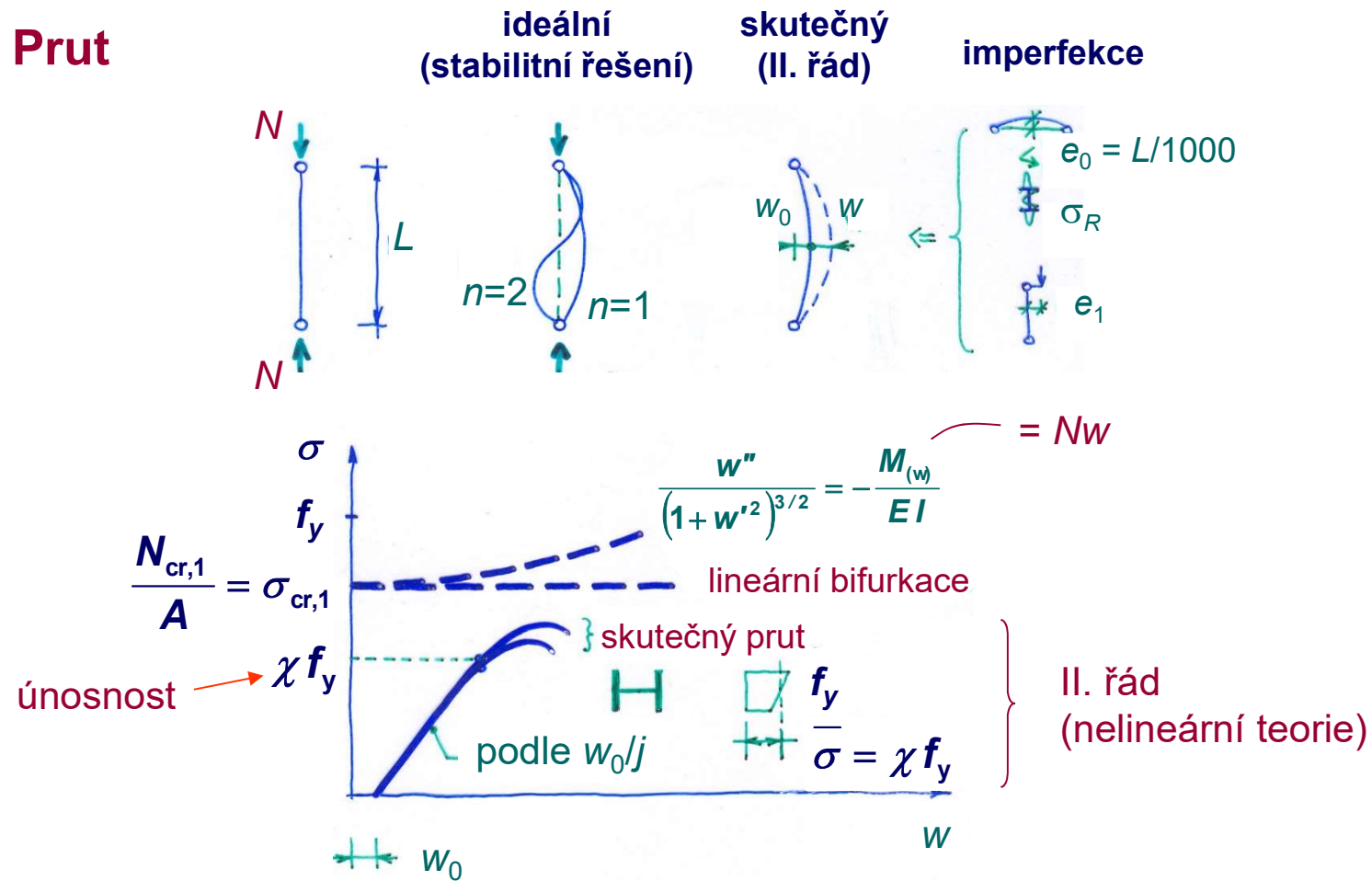
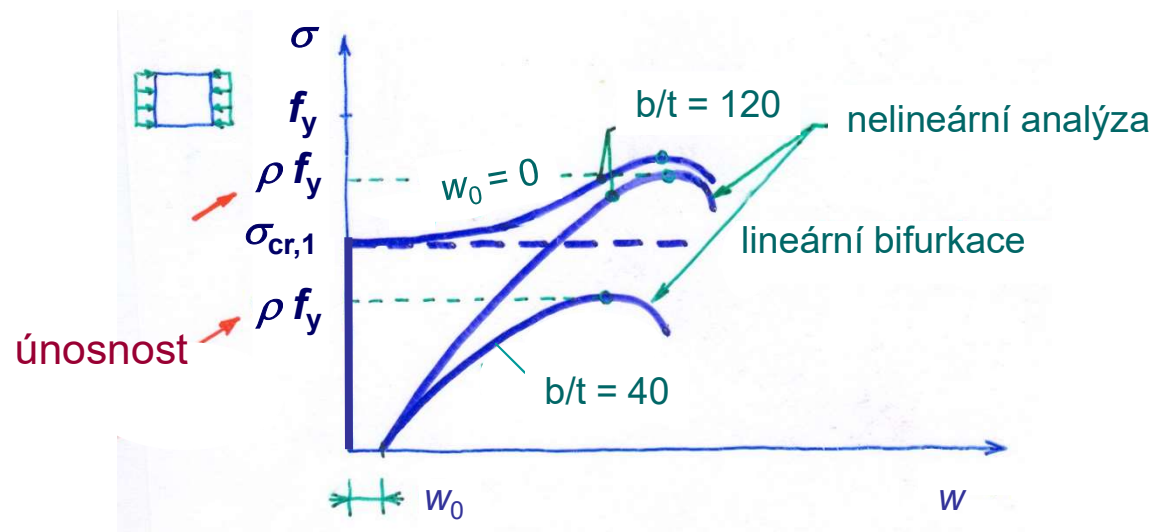
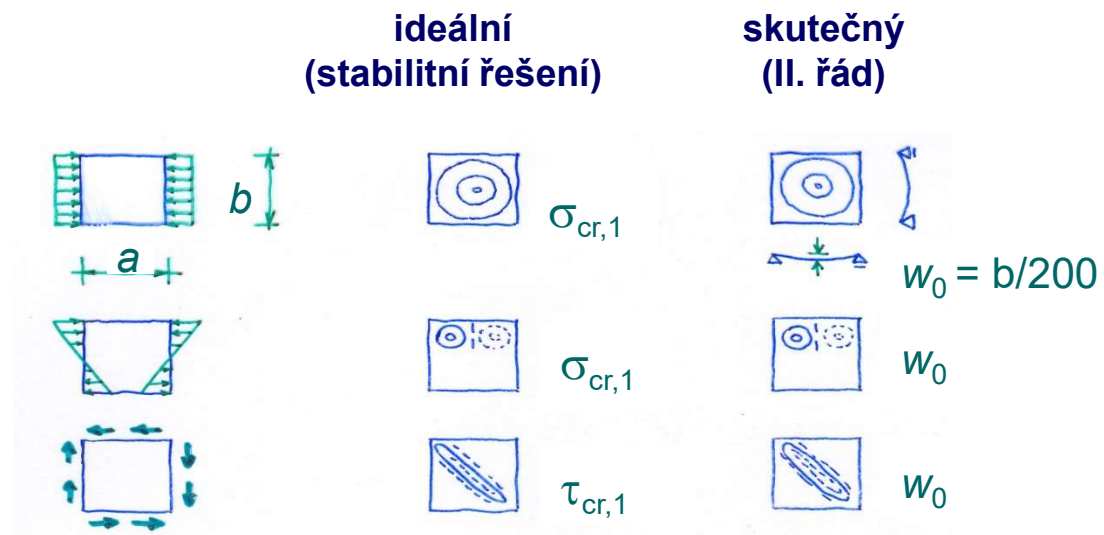


3. Rozdíl v chování prutů a stěn

Prut



Stěna



Pozn.:
únosnosti zakresleny
v relaci k σ_{cr}
(nikoliv v relaci
k mezi kluzu)

Závěr:

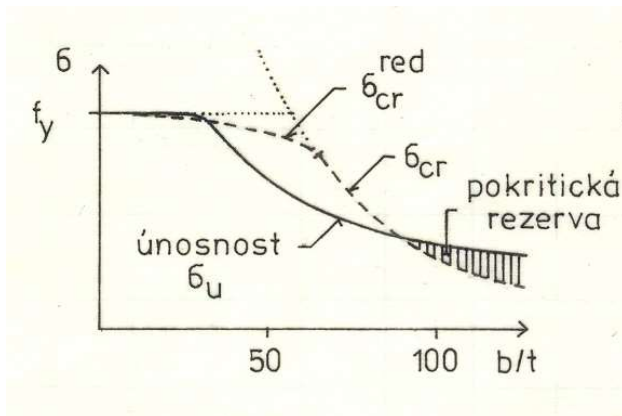
- **pruty:** $\sigma_{cr} > \chi f_y$ (kritické napětí je vyšší než únosnost)
- **stěny bez výztuh:** σ_{cr} neříká nic o únosnosti ρf_y

Příčiny :

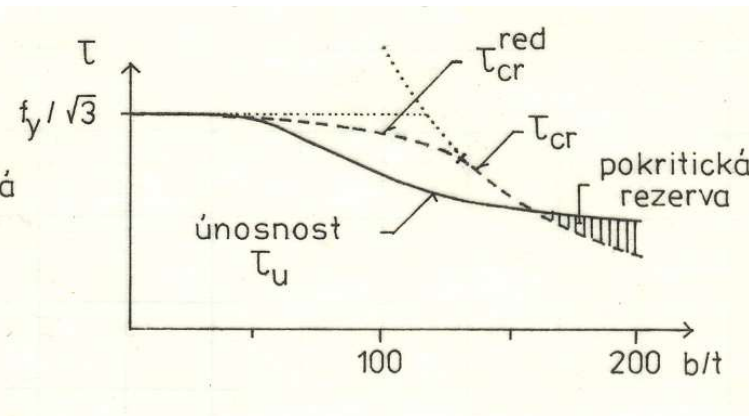
nepříznivý vliv
příznivý vliv

- imperfekce jako u prutů
- vznik membránové (stěnové) napjatosti (tzv. "pokritická rezerva")

tlačená stěna

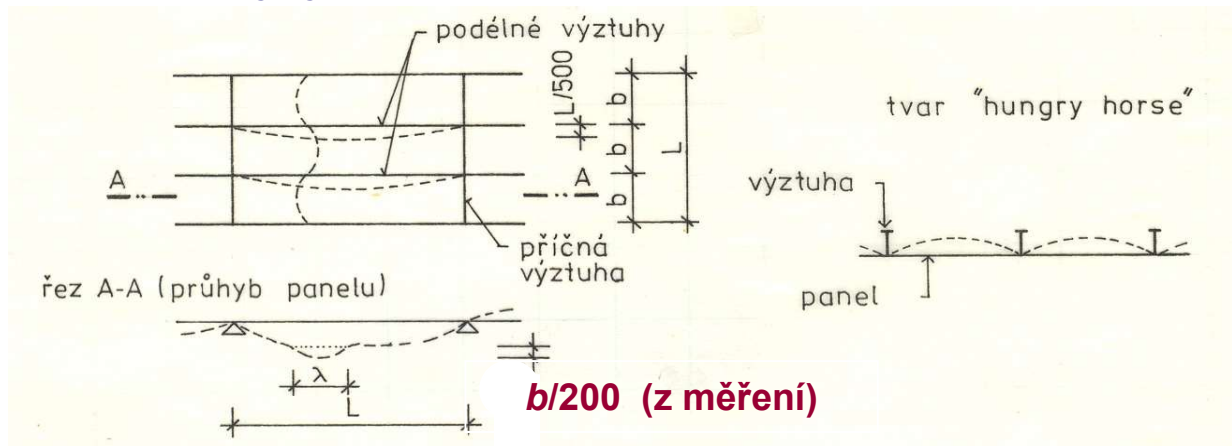


stěna při smyku

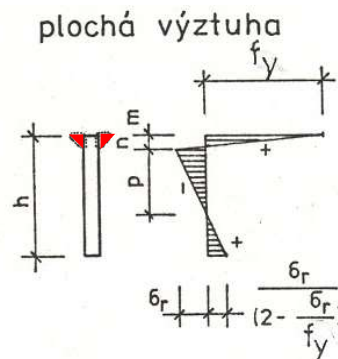
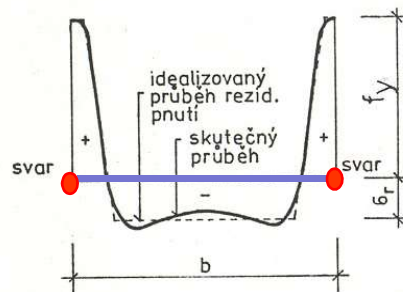


Imperfekce skutečných stěn

Počáteční průhyby



Reziduální pnutí



Úroveň tlakových rez. pnutí:

$\sigma_r = 0$ vyžíhané,
za studena tvarované

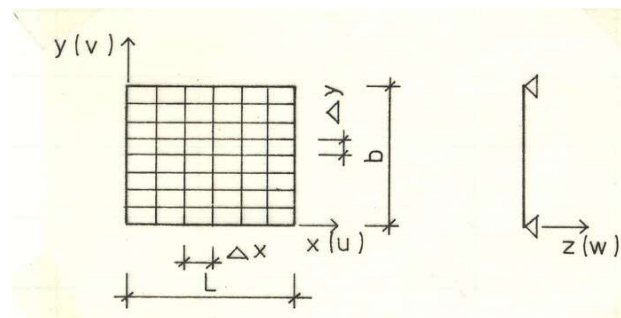
$\sigma_r = 0,10 f_y$ "malé svary"
(vícevrstvé, přerušované)

$\sigma_r = 0,25 f_y$ "velké svary" (běžné)

4. Nelineární boulení imperfektních stěn

Geometricky nelineární pružná analýza

- rovnice desky s velkými průhyby
- pružné fyzikální vztahy



Obecný zápis (MKP, DM):

$$\{\Delta F\} = [K] \cdot \{\Delta d\}$$

přírůstky vnějšího zat.

přírůstky přemístění

matice tuhosti je funkcí $\{\Delta d\}$
 $\Rightarrow$ nelineární vztahy

Korektní řešení: matice 48x48 ($u, u_x, u_y, u_{xy}, v, v_x, v_y, v_{xy}, w, w_x, w_y, w_{xy}$)

Technické řešení (malé průhyby): matice 24x24 ($u, v, w, \phi_x, \phi_y, \phi_z$)

Řeší se s linearizovanou (tangentovou) maticí $[K_T]$, iteračně.

Iterace pro přírůstek zatížení:

$$\textcircled{1} \quad \{\Delta F\} = [K_T]_0 \{\Delta d\}_1 \quad \Rightarrow \{\Delta d\}_1 = [K_T]^{-1}_0 \{\Delta F\} \quad \Rightarrow [K_T]_1$$

$\textcircled{2}$ *i*-tá iterace:

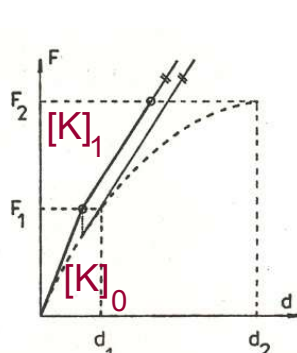
$$\{\Delta d\}_i = [K_T]^{-1}_{i-1} \{\Delta F\} + [K_T]^{-1}_{i-1} (\{F\} - \{\bar{F}\}_{i-1})$$

celkové vnější zatížení

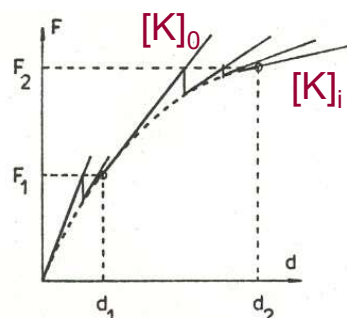
"vnitřní" zatížení
(integrál vnitř. sil z nelin. rovnic)

"balanční vektor" (= 0 pro rovnovážný stav)

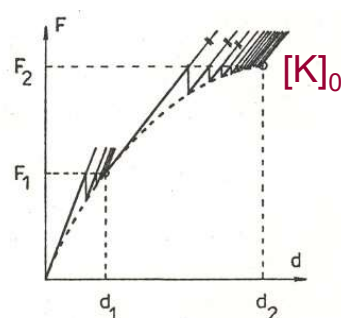
Numerické metody řešení: (zjednodušené jednodimenzionální zobrazení)



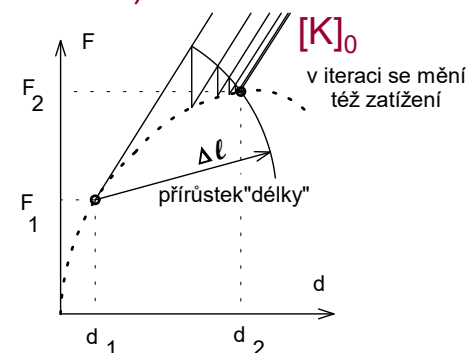
a. Přírůstková metoda (bez iterace, nevhodná)



b. Metoda Newton-Raphson (N-R)



c. Modifikovaná (mN-R)

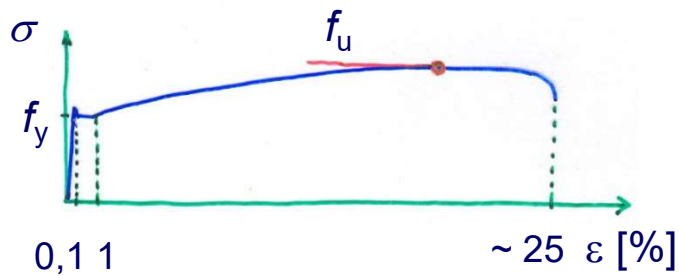


d. Arc-length metoda

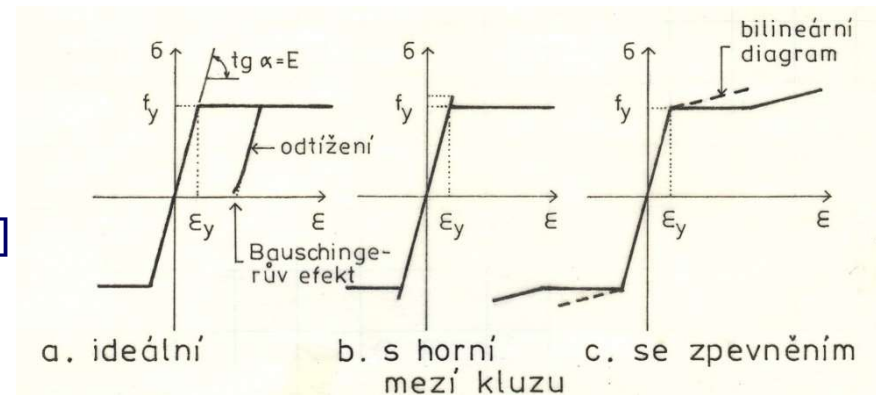
Další např.: arc-length s akcelerací (line searches), dynamická relaxace a další.

Fyzikálně nelineární analýza

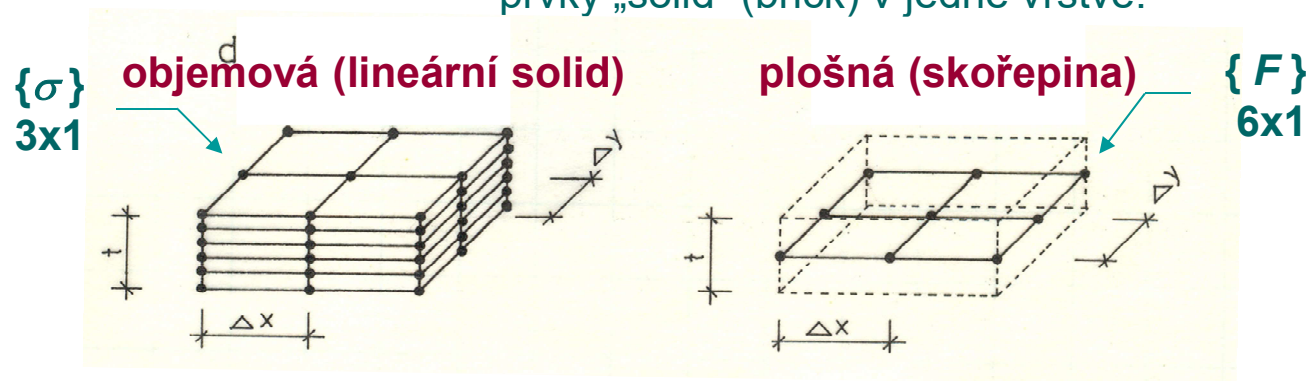
pracovní diagram



náhrady



Diskretizace stěny: Pozn: software MKP s prvky vyššího řádu umožňuje použít prvky „solid“ (brick) v jedné vrstvě.



Stabilita stěn

Vznik plasticity

Po překročení plasticitní podmínky ve sledovaném uzlu.

1. Objemová metoda: Misesova podmínka (též MHH), v napětích:

$$f = \frac{1}{f_y^2} (\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y + 3\tau_{xy}^2) \leq 1$$

2. Plošná metoda: Iljušinova podmínka, ve vnitřních silách:

Alexej Antonovič Iljušin:
„Plastičnost“, Moskva, 1948

$$f = f_{(N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy})} \leq 1$$

- v tzv. Ivanovově úpravě:

$$f = Q_t + \frac{1}{2} - \frac{\frac{1}{4}(Q_t Q_m - Q_{tm}^2)}{Q_t + 0,48 Q_m} + \sqrt{\frac{1}{4} Q_m^2 + Q_{tm}^2} \leq 1$$

$$Q_t = (N_x^2 - N_x N_y + N_y^2 + 3N_{xy}^2) / N_0^2$$

$$N_0 = f_y \cdot t$$

$$M_t = (M_x^2 - M_x M_y + M_y^2 + 3M_{xy}^2) / M_0^2$$

$$M_0 = f_y \cdot \frac{t^2}{4}$$

$$Q_{tm} = \left(N_y M_x - \frac{1}{2} N_x M_y - \frac{1}{2} N_y M_x + N_y M_y + 3N_{xy} M_{xy} \right) / N_0 M_0$$

Přírůstková teorie plasticity

Pro přírůstky:

- platí Prandtl-Reussovy zákony tečení:

$$\{ \Delta \mathbf{e}_{pl} \} = \lambda \{ \mathbf{f}_F \}$$

$\{ \mathbf{f}_F \}$... vektor derivací podle složek f

$$\text{např. u plošné metody: } \{ \mathbf{f}_F \} = \left\{ \frac{\partial f}{\partial N_x}, \frac{\partial f}{\partial N_y}, \frac{\partial f}{\partial N_{xy}}, \frac{\partial f}{\partial M_x}, \frac{\partial f}{\partial M_y}, \frac{\partial f}{\partial M_{xy}} \right\}^T$$

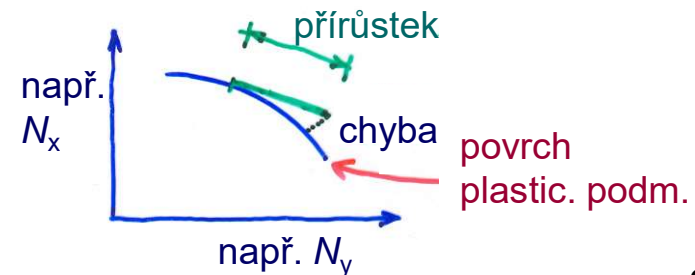
- podmínka plasticity f se bere jako plastický potenciál:
 - v objemové metodě 3 dimenzionální $\{ \sigma \}$
 - v plošné metodě 6-ti dimenzionální $\{ F \}$ tj. nulová variace přírůstků:
 $\delta f = \{ \mathbf{f}_F \}^T \{ \Delta F \} = 0$

Odtud po odvození:

$$\{ \Delta F \} = [Q] \{ \Delta \mathbf{e} \} \quad \text{Tangentová modulární matice - např. pro plošné řešení:}$$

$$[Q] = \begin{bmatrix} [C] & [R] \\ [R]^T & [D] \end{bmatrix} = [Q_{el}] - \frac{[Q_{el}] \cdot \{ \mathbf{f}_F \} \cdot \{ \mathbf{f}_F \}^T \cdot [Q_{el}]}{\{ \mathbf{f}_F \}^T \cdot [Q_{el}] \cdot \{ \mathbf{f}_F \}}$$

Přírůstky musí být "malé" (jinak chyba řešení):



Stabilita stěn

Numerické řešení materiálové nelinearity

- obdobně jako u geometrické nelinearity, neboť $[Q]$ je funkcí $\{F\}$ (tzn. v rámci přírůstku metoda N-R, mN-R ...)

Skutečná únosnost stěn z nelineárního řešení

Příklad - tlačená (stlačovaná) stěna:

