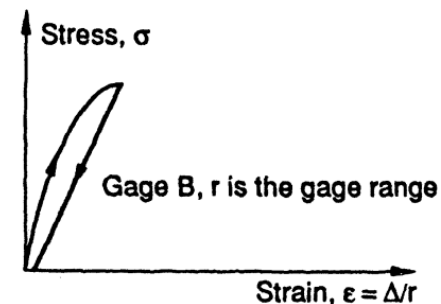
- f_t , funkce $\sigma(w)$ a w_c
- f_t , funkce $\sigma(w)$ a G_f

2 materiálové parametry mimo diskontinuitu:

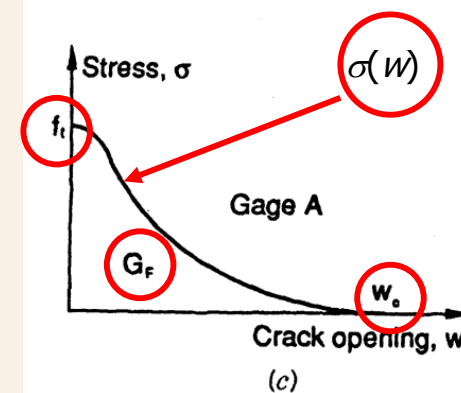
- E, ν



(a)



(b)



(c)

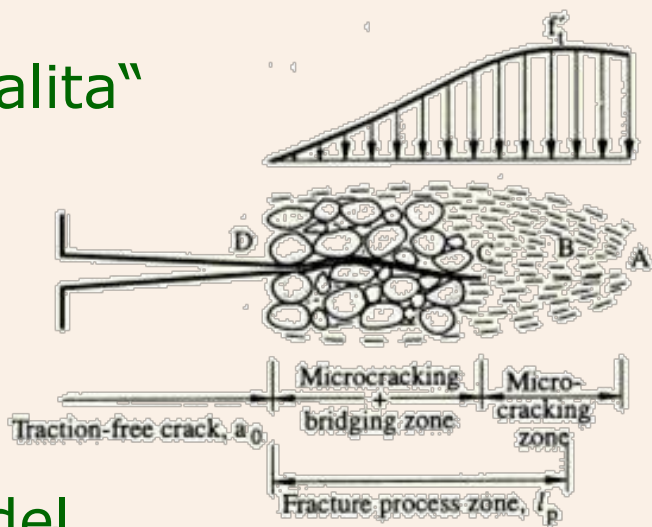
Figure 5-5 Principle for fictitious crack model by Hillerborg et al.: (a) a complete tensile stress-elongation curve (b) stress-strain curve for uncracked section, and (c) stress-elongation curve for cracked section.⁸

Klasické nelineární modely

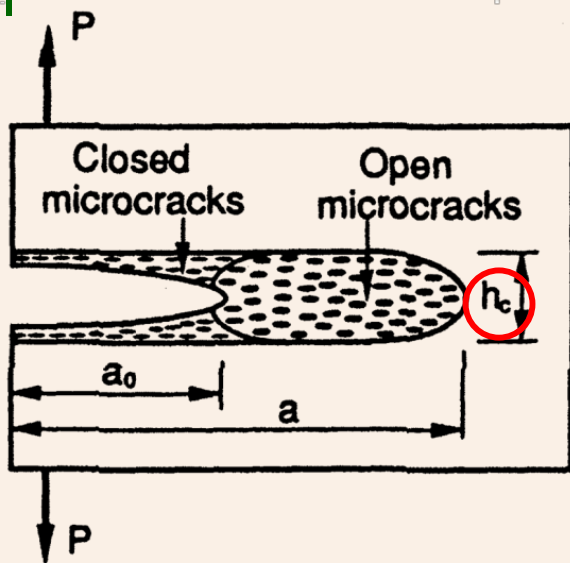
• Modely kohezivní trhliny

Model pásu trhlín

„realita“



model



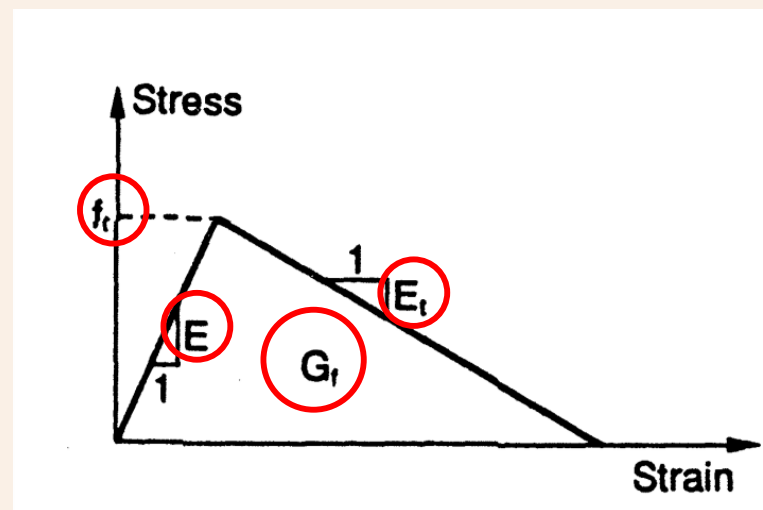
nezávislé materiálové parametry modelu:

- Původní podoba (viz obr) :

- f_t, E, E_t a h_c nebo
- E, G_f, E_t a h_c nebo
- f_t, G_f, E a h_c nebo
- f_t, G_f, E_t a h_c

- Dnes i jiné tvary funkce $\sigma(\varepsilon)$ – parametry analogicky s FCM + h_c

Pozn.: $w_c = \varepsilon_c \cdot h_c$



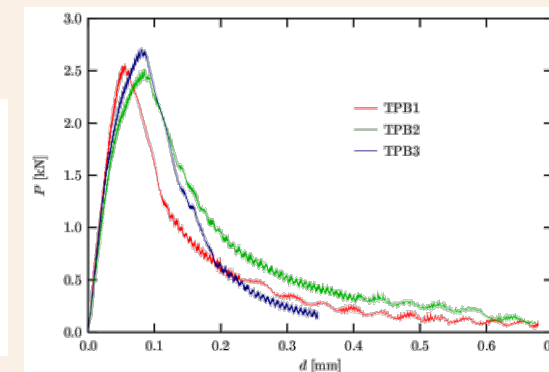
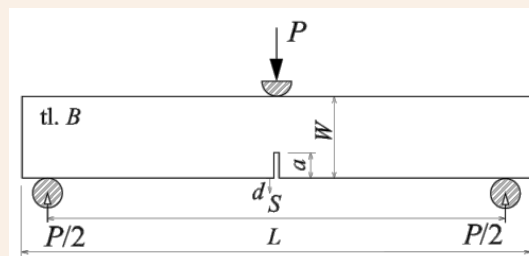
Klasické nelineární modely

• Modely kohezivní trhliny – parametry

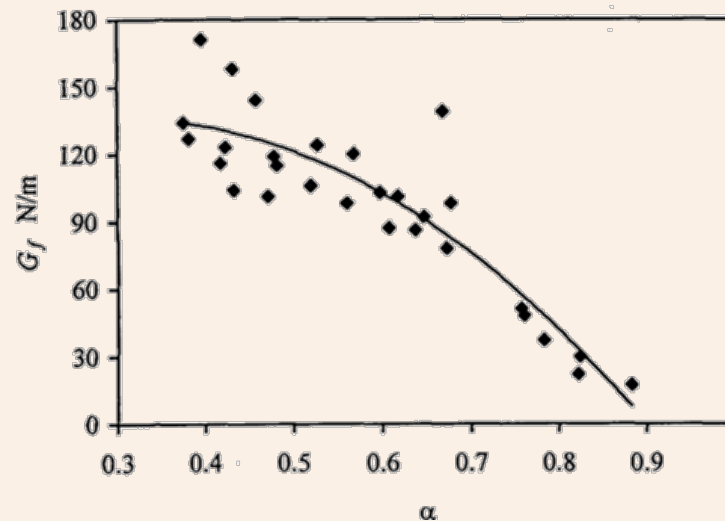
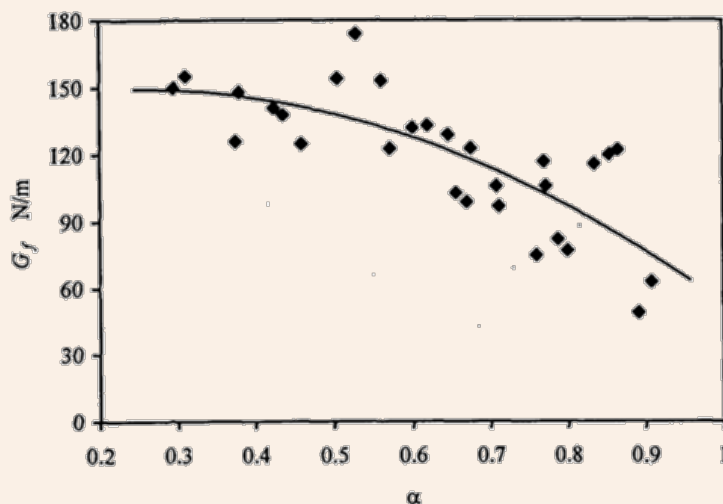
Lomová energie G_F

Metoda RILEM 1985

$$G_f = \frac{1}{(W - a_0)B} \int P dd$$



Hodnoty lomové energie zjišťované touto metodou vykazují silnou závislost na velikosti a tvaru tělesa a konfiguraci zkoušky. V rámci jedné zkušební geometrie jsou závislé na délce počáteční trhliny (zářezu) – viz obr.



Převzato z: Karimhaloo, B.L., Abdalla, H.M. (2005) A simple method for the determination of the true specific fracture energy of concrete. In proceedings of conference Non-Traditional Cement & Concrete, Bliek & Keršner (eds.), Brno, 415–432

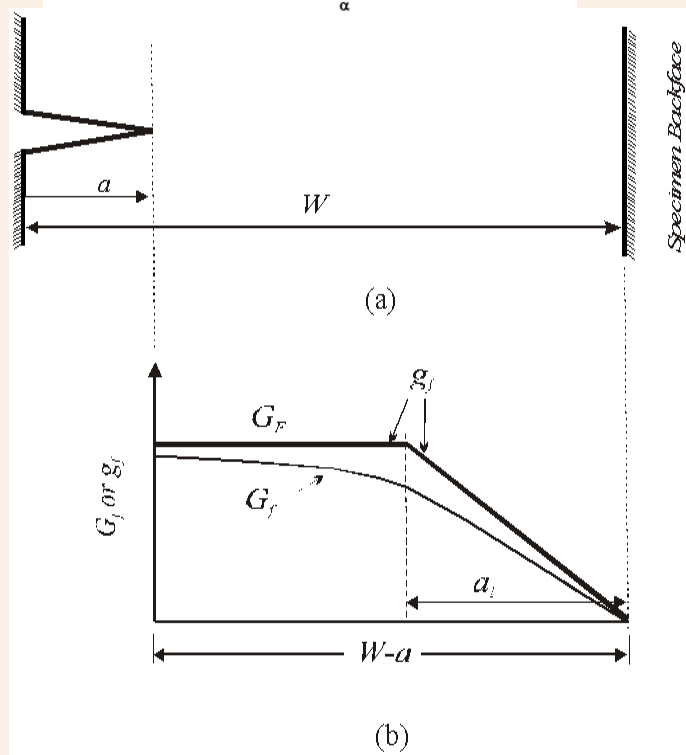
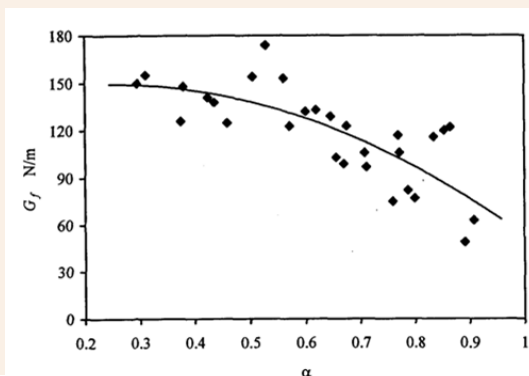
Veselý, V. (2004) Parametry betonu pro popis lomového chování. Disertační práce, FAST VUT v Brně, Brno.

G_f určovaná touto metodou neplní roli materiálové charakteristiky G_F modelů kohezivní trhliny

Klasické nelineární modely

• Modely kohezivní trhliny – parametry

Lomová energie G_F – problémy s určováním



Model Duan-Hu-Wittmann (2003) –
nerovnoměrné rozložení lomové energie
podél ligamentu tělesa

Bilineární aproximace řízená dvěma
parametry:

G_F skutečná lomová energie
 a_l přechodová délka ligamentu

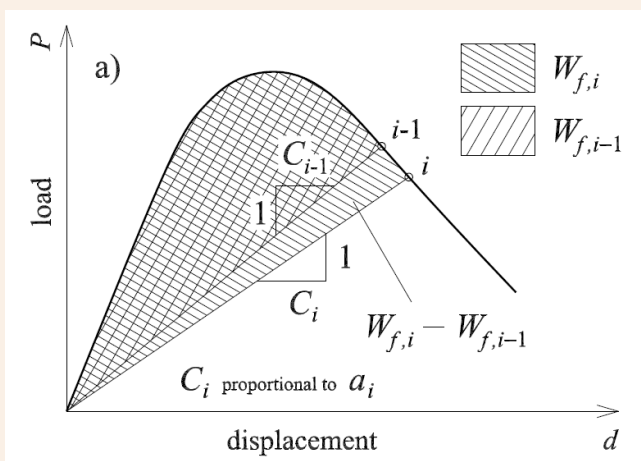
$$g_f(x) = G_F \quad \text{pro } x < W - a - a_l,$$

$$g_f(x) = G_F \left[1 - \frac{x - (W - a - a_l)}{a_l} \right] \quad \text{pro } x \geq W - a - a_l$$

Klasické nelineární modely

• Modely kohezivní trhliny – parametry

Lomová energie G_F – problémy s určováním



lomová práce

$$W_{f,i} = \int_0^{d_i} P \, dd - \frac{1}{2} P_i^2 C_i$$

lomová energie (průměrovaná)

$$G_{f,i} = \frac{1}{\Delta a_i B} W_{f,i}$$

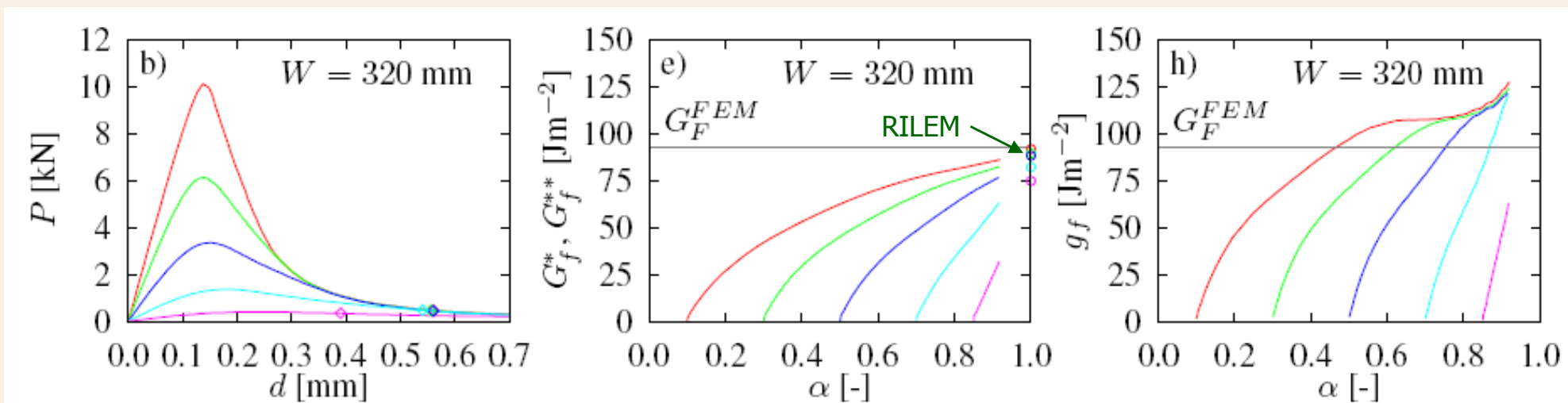
Metoda RILEM dává průměrnou hodnotu G_f na celém ligamentu tělesa

lomová energie (okamžitá, lokální)

$$g_{f,i} = \frac{1}{(\Delta a_i - \Delta a_{i-1}) B} (W_{f,i} - W_{f,i-1})$$

průměrovaná

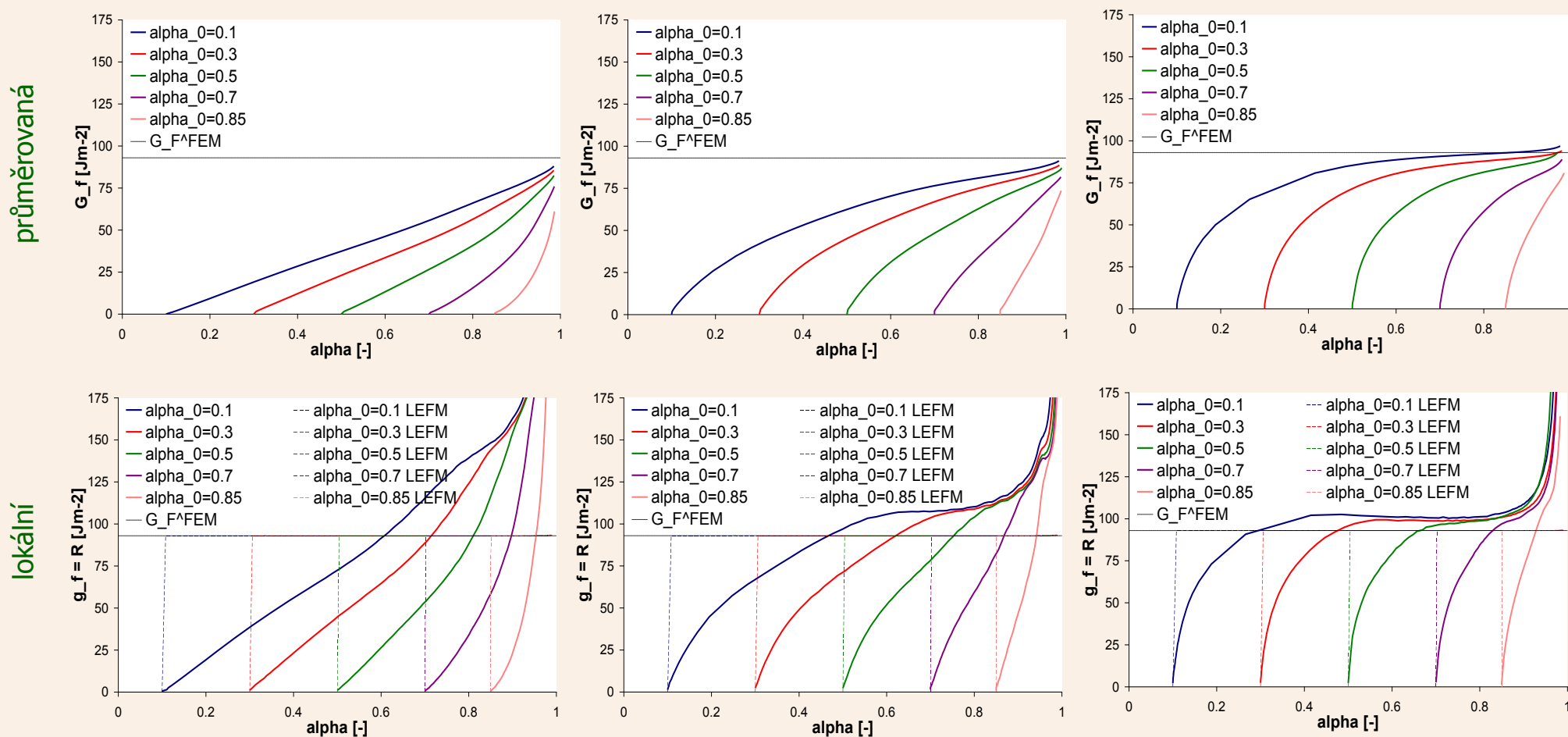
lokální



Klasické nelineární modely

- Modely kohezivní trhliny – parametry

Lomová energie G_F – problémy s určováním



Klasické nelineární modely

• Modely kohezivní trhliny – parametry

Tahová pevnost f_t , tvar křivky změkčení $\sigma(w)$, otevření trhliny w_c

Přímé určování z přímých tahových testů:

- tělesa ze zářezy
- tělesa ve tvaru kosti (dog-bone shaped specimen)

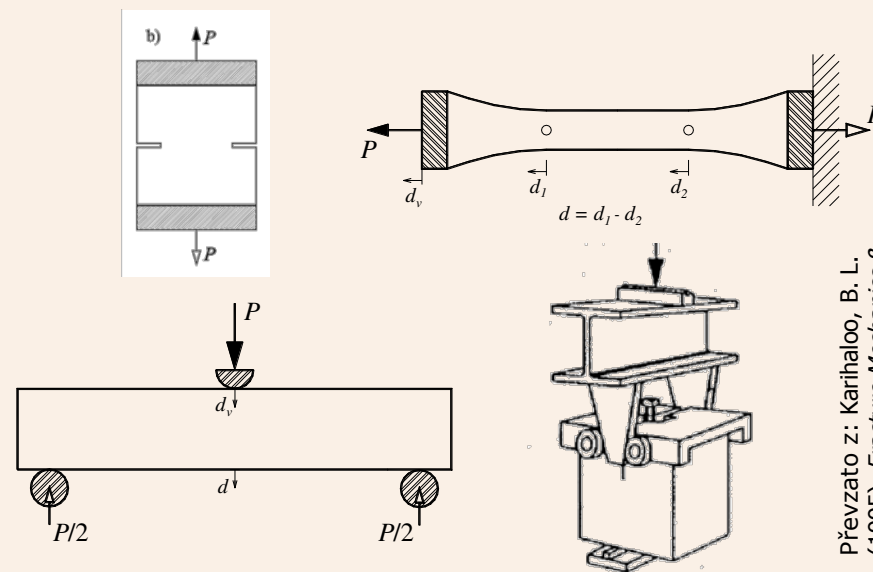
Nepřímé určování z různých typů lomových testů jakožto identifikace (inverzní analýza) parametrů vhodných lomových modelů (při využití soft-computing method):

- umělé neuronové sítě
- genetické algoritmy



Různé metody, prozatím ne zcela jednotná doporučení pro zjišťování těchto parametrů

Příklad možných variant funkcí tahového změkčení



Převzato z: Karihaloo, B. L. (1995). *Fracture Mechanics & Structural Concrete*.

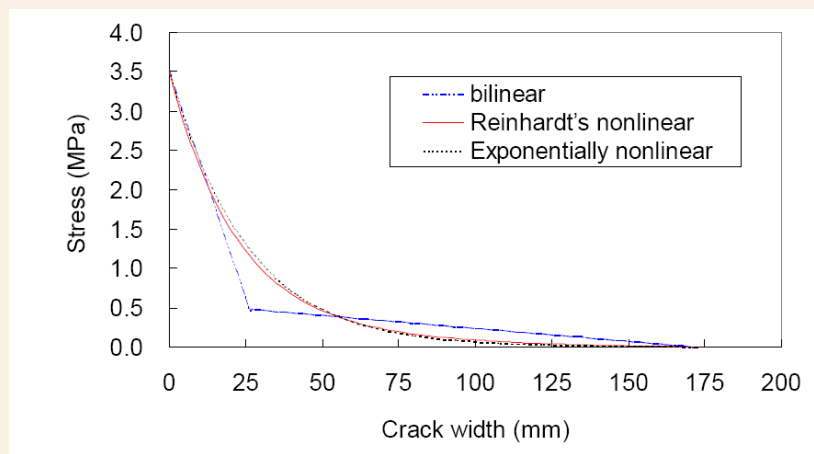


Fig. 3: Comparison among the three softening curves: bilinear, Reinhardt's nonlinear and exponential ones ($f_{ct} = 40$ Mpa, $d_{max} = 16$ mm).

Převzato z: Xu, S. Determination of parameters in the bilinear, Reinhardt's nonlinear and exponentially nonlinear softening curves and their meanings. Available from www.iwb.uni-stuttgart.de/bibliothek/festschr/xu.pdf

Modely založené na mechanice kontinua

Teorie postavené na mechanice kontinua se snaží popsat vznik a propagaci trhlin v makroskopicky bezvadném materiálu (na rozdíl od teorií popsaných v předešlých sekcích, které se zabývají zákony stability a růstu již existující trhliny – vyjma **model fiktivní trhliny** a **model pásu trhlin**). Jedná se vesměs o teorie a modely zapracovávané do konečnoprvkových kódů majících ambice numericky simulovat lomové chování betonových konstrukcí.

Při prvních pokusech o modelování vzniku a šíření trhlin se iniciace trhliny modelovala snížením tuhosti prvků, u nichž došlo k dosažení tahové pevnosti. V prvních přístupech skokem na nulu (60. léta), pozdější propracovanější (70. léta) snižovaly tuhost postupně (**tahové změkčení**). Tyto modely však vedly k výsledkům, jež byly silně závislé na velikosti konečných prvků. Částečně překonat tyto problémy se podařilo Bažantovi představením **modelu pásu trhlin** (70. a 80. léta), který rozevření trhliny přepočte na poměrné přetvoření pásu konečných prvků, v němž trhlina vzniká. Tento koncept, patřící do třídy modelů **rozetřené trhliny**, je v určitých rysech shodný s Hillerborgovým **modelem fiktivní trhliny** (zástupce třídy modelů **diskrétní trhliny**), ovšem zachovává si formulaci pomocí mechaniky kontinua.

viz blok B4 - POŠKOZENÍ

Patologickou senzitivitu výsledků MKP analýz na velikost, tvar a orientaci konečných prvků se snaží odstranit spousta vědeckých pracovišť již více než 30 let. Techniky zajišťující zmiňovanou nezávislost výsledků na MKP síti se nazývají **omezovače lokalizace**. Široká třída omezovačů lokalizace je založena na konceptu **nelokálního kontinua**, který se jako část mechaniky kontinua vyvíjí od 60. let a jako omezovač lokalizace byl použit v 80. letech minulého století. Podle tohoto přístupu je nelineární odezva v materiálovém bodě ovlivňována vývojem poměrného přetvoření v tomto bodě, ale také v bodech určitého okolí. Další formou omezovačů lokalizace jsou různé **gradientní modely** (diferenciální podoba nelokálního konceptu), jež v konstitutivních rovnicích využívají derivace vyšších řádů pro vyjádření napětí a deformací. Pro smykové a smíšené módy namáhání byly použity omezovače lokalizace inspirované vlastnostmi **Cosseratovského mikropolárního kontinua**.

Nové pokročilé modely, obecné teorie porušení – výhledy do budoucna

V posledních letech je věnováno mnoho výzkumného úsilí na vylepšování analytických i numerických nástrojů existujících modelů a teorií a také na zdokonalování a vytváření experimentálních metod pro určování parametrů těchto modelů.

Studuje se souvislost mezi makroskopickým lomovým chováním a mikrostrukturou materiálu a vyvíjejí se nové modely snažící se vystihnout heterogenní povahu betonu

- **mikroploškový (microplane) model**
- **částicové modely (rámové, mřížkové, příhradové)**

Lomová mechanika betonu se v 70. letech „oddělila“ od lomové mechaniky kovů (popř. keramiky a plastů) užívané v odvětvích strojího inženýrství po zjištění, že lineární elastický ani elastoplastický přístup není pro beton výstižný. V současnosti se obě větve opět přibližují, neboť řeší podobné problémy (keramika zhouževnatovaná např. vlákny, whiskery atd. a vysokopevnostní železobeton či vláknobeton).

Cesta k obecným teoriím porušení povede pravděpodobně přes pochopení nelokálních mikromechanických procesů zhouževnatění v okolí koncentrátorů napětí, v jejich energetické kvantifikaci a bilanci rychlostí disipace energie při těchto procesech za použití 2. termodynamického zákona. Za jeho určité rozšíření pro mechanické systémy lze považovat **princip maximální rychlosti disipace energie** (Ziegler 1983), protože ten umožní, aby bylo dosaženo rovnováhy v systému nejkratší možnou cestou. Před nestabilitou trhliny systém spouští řadu jiných disipativních mechanismů tak, jak to umožňuje struktura materiálu. Nestabilita trhliny může být brána jako jeden z řady disipativních procesů, který je systémem „nasazen“ v okamžiku, kdy ty předchozí již svou intenzitou nestačí vyhovět zmíněnému principu (Zemánková 1998).