

# Stanovení lomové energie betonu

RNDr. Vítězslav Vydra, CSc.

Habilitační přednáška

5. 10. 2006

# Cíle přednášky

## Cíle

Efekt rozměru

Stanovení lomové energie

- ① Efekt rozměru při destrukci betonových konstrukcí
- ② Význam lomové energie při šíření trhliny
- ③ Model efektivní trhliny
- ④ Stanovení lomové energie nezávislé na velikosti vzorku

Cíle

Efekt rozměru

Úvod

Efekt rozměru

Specifická lomová  
energie

Stanovení GF- Rilem

Zdroj energie

Bilance energie při  
šíření trhliny

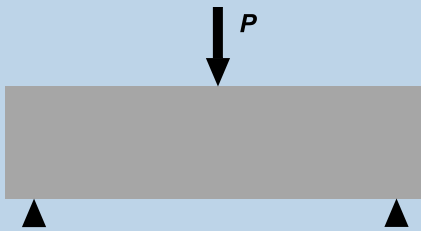
LPZ

Stanovení lomové  
energie

## Efekt rozměru a význam lomové energie při šíření trhlin

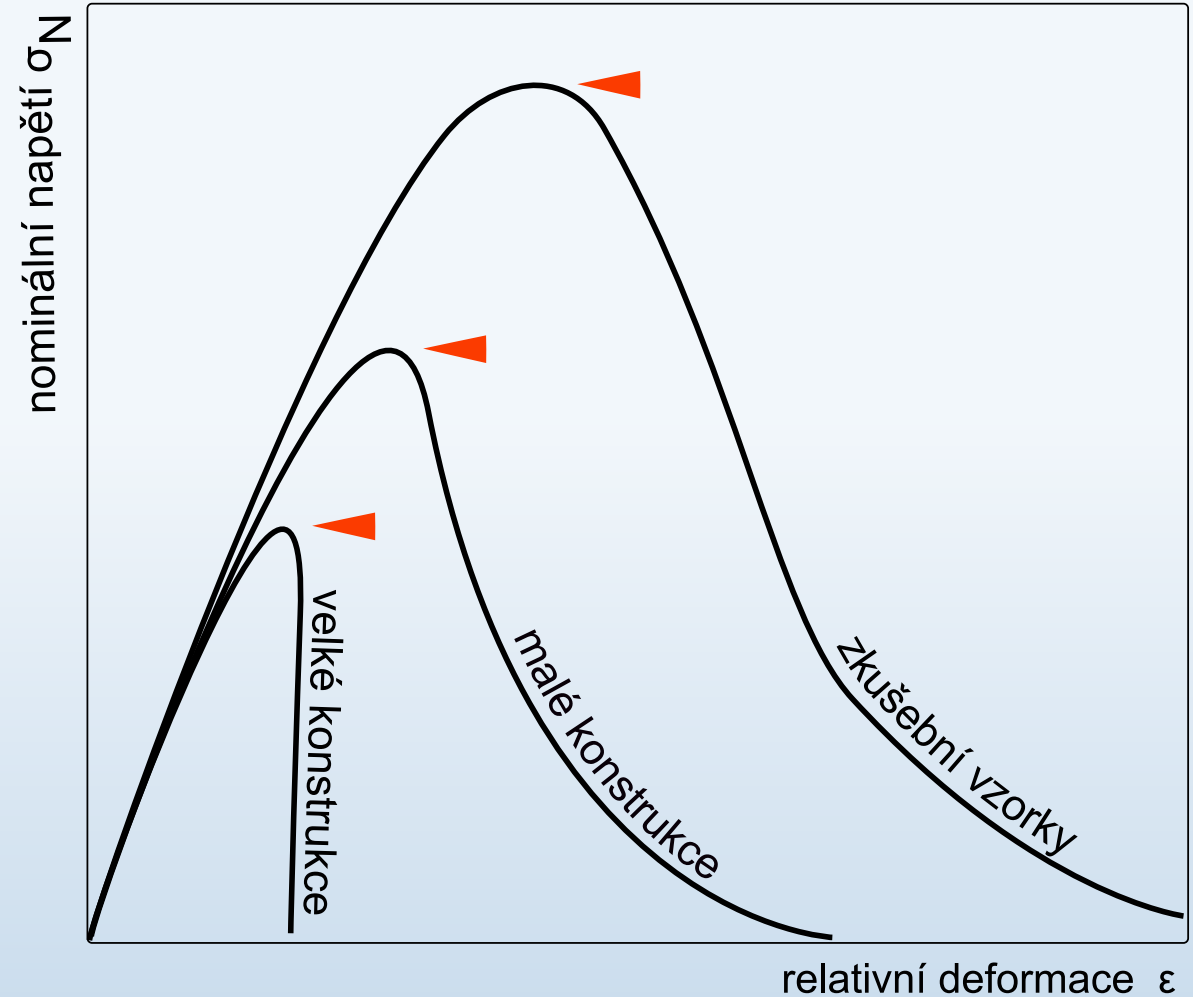
# Úvod

Kdy dojde k selhání  
konstrukce?



K selhání velkých konstrukcí dochází při nižší hodnotě nominálního napětí a při nižší hodnotě relativní deformace.

Pracovní diagram podobných konstrukcí různé velikosti

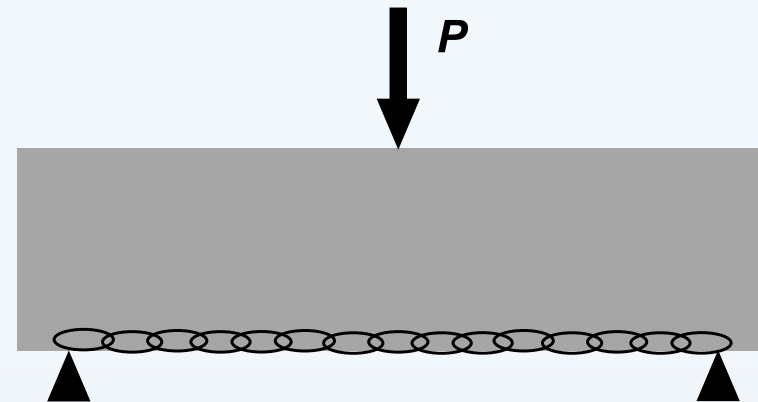


# Efekt rozměru

Hlavní příčiny „rozměrového efektu“:

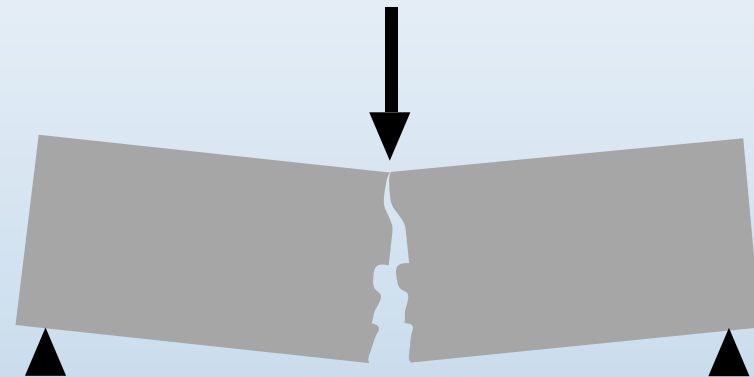
## ► Statistická

- ~> Vždy praskne nejslabší článek řetězu ...
- ~> V rozměnějších konstrukcích je vyšší pravděpodobnost výskytu „slabých“ míst.



## ► Deterministická

- ~> Na šíření trhliny je třeba energie
- ~> Ve velkých napjatých konstrukcích je energie k dispozici více.



# Specifická lomová energie

Energie potřebná na vytváření trhliny je v prvním přiblížení úměrná ploše nově vzniklé trhliny:

$$\delta W_F = G_f \cdot B \cdot \delta a$$

$B$  - rozměr trhliny kolmo na směr jejího šíření

$\delta a$  - nárůst délky trhliny ve směru šíření

$G_f$  - specifická lomová energie

- ▶ je to energie potřebná na zpřetrhání vazeb a vytvoření dvou nových povrchů

# Stanovení lomové energie - základní metoda

Standardní metoda pro určení lomové energie dle doporučení komise RILEM pomocí třibodového ohybu zkušební vzorku

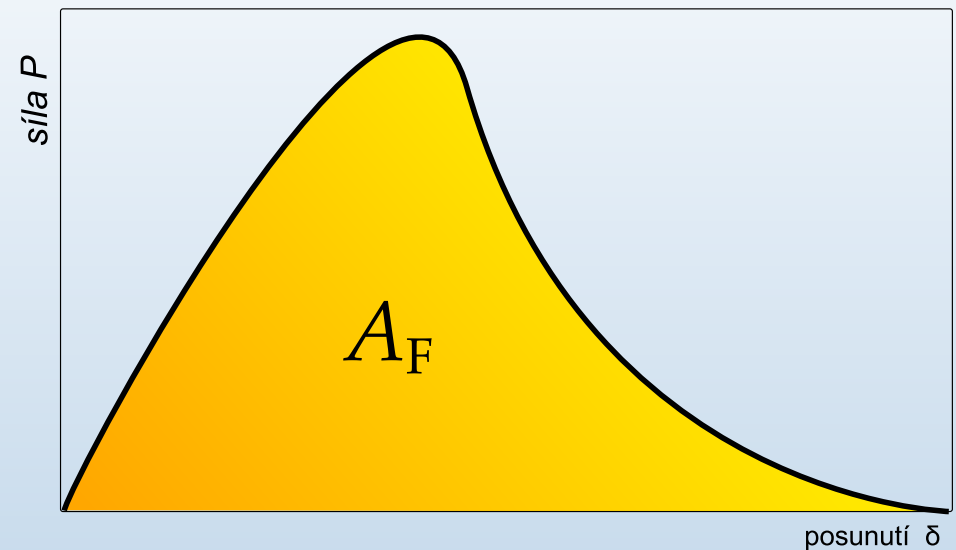
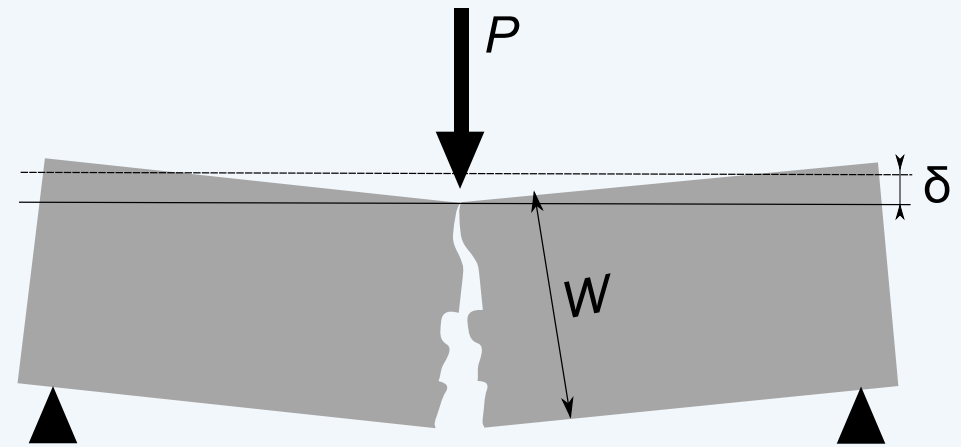
► práce působící síly:

$$A_F = \int_0^{\delta_{\max}} P \, d\delta$$

► práce na jednotku plochy:

$$G_F = \frac{A_F}{BW}$$

BW - plocha trhliny (plocha průřezu ligamentu)



# Odkud trhlina získává energii pro šíření?

Energie na šíření trhliny jde na úkor mechanické potenciální energie  $\Pi$ .

$$\Pi = \Pi_{el} + \Pi_p$$

potenciální energie vnějších sil

potenciální energie vnitřních elastických sil působících v napjaté konstrukci  
( $\approx$  objemu konstrukce!!!)



# Odkud trhlina získává energii pro šíření?

Energie na šíření trhliny jde na úkor mechanické potenciální energie  $\Pi$ .

$$\Pi = \Pi_{el} + \Pi_p$$

potenciální energie vnějších sil

potenciální energie vnitřních elastických sil působících v napjaté konstrukci  
( $\approx$  objemu konstrukce!!!)

Platí zákon zachování energie:

$$-\delta(\mathcal{K} + \Pi) = \delta W_F$$

# Odkud trhlina získává energii pro šíření?

Energie na šíření trhliny jde na úkor mechanické potenciální energie  $\Pi$ .

$$\Pi = \Pi_{el} + \Pi_p$$

potenciální energie vnějších sil

potenciální energie vnitřních elastických sil působících v napjaté konstrukci  
( $\approx$  objemu konstrukce!!!)

Platí zákon zachování energie:

$$-\delta(\mathcal{K} + \Pi) = \delta W_F$$

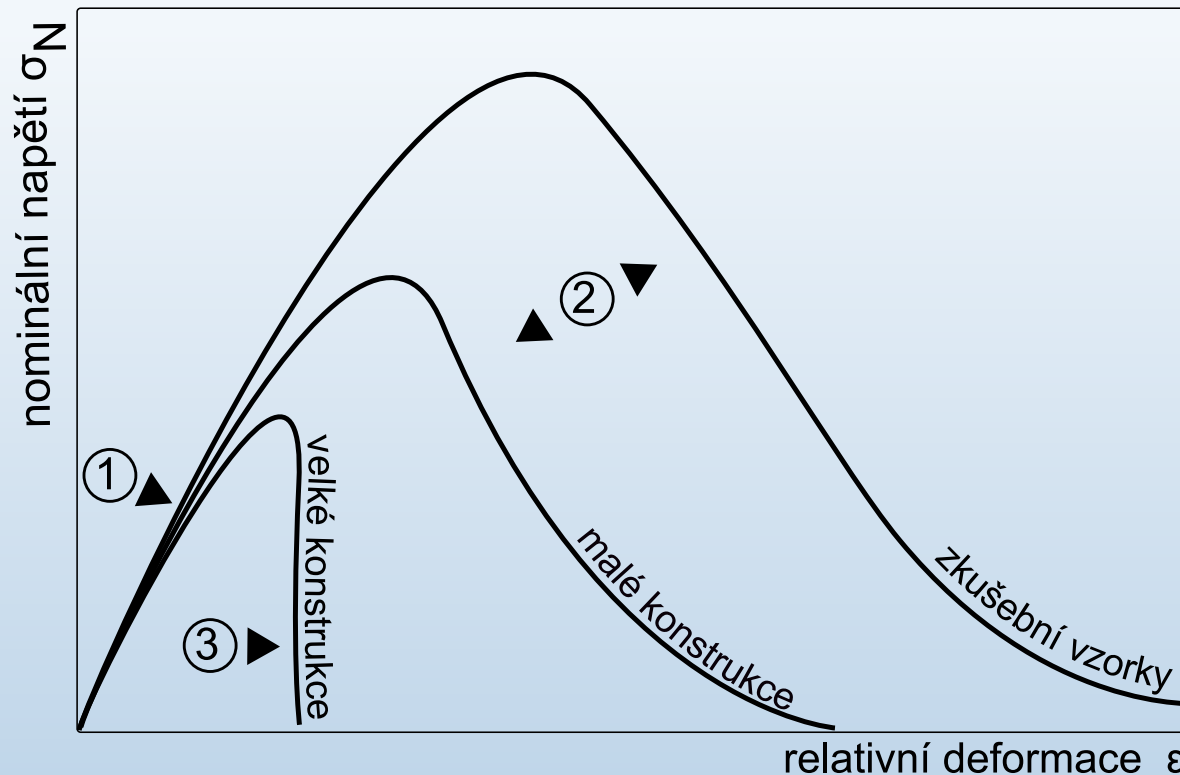
Rychlost uvolňování  
potenciální energie:

$$\mathcal{G} = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da} = G_f - \frac{1}{B} \frac{d\mathcal{K}}{da}$$

# Bilance energie při šíření trhliny

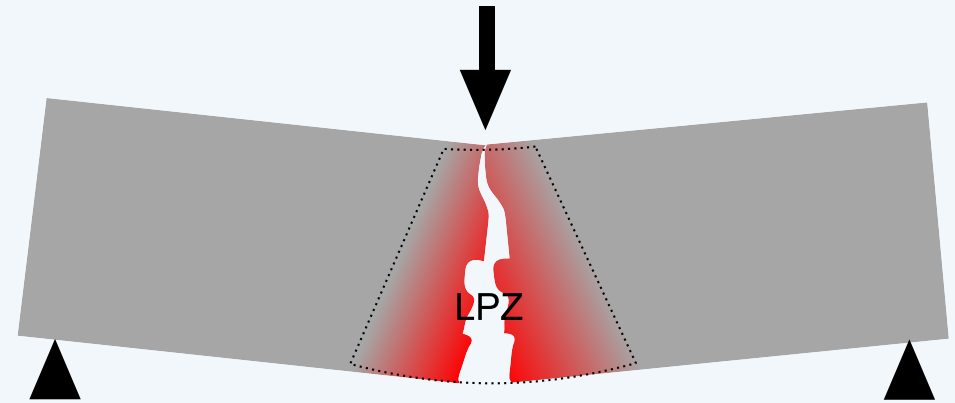
Při šíření trhliny mohou nastat tyto případy:

- ①  $\mathcal{G} < G_f$  (trhlina se nešíří)
- ②  $\mathcal{G} = G_f$  (trhlina se šíří kvazistaticky)  $\Rightarrow G_f = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da}$
- ③  $\mathcal{G} > G_f$  (trhlina se šíří explozivně)



# Lomová procesní zóna (LPZ)

Při vzniku trhliny dochází k poškození materiálu a ke spotřebě energie v bezprostředním okolí trhliny v tzv. "lomové procesní zóně" (LPZ).



Rozlišujeme materiály:

▶ Křehké - rozměr LPZ je zanedbatelný.

▶ Kvazikřehké

↪ velikost LPZ je srovnatelná s rozměry konstrukce

↪ velikost LPZ není podél trhliny konstantní

⇒  $G_F$  určená standardní metodou závisí na velikosti vzorku!

Lze určit lomovou energii tak, aby její hodnota nezávisela na velikosti vzorků?

Cíle

Efekt rozměru

Stanovení lomové  
energie

Model efektivní trhliny

Lokální lomová energie

Stanovení délky  
efektivní trhliny jako  
funkce  $\delta$

Příklad určení  $\alpha_e$  a  $\Gamma$

Závěr: výsledky a  
interpretace

Konec

# Stanovení lomové energie betonu pomocí modelu efektivní trhliny

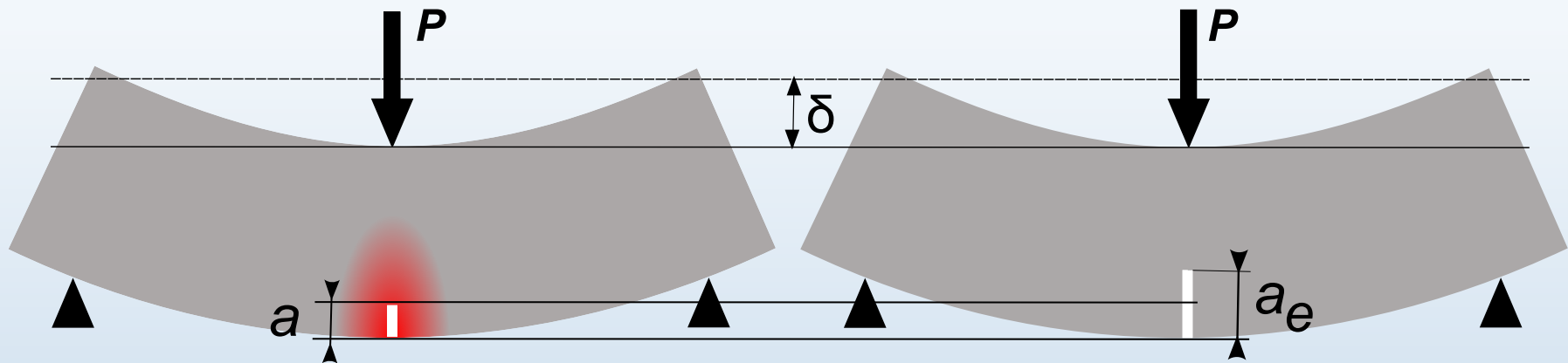
# Model efektivní trhliny

- ▶ Lomová procesní zóna částečně přenáší napětí.

↪ Pojem „délka trhliny“ tím poněkud ztrácí smysl a nelze ji ani určit.

↪ Zavádí se pojem „efektivní délka trhliny“  $a_e$ .

trojbodový ohyb:



skutečnost:

trámec s lomovou procesní zónou  
a trhlinou délky  $a$

model:

dokonale elastický trámec  
s trhlinou délky  $a_e$

# (Lokální) lomová energie jako funkce efektivní trhliny

- ▶ Tvar LPZ se v průběhu šíření trhliny mění,
  - ↪ mění se potřeba energie na šíření trhliny,
  - ↪ lomová energie  $G_f$  je funkcí délky efektivní trhliny:  $G_f(a_e)$
- ▶ při *kvazistatickém* šíření trhliny lze  $G_f$  určit ze vztahu:

$$G_f(a_e) = \mathcal{G} = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da_e}$$

Funkci  $\Pi(a_e)$  neznáme a proto nelze provést derivaci!

Není možné vyjádřit  $\Pi$  a  $a_e$  jako funkci průhybu trámce  $\delta$ ?

$$G_f(a_e) = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{da_e} = -\frac{1}{B} \frac{d\Pi}{d\delta} \left( \frac{da_e}{d\delta} \right)^{-1}$$

# Stanovení délky efektivní trhliny jako funkce $\delta$

V literatuře lze nalézt pouze implicitní vyjádření, např. dle ING. STIBORA:

$$E = \frac{P}{4B\delta} \left(\frac{S}{W}\right)^3 \left[ 1 - 0,387 \frac{W}{S} + 12,13 \left(\frac{W}{S}\right)^{2,5} \right] + \frac{9}{2} \frac{P}{B\delta} \left(\frac{S}{W}\right)^2 F_1(\alpha_e),$$

kde  $F_1(\alpha_e) = \int_0^{\alpha_e} x Y^2(x) dx$ ,  $Y(x)$  je složitá funkce geometrie.

Délka efektivní trhliny se z těchto implicitních vyjádření obvykle určuje iteračním výpočtem, ale podařilo se nalézt přibližné explicitní vyjádření:

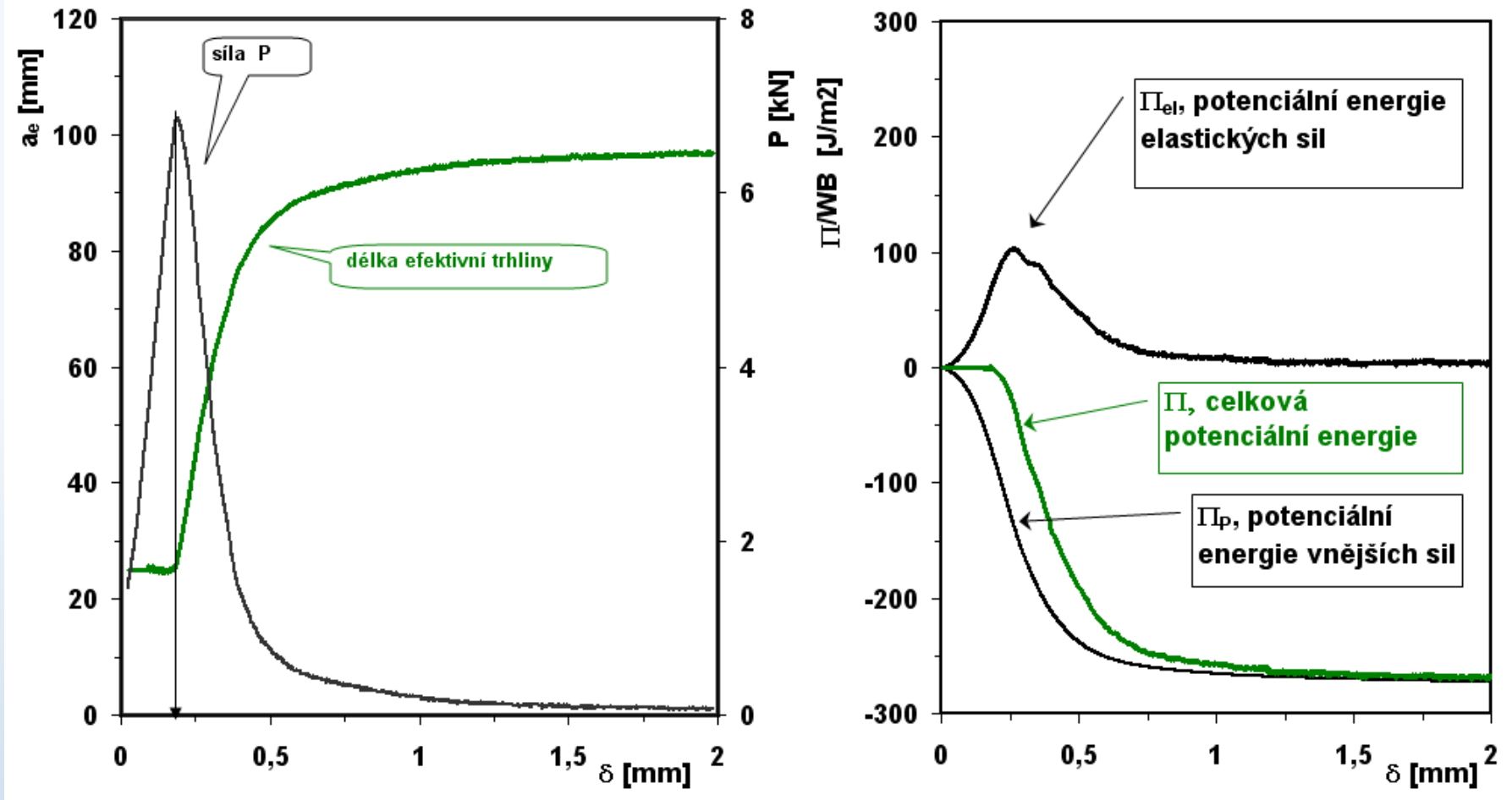
$$\alpha_e(F_1) = \frac{1}{2} + \frac{\arctan(b_1 + b_2 \ln F_1 + b_3 (\ln F_1)^2 + b_4 (\ln F_1)^3)}{\pi},$$

kde  $b_1 - b_4$  jsou jednoduché funkce velikosti vzorku.

Chyba tohoto přibližného vyjádření je maximálně 0,2%!

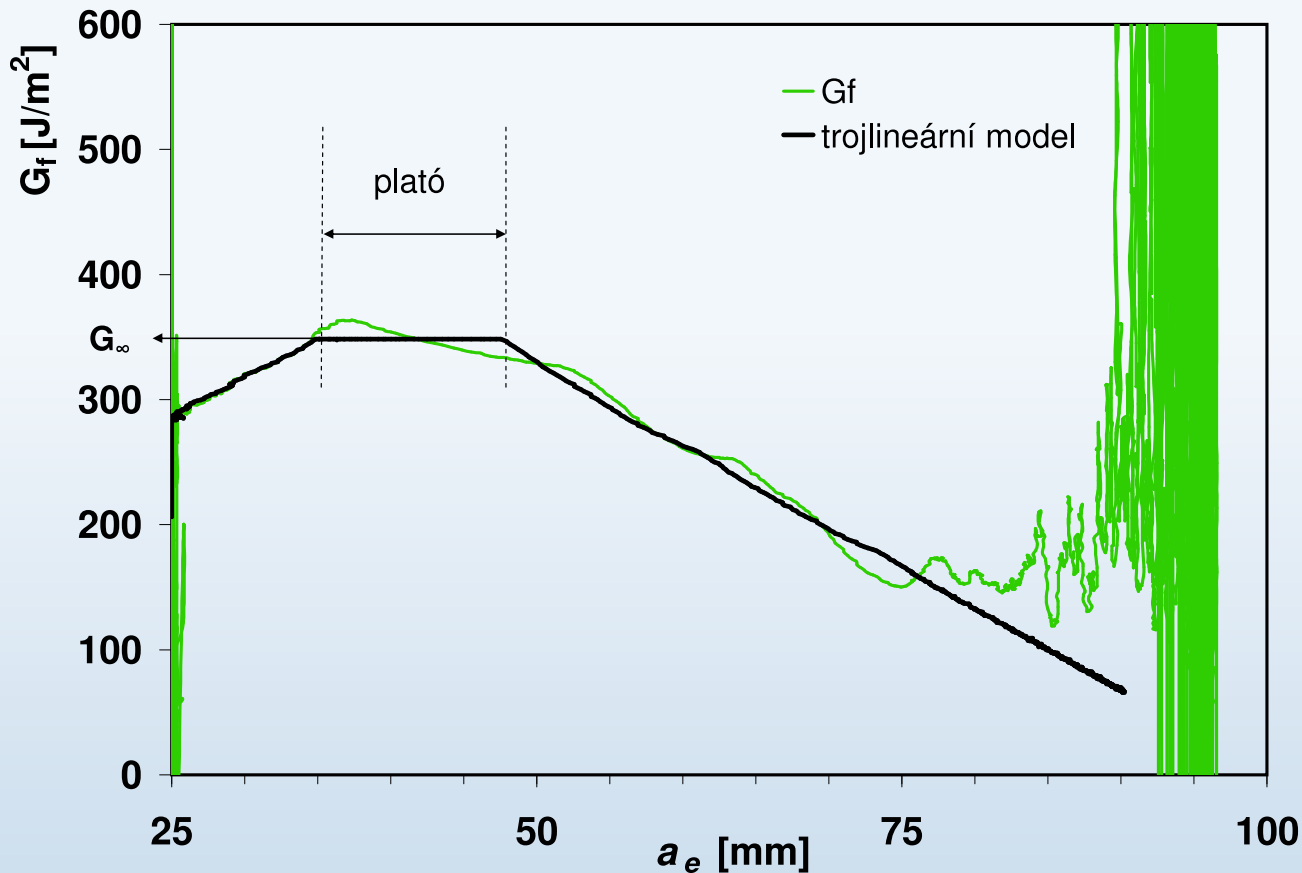


# Příklad určení $a_e$ a $\Pi$

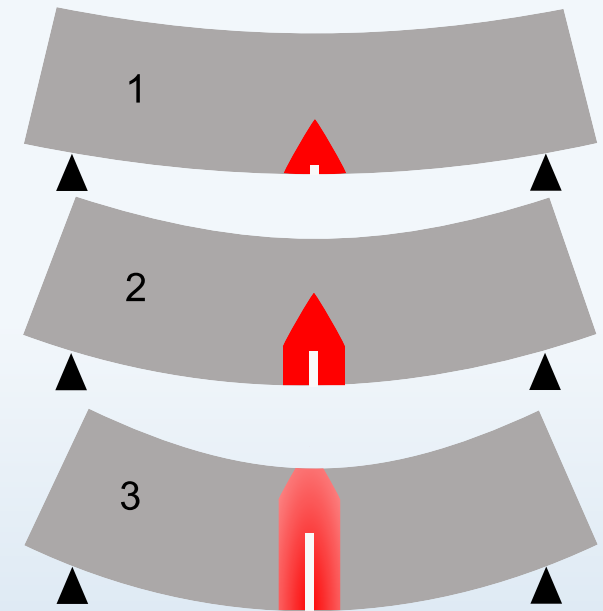


# Závěr: výsledky a interpretace

$G_f$  určená zpracováním zkoušek třibodovým ohybem:



trojlineární model:



Pokud existuje plató, lze z jeho hodnoty  $G_\infty$  určit hodnotu lomové energie nezávislé na tvaru vzorku!

Cíle

Efekt rozměru

Stanovení lomové  
energie

Model efektivní trhliny

Lokální lomová energie

Stanovení délky  
efektivní trhliny jako  
funkce  $\delta$

Příklad určení  $\alpha_e$  a  $\Pi$

Závěr: výsledky a  
interpretace

Konec

Dámy a pánové  
děkuji Vám za pozornost ...