



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI  
Fakulta mechatroniky, informatiky  
a mezioborových studií ■

# MODELOVÁNÍ KONTAKTU KOVOVÝCH TĚLES

P. Rálek, P. Šidlof

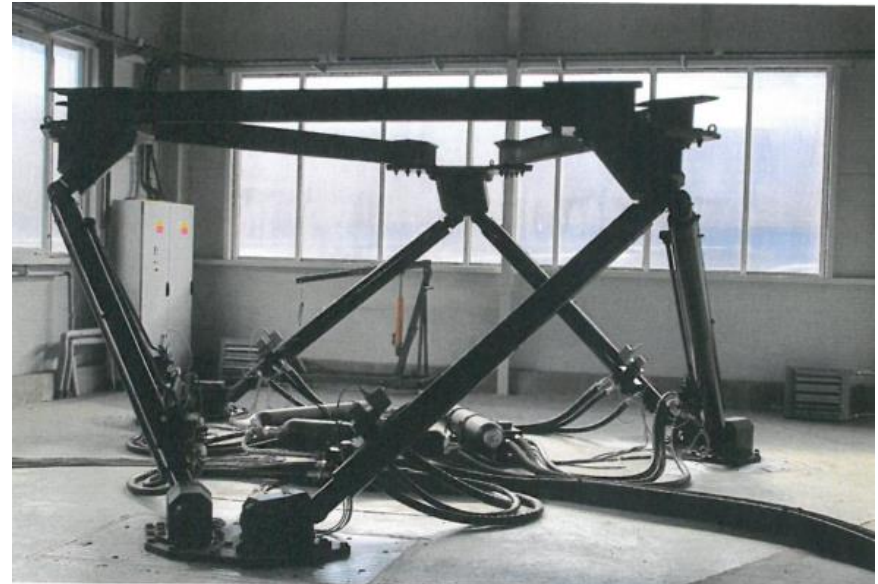


# Motivace - projekt OCHI

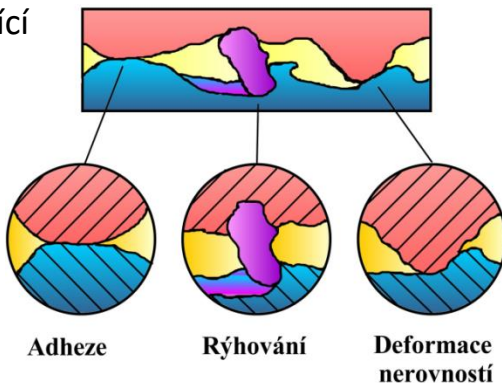
- „Dynamické víceosé elektrohydraulické rekuperační jednotky“
- OCHI Inženýring, s.r.o. + CxI TUL
- Realizace: 01/2016 – 12/2018

## Cíle

- projekt: výzkum a vývoj energeticky úsporných elektrohydraulických jednotek – hexapod
- CxI / FS: využití nanoaditiv pro zlepšení tribologických vlastností v hydraulice
- Rálek + Šidlof: numerické modelování kontaktu a opotřebení těles s třením (a mazáním)



Jevy uplatňující se při tření a opotřebení

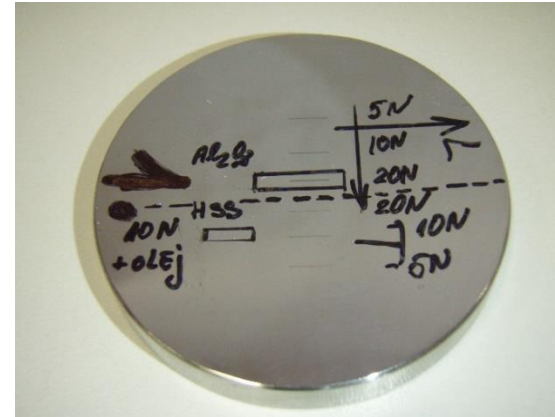
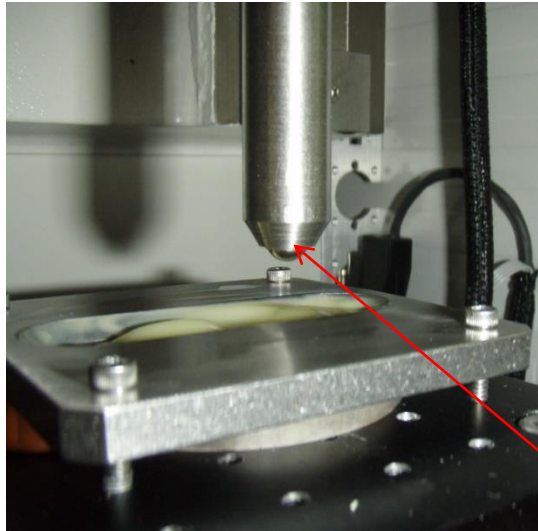


## Mechanismy tření:

- suché tření
- smíšené tření (občasný dotyk mikronerovností, přítomno mazivo)
- kapalinné tření (povrchy zcela odděleny vrstvou maziva)

# Experimentální data

**Tribologie:** CETR UMI Multi-Specimen Test System – Scratch Tester



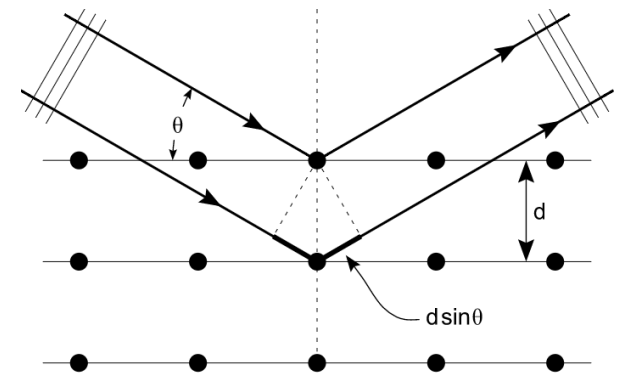
výměnný indentor – kulička o průměru 6.35mm

- definovaný nastavitelný přítlak 10 – 100N; měří sílu ve směru pohybu a **koeficient smykového tření**
- možnost dalším přístrojem vyhodnotit profil drážky, normalizované opotřebení (otěr)

**Zbytková napětí:** rentgenová difrakce

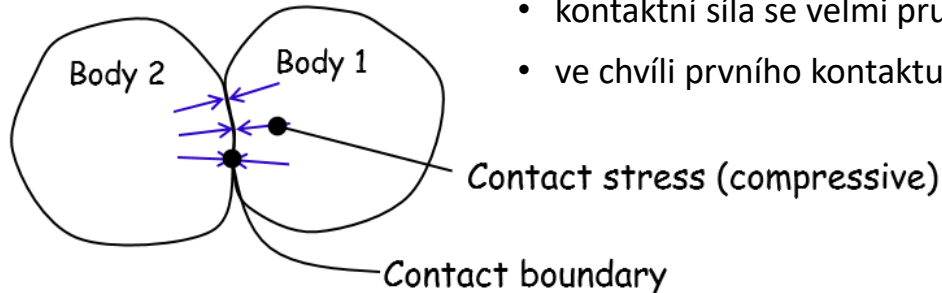
$$2 d \sin\theta = n \lambda$$

- dosah RTG: cca 2-5  $\mu\text{m}$  pod povrch
- zbytková napětí: cca 0.1 mm pod povrch
- měří elastickou deformaci; přepočítává na napětí
- stopa kuličky cca 0.1 mm, šířka záběru RTG asi 1 mm
- žíhaný stav: 10-50 MPa
- po tribologické zkoušce: 100-300 MPa

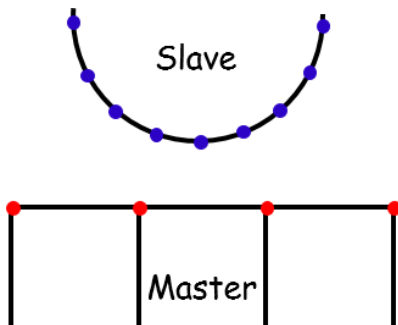
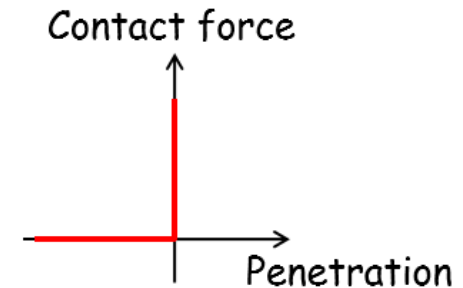


# Numerická simulace kontaktních úloh

Obrázky:  
Nam-Ho Kim,  
Finite Element Analysis of Contact Problem



- diskretizace geometrie – hranice oblasti po částech lineární (ostré rohy)
- výpočet kontaktních sil je velmi citlivý na lokální poloměr křivosti
- řešení s třením / bez tření

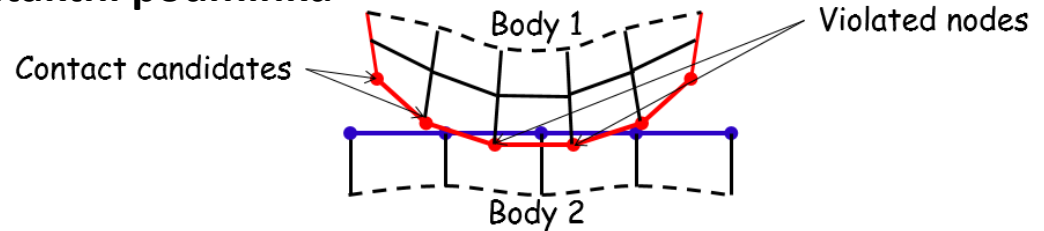


## Přístupy:

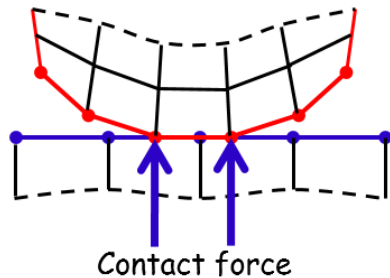
- geometrie těles – vyznačení částí hranic, kde může dojít ke kontaktu
- master: těleso s vyšším modulem, konkávní, hrubší síť
- slave: nižší modul, konvexní, jemnější síť
- kontaktní podmínka: slave nesmí penetrovat do mastera

# Numerická simulace kontaktních úloh

## 1. Vyhledání uzlů, které porušují kontaktní podmínku



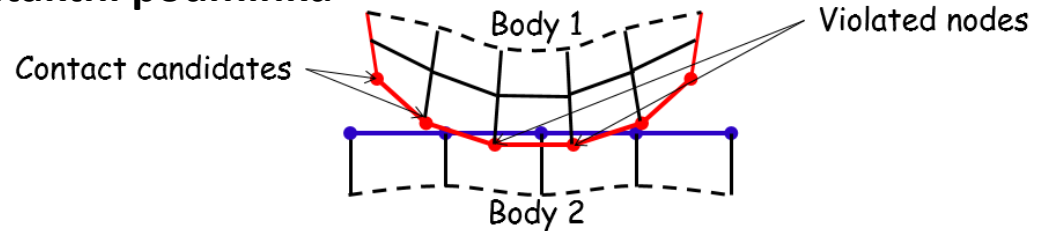
## 2. Nastavení kontaktní síly



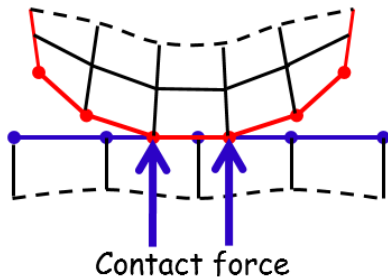
- Lagrangeovy multiplikátory (síla je nezávislá proměnná – multiplikátor, který zajistí neprostupnost těles)
- penalizační faktory (síla vypočtena z penetrace)

# Numerická simulace kontaktních úloh

## 1. Vyhledání uzlů, které porušují kontaktní podmínku



## 2. Nastavení kontaktní síly

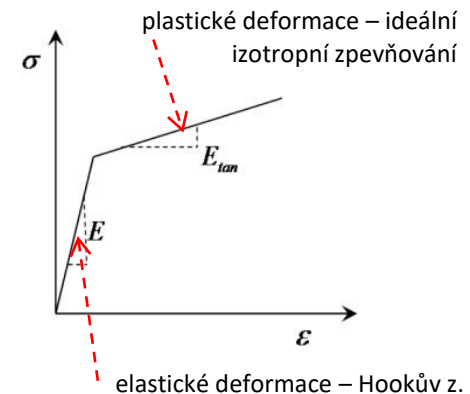


- Lagrangeovy multiplikátory (síla je nezávislá proměnná – multiplikátor, který zajistí neprostupnost těles)
- penalizační faktory (síla vypočtena z penetrace)

## Implementace COMSOL :

- verze 5.3
- moduly:
  - Structural Mechanics (lineární elasticita, kontakt)
  - Nonlinear Structural Materials (plasticita, kontakt)
- úlohy 2D/2D axisymetrická

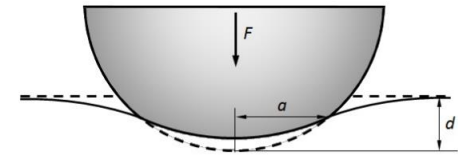
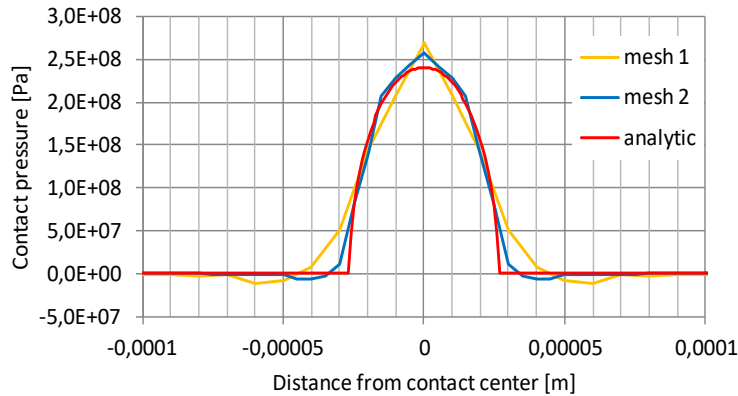
- augmented Lagrangian
- penalty method



# Benchmark 1,2

Vtláčení kuličky / válce do podložky – **elastický** kontakt bez tření

**Hertzova teorie kontaktu – analytické řešení:**



$$E^* = \left( \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \right)^{-1}$$

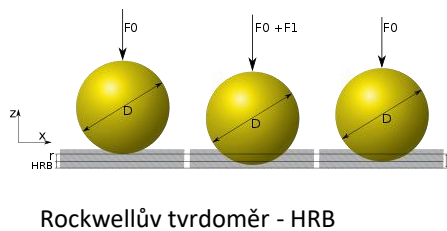
$$p_{max} = \sqrt{\frac{E^* F}{\pi L R}}$$

$$d = \frac{4 F}{\pi E^* L}$$

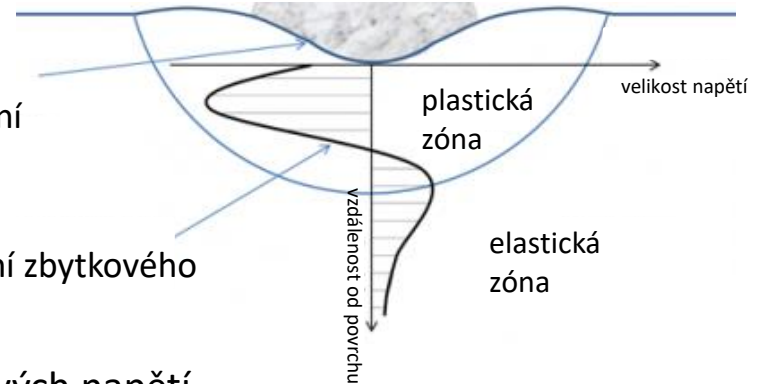
$$A = \sqrt{R d}$$

$$p(r) = p_{max} \sqrt{1 - \frac{r^2}{a^2}}$$

Vtláčení ocelové kuličky o průměru 6 mm do ocelové podložky – **elastoplastický** kontakt



Rockwellův tvrdoměr - HRB



kontaktní plocha

rozložení zbytkového napětí

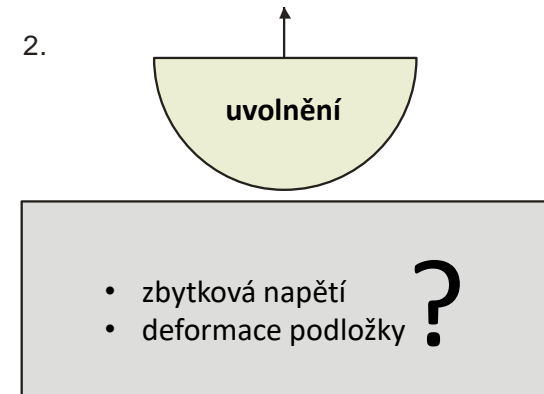
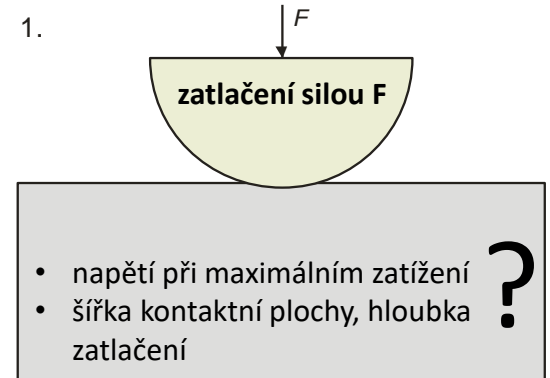
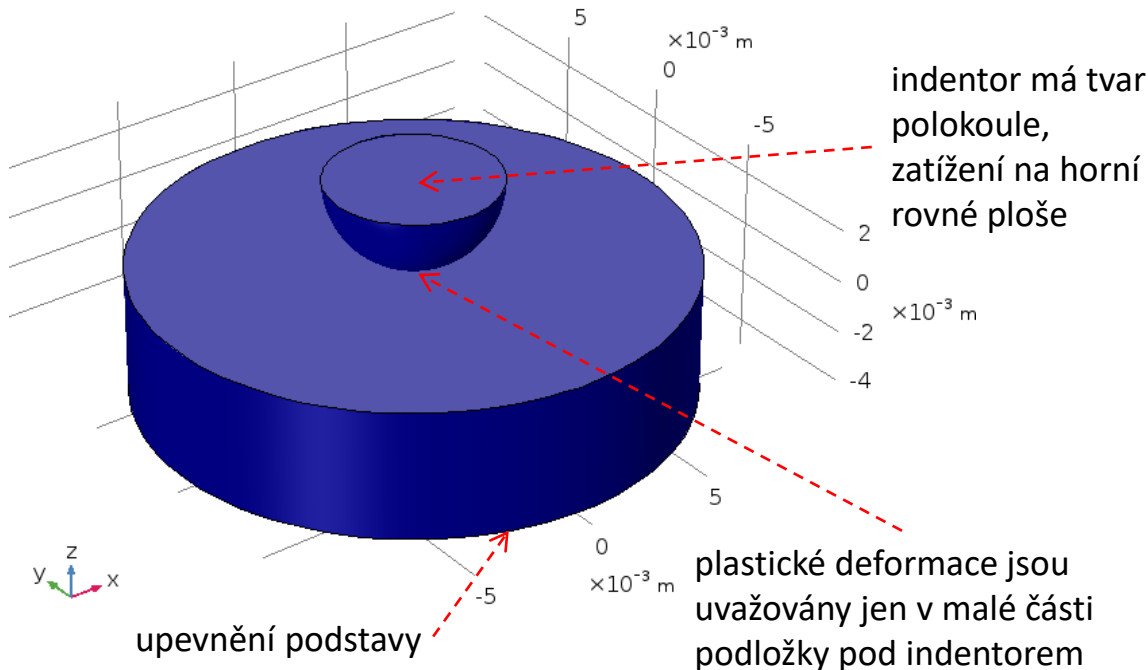
plastická zóna

elastická zóna

- měření a numerická simulace zbytkových napětí

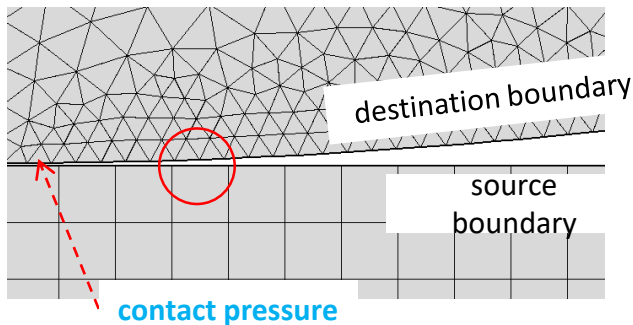
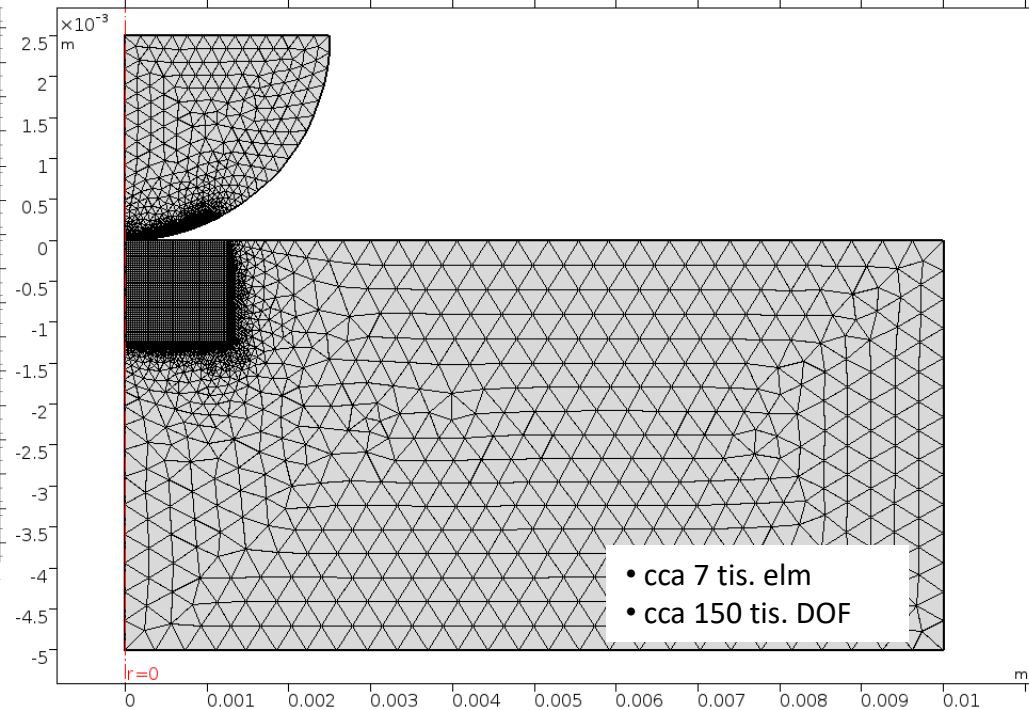
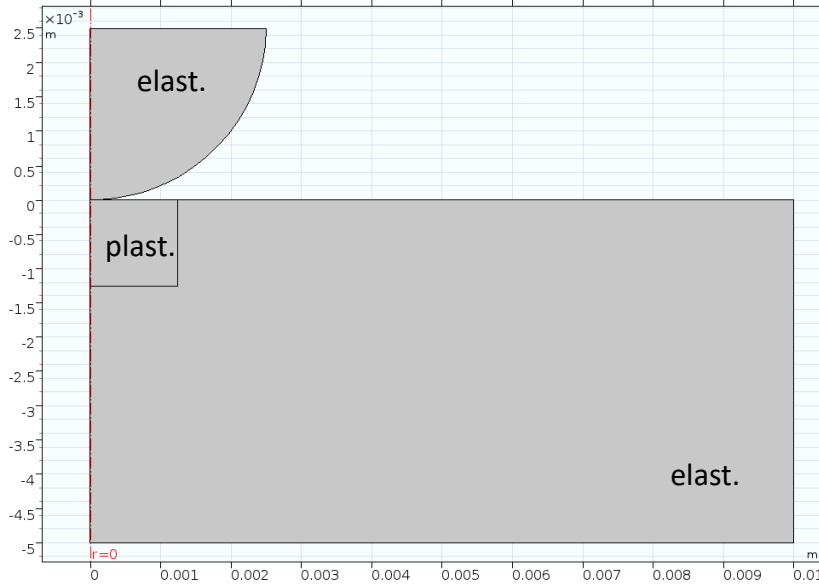
# Benchmark 2

## 2D axisymetrická úloha

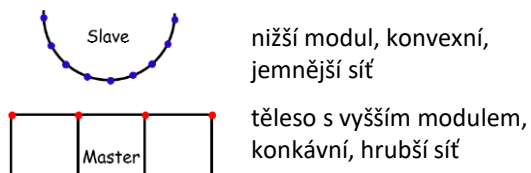


- indentor: ocel  $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ , bez plasticity (nekonečně vysoká mez kluzu)
- podložka: ocel 12050 ( $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.3$ , elastoplastická s mezí kluzu  $\sigma_k = 750 \text{ MPa}$ , izotropním modelem plasticity a tečným modulem  $E_t = 21 \text{ GPa}$ )

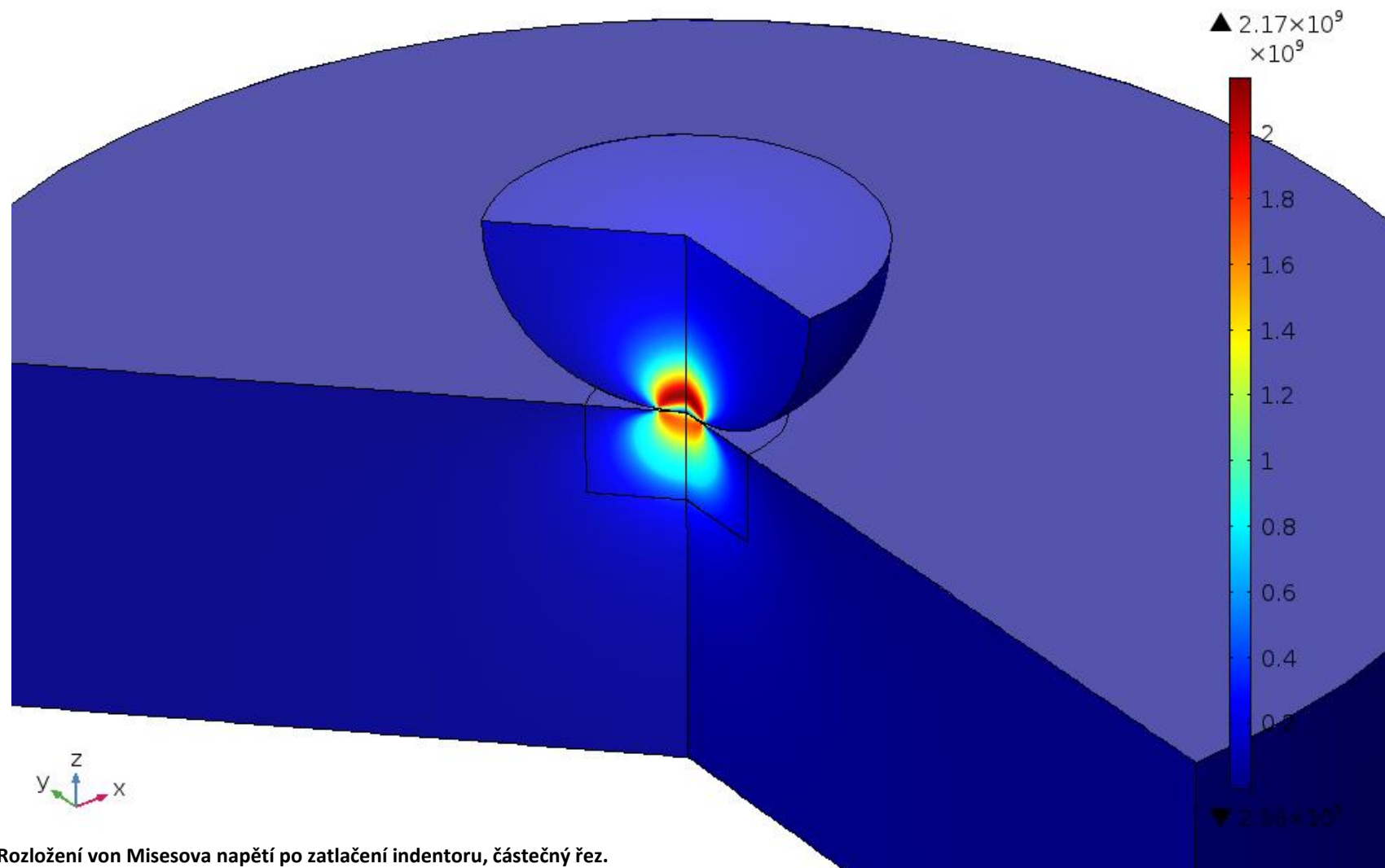




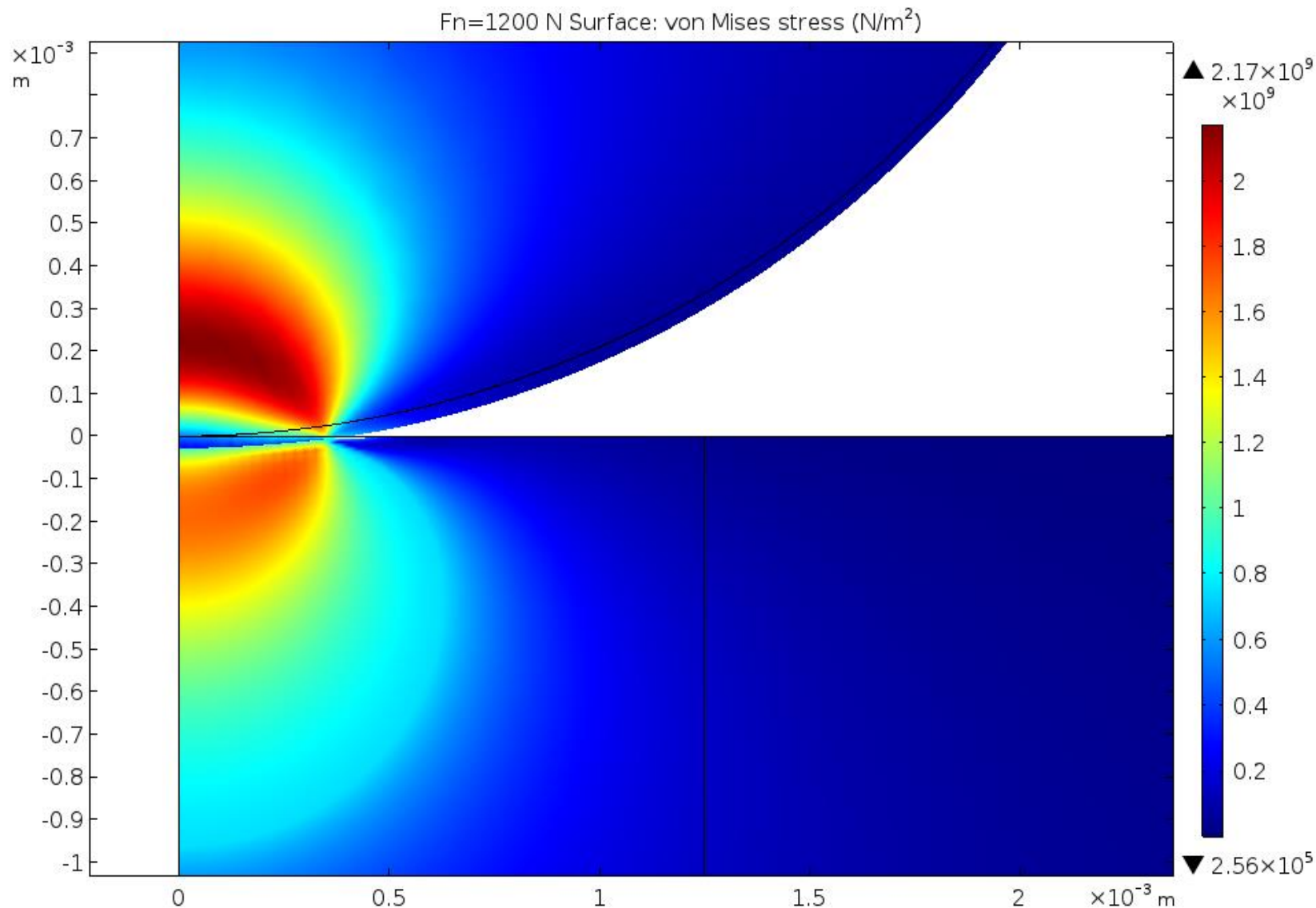
- master/slave vs. source/destination
- zatlačení: nutnost postupného náběhu síly (*auxiliary sweep*)
- čas výpočtu jedné úlohy cca 15 min.
- stabilita závisí na
  - počátečním odstupu
  - počátečním kontaktním tlaku
  - konfiguraci sítě
- odlehčení: předepsáním posunutí



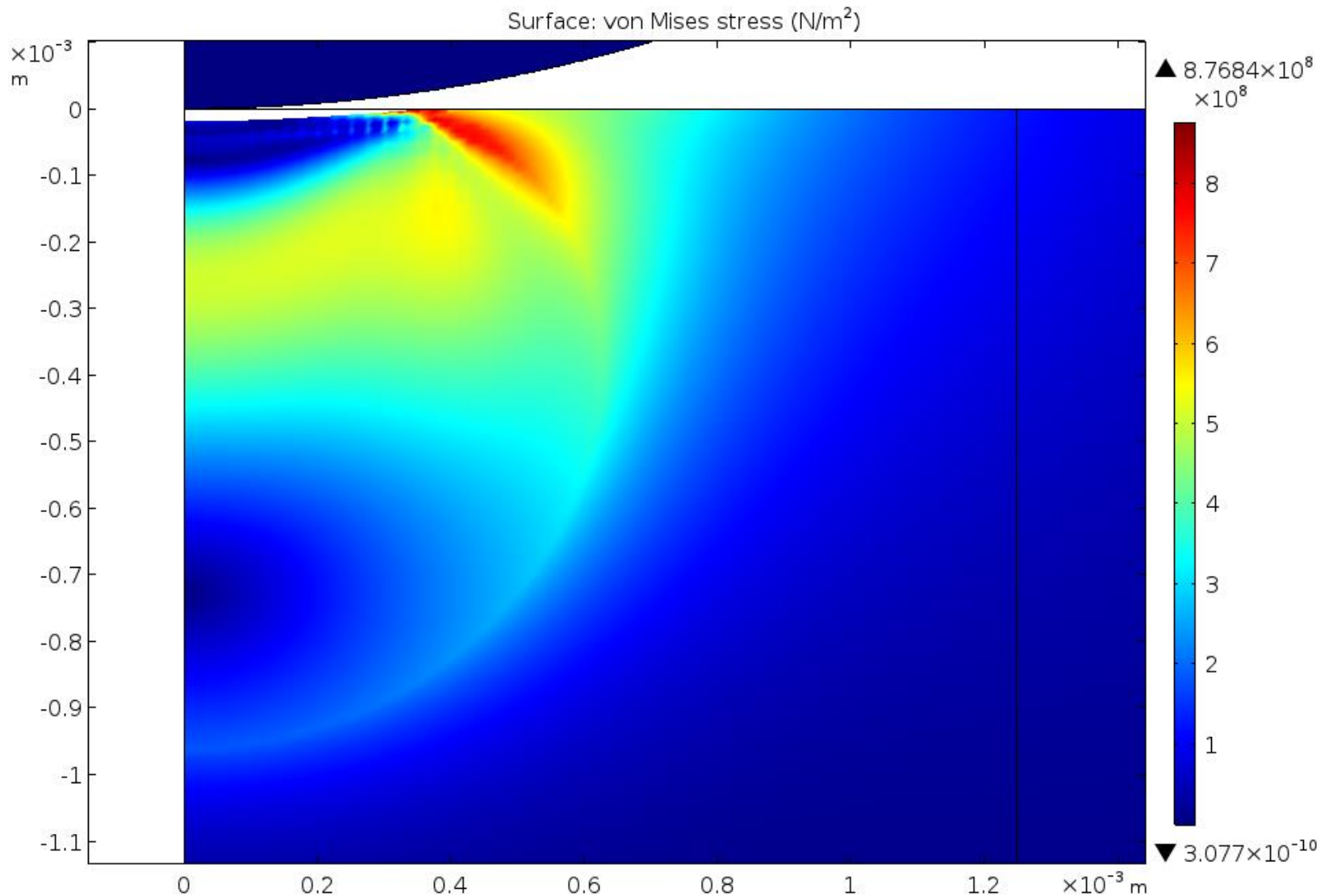
$F_n=1200$  N Surface: von Mises stress (N/m<sup>2</sup>)



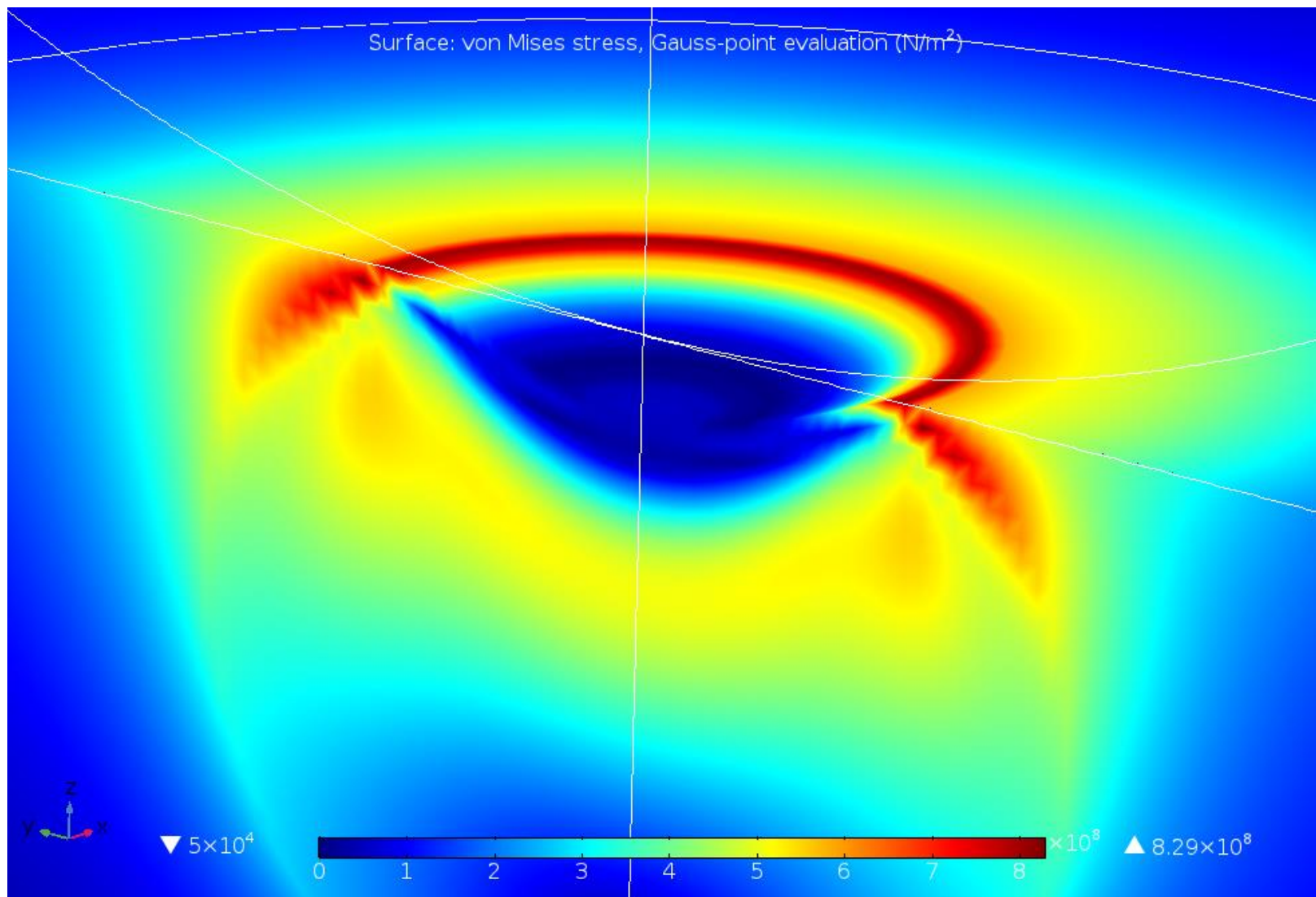
Rozložení von Misesova napětí po zatlačení indentoru, částečný řez.



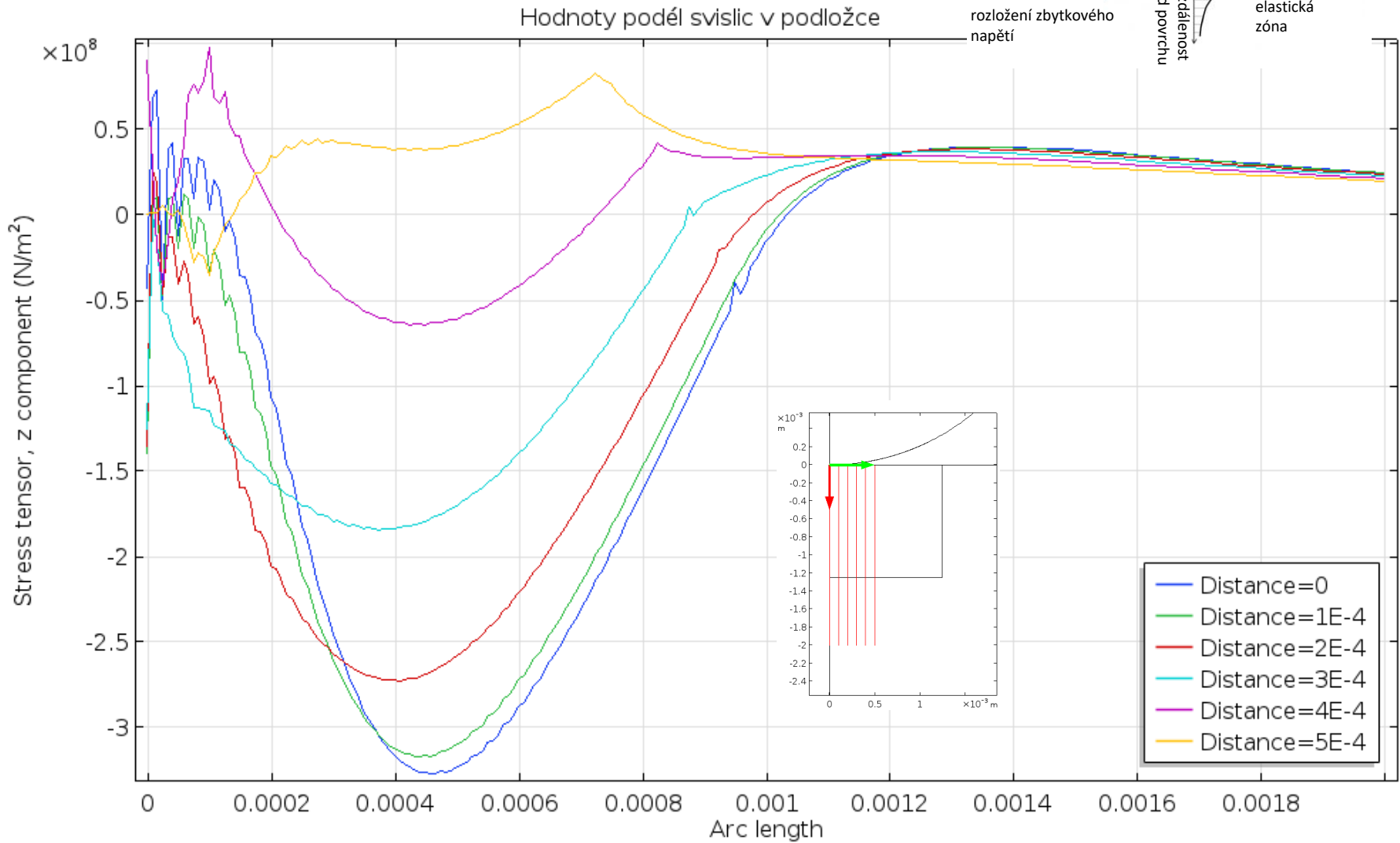
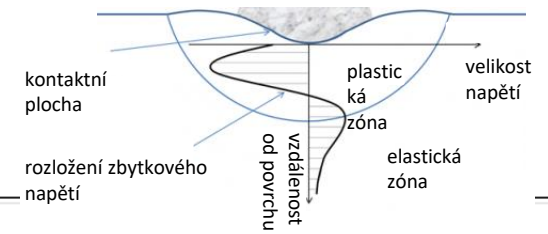
Detail rozložení von Misesova napětí po zatlačení indentoru, svislý řez v okolí kontaktu se znázorněním deformace.



Rozložení von Misesova napětí v podložce po uvolnění indentoru, svislý řez v okolí kontaktu se znázorněním deformace.

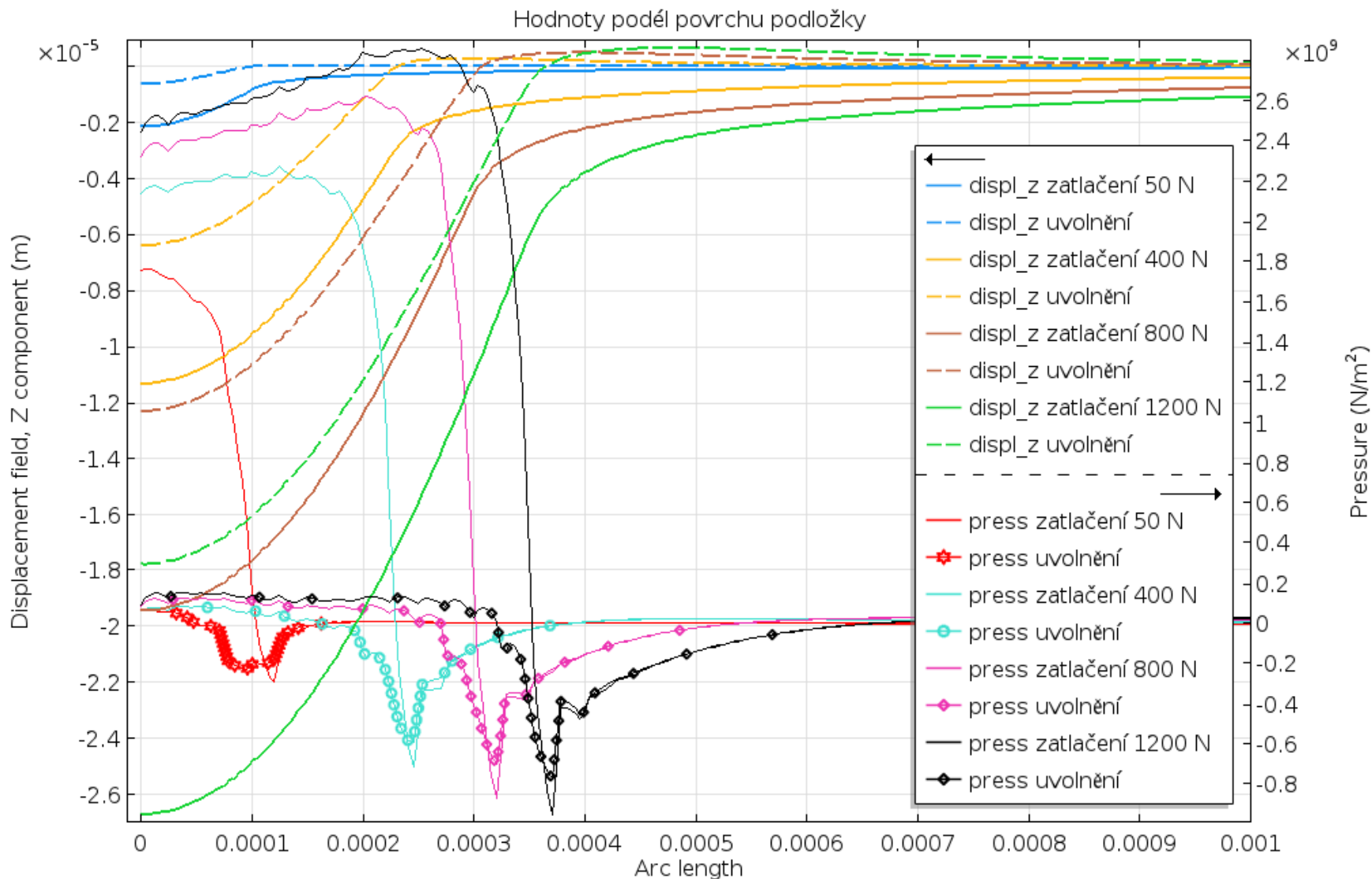


Detail rozložení von Misesova napětí v podložce po uvolnění indentoru, svislý řez v okolí kontaktu se znázorněním deformace (5x zvětšená).



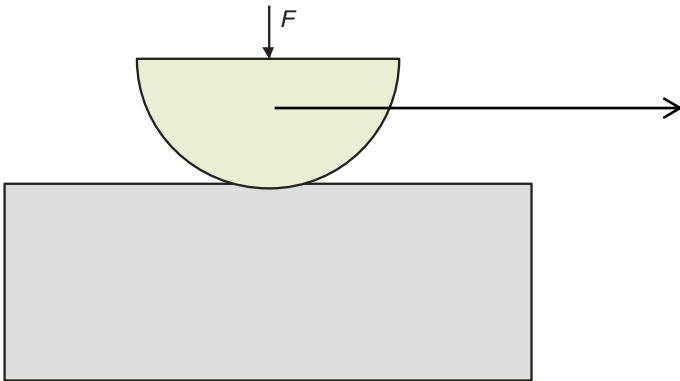
Průběhy svislé složky zbytkového elastického napětí podél svislých úsečků v různé vzdálenosti od osy symetrie.





Průběhy posunutí a tlaku podél povrchu podložky při zatlačení a uvolnění pro různé stupně zatížení.

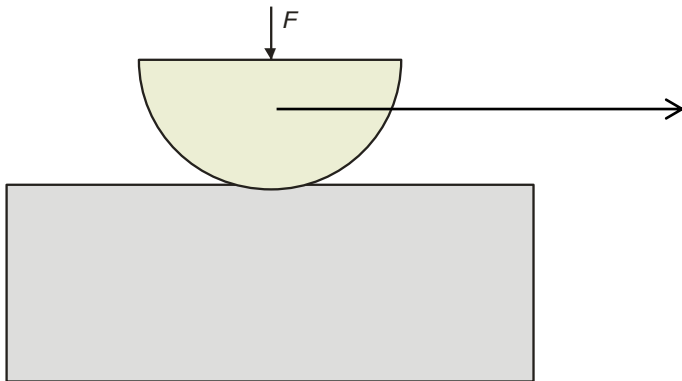
# Benchmark 3



- 2D axisym.
- 2D



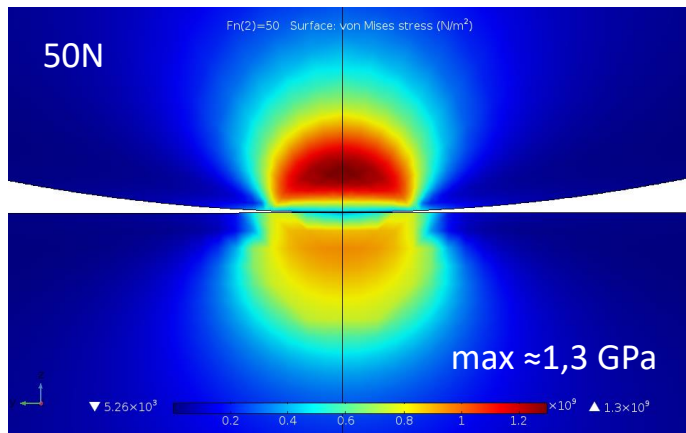
# Benchmark 3



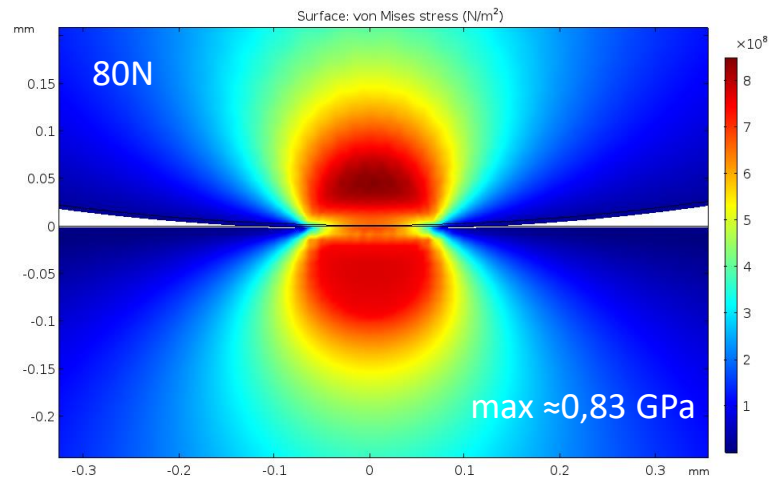
- ~~2D axisym.~~
- 2D

**2D ≠ 2D axisym.**

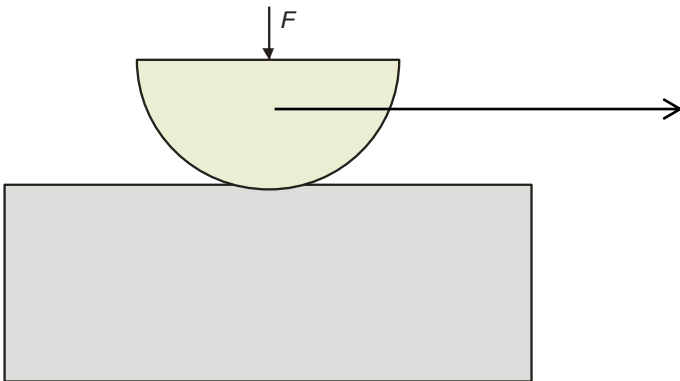
2D axisym.



2D



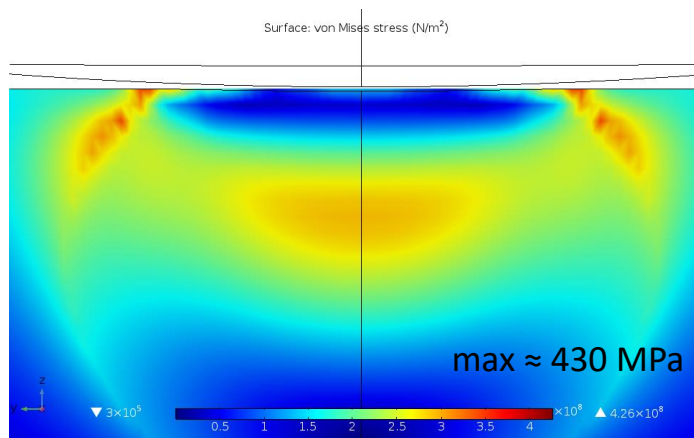
# Benchmark 3



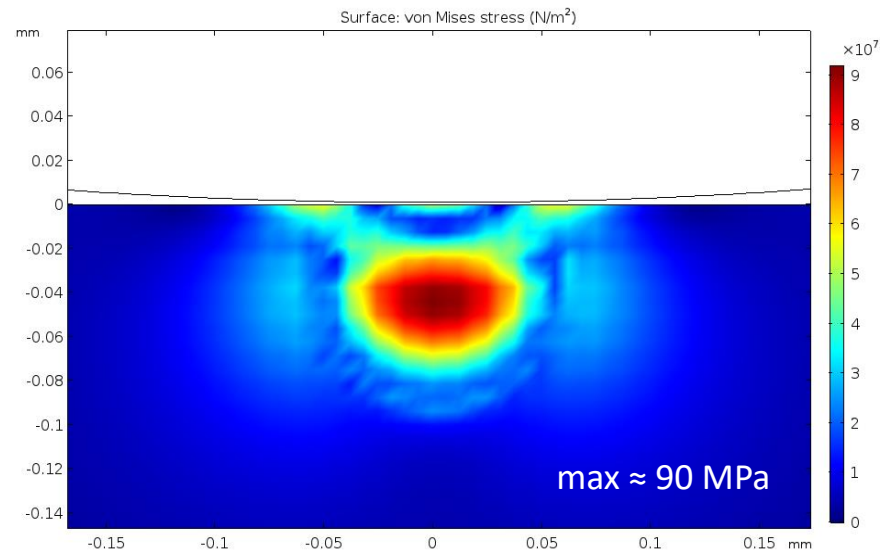
- ~~2D axisym.~~
- 2D

**2D  $\neq$  2D axisym.**

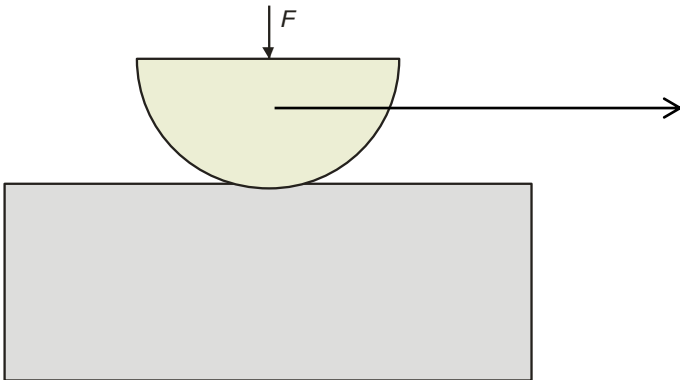
2D axisym.



2D



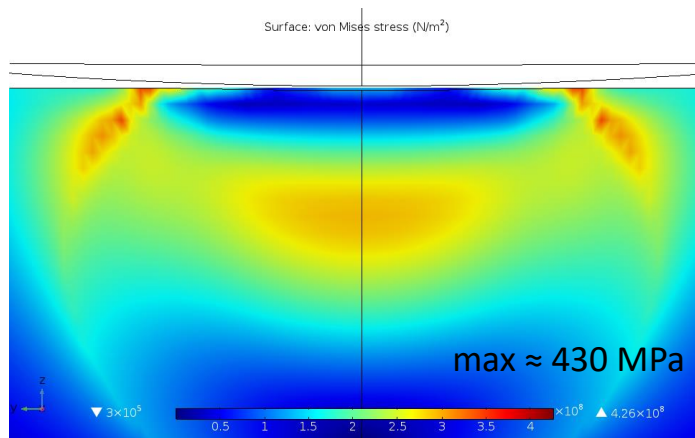
# Benchmark 3



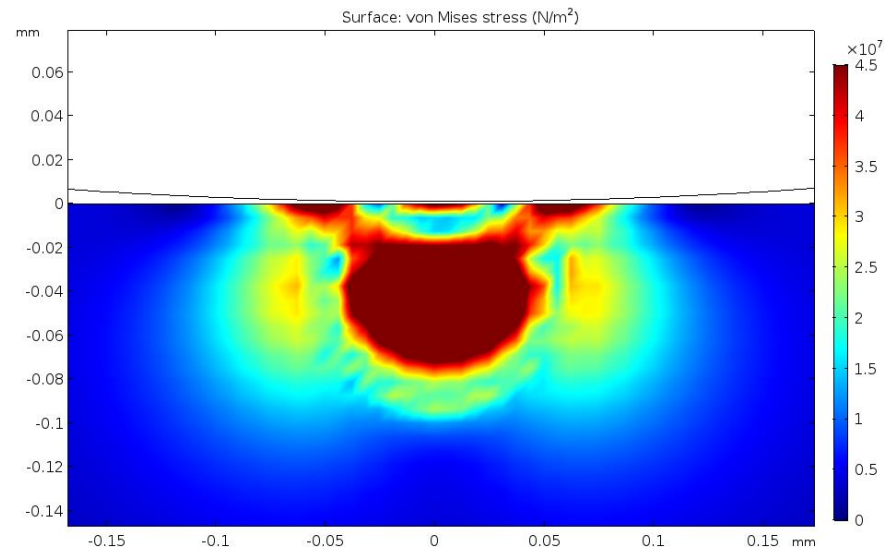
- 2D axisym.
- 2D

2D  $\neq$  2D axisym.

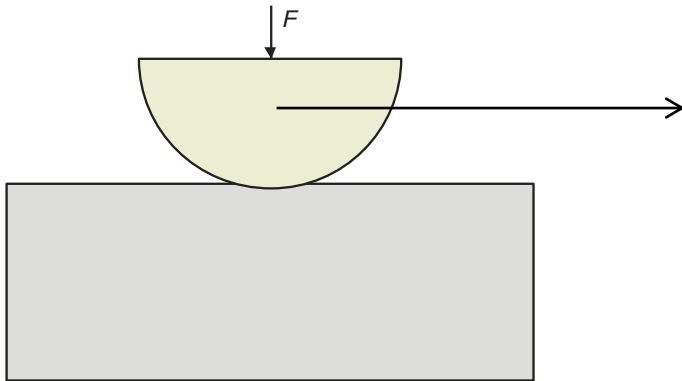
2D axisym.



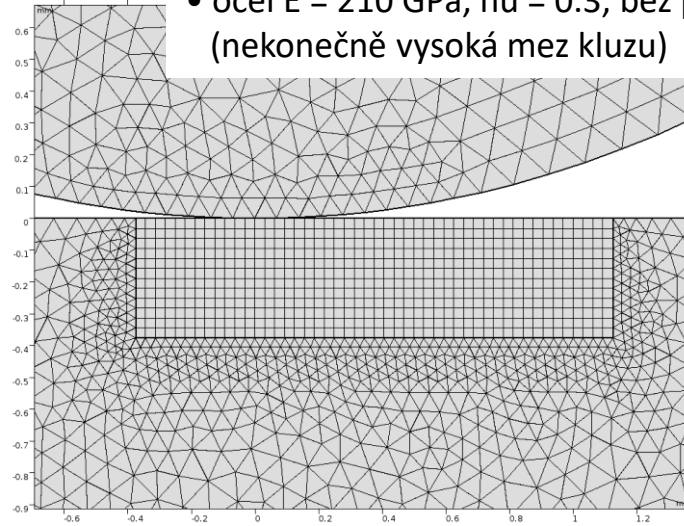
2D



# Benchmark 3

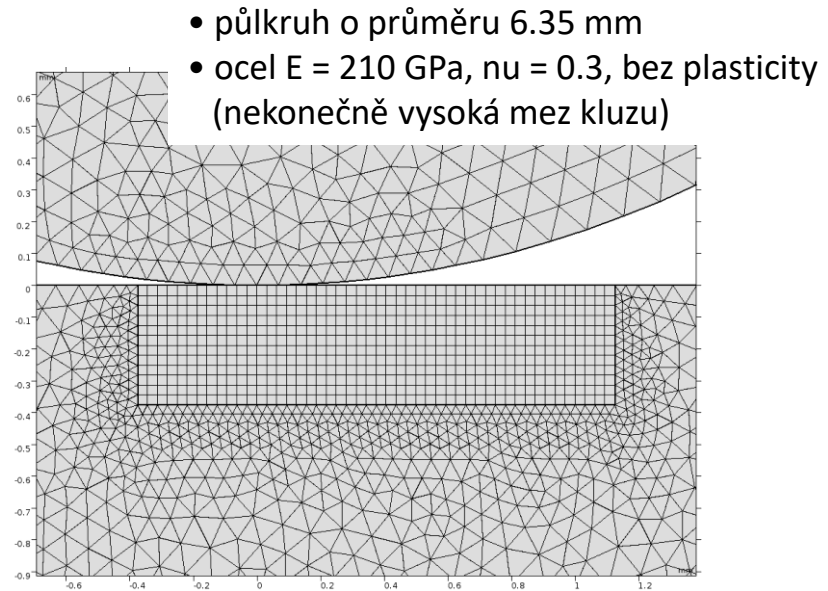
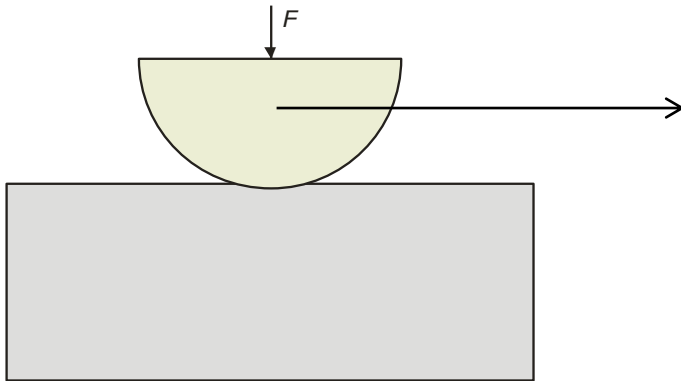


- půlkruh o průměru 6.35 mm
- ocel  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ , bez plasticity (nekonečně vysoká mez kluzu)



- podložka: obdélník 10 x 5 mm
- ocel 12050 ( $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ , elastoplastická s mezí kluzu  $\sigma_k = 470$  MPa, izotropním modelem plasticity a tečným modulem  $E_t = 21$  GPa)
- 16 tisíc elementů, 500tis DOF

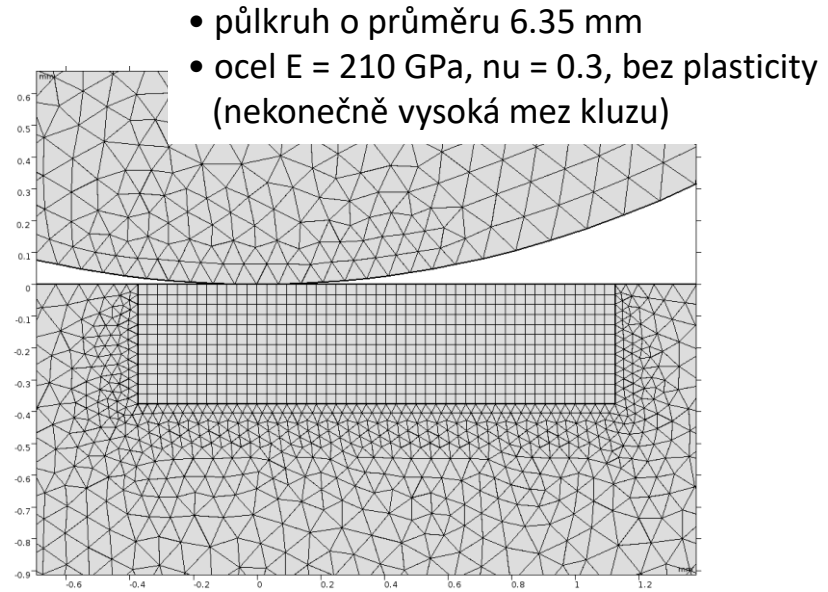
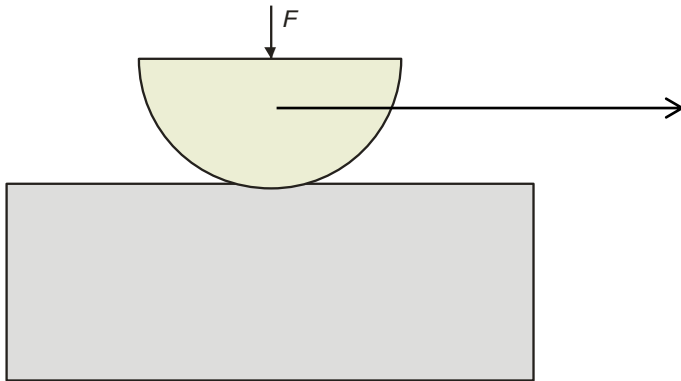
# Benchmark 3



Jak vůbec nastavit úlohu?

- *stabilita výpočtu*
- *počáteční kontaktní tlak*
- *time dependent*
- *síla*
- *bez tření / se třením*

- podložka: obdélník 10 x 5 mm
- ocel 12050 ( $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ , elastoplastická s mezí kluzu  $\sigma_k = 470$  MPa, izotropním modelem plasticity a tečným modulem  $E_t = 21$  GPa)
- 16 tisíc elementů, 500tis DOF



Jak vůbec nastavit úlohu?

- *stabilita výpočtu*
- *počáteční kontaktní tlak*
- ~~*time dependent*~~
- ~~*síla*~~
- ~~*bez tření / se třením*~~

- půlkruh o průměru 6.35 mm
- ocel  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ , bez plasticity (nekonečně vysoká mez kluzu)
- podložka: obdélník 10 x 5 mm
- ocel 12050 ( $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ , elastoplastická s mezí kluzu  $\sigma_k = 470$  MPa, izotropním modelem plasticity a tečným modulem  $E_t = 21$  GPa)
- 16 tisíc elementů, 500tis DOF

- statická úloha → síla → vertikální posunutí
- místo pohybu: přískoky vpřed = auxilliary sweep
- jak ale zahrnout tření? → reakční horizontální síla

## Nastavení:

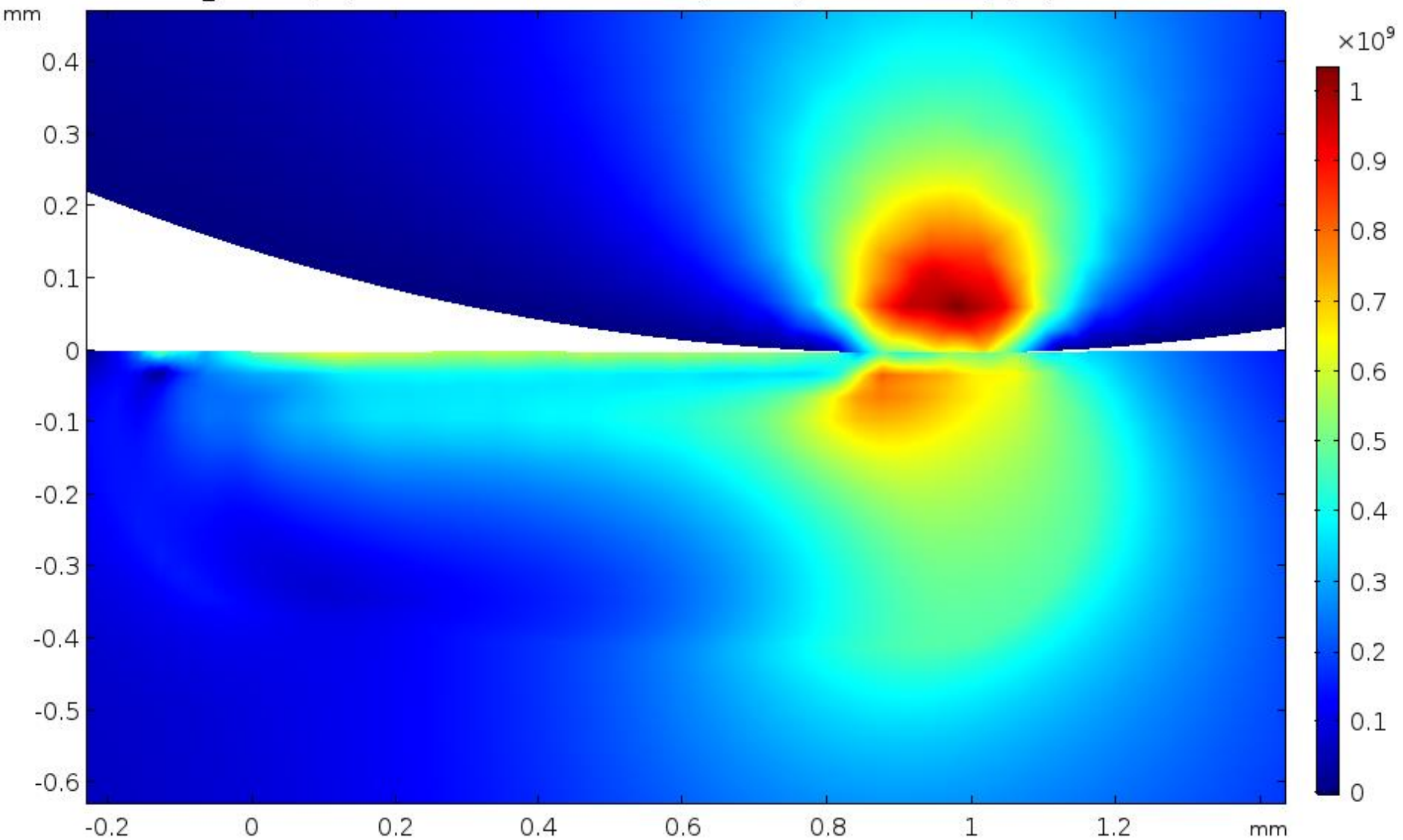
- 2D simulace pro případ rovinné deformace (tj. ekvivalent nekonečně dlouhého půlválce vtlačovaného do nekonečně dlouhého kvádru)
- postup simulace:
  - zatlačení indentoru do podložky (7  $\mu\text{m}$  – odpovídá síle 258-288 N)
  - posun ve směru x o 0.95 mm (vypočteno asi ve 40 krocích)
  - zdvižení indentoru

## Vyhodnocené veličiny:

- oktahedrání von Misesovo napětí během posunu indentoru
- složka napětí  $\sigma_{xx}$  během posunu indentoru
- průběh reakční síly ve směru y během posunu – odpovídá síle, kterou je indenter zatlačen do podložky
- reziduální napětí v podložce po odlehčení – napětí  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$ , von Misesovo napětí
- průběh reziduálního napětí  $\sigma_{yy}$  podél čáry jdoucí osou indentoru v poloze x = 0.95 mm

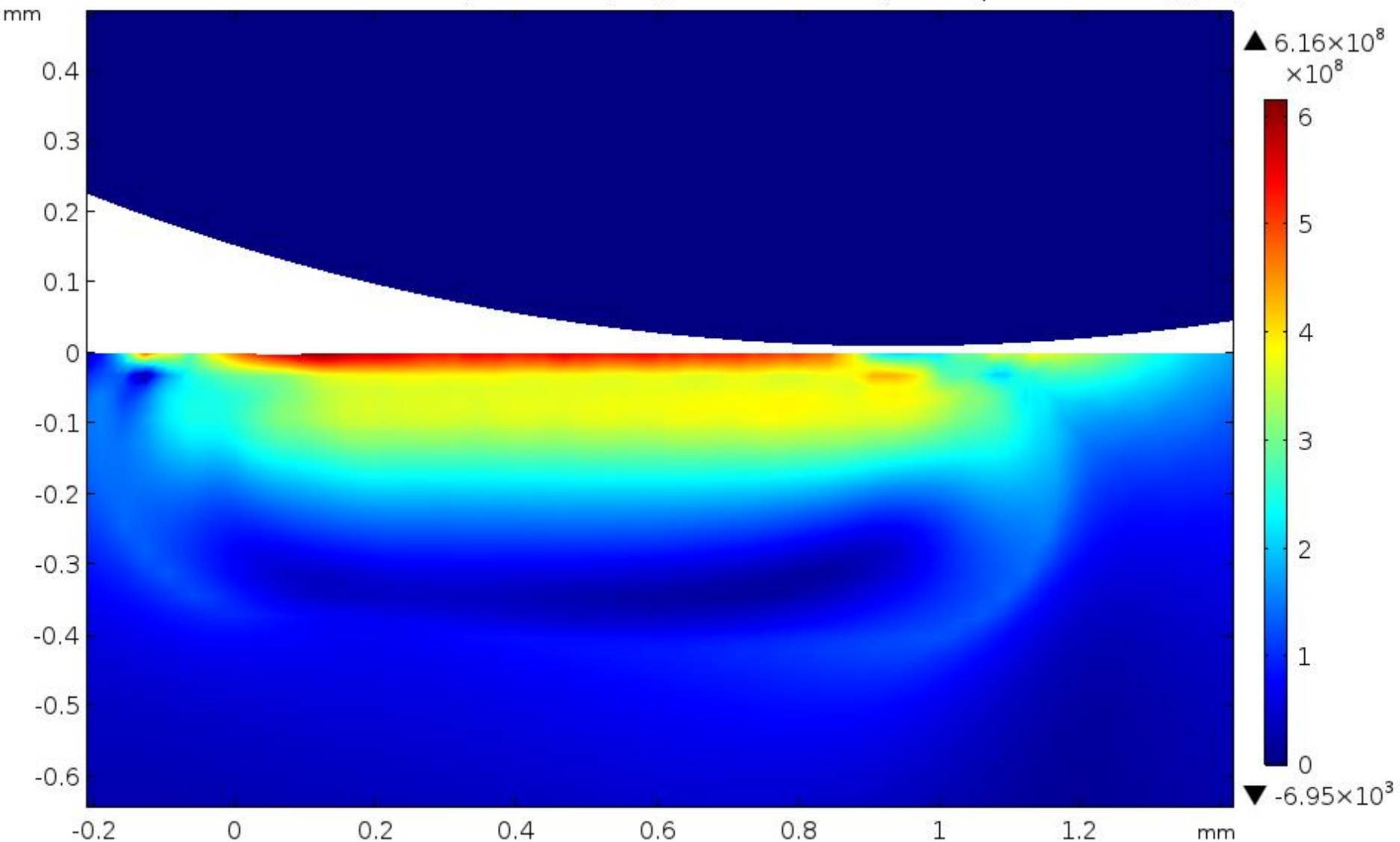


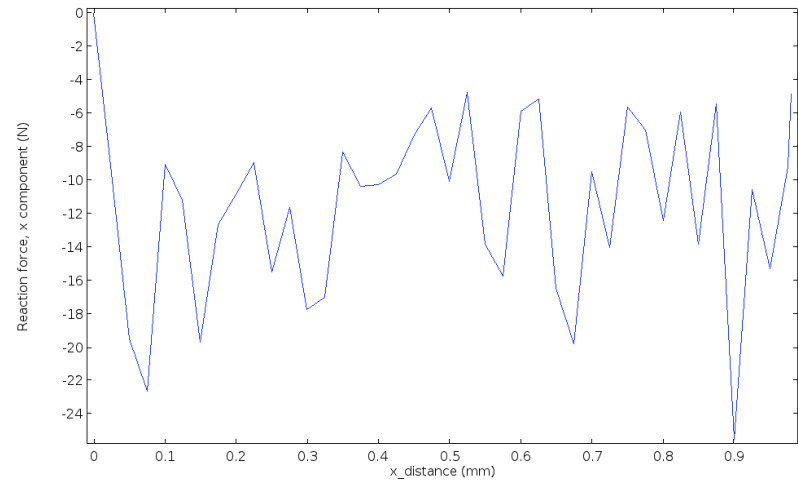
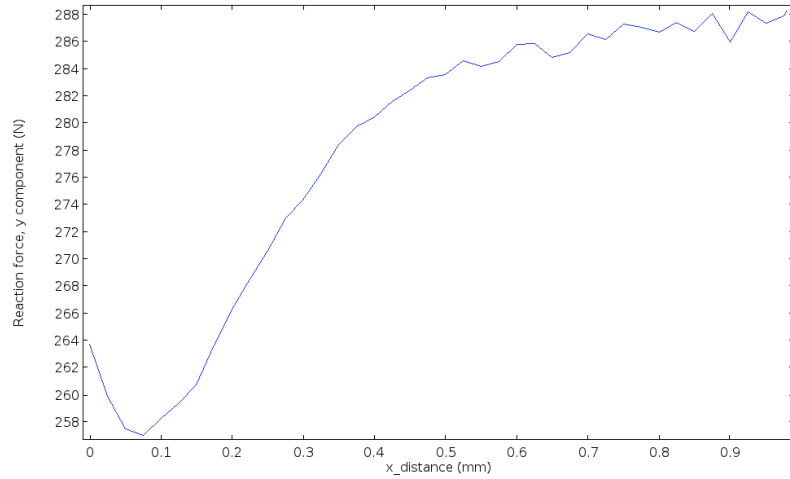
x\_distance(39)=0.95 mm von Mises stress, Gauss-point evaluation (N/m<sup>2</sup>) - NO FRICTION



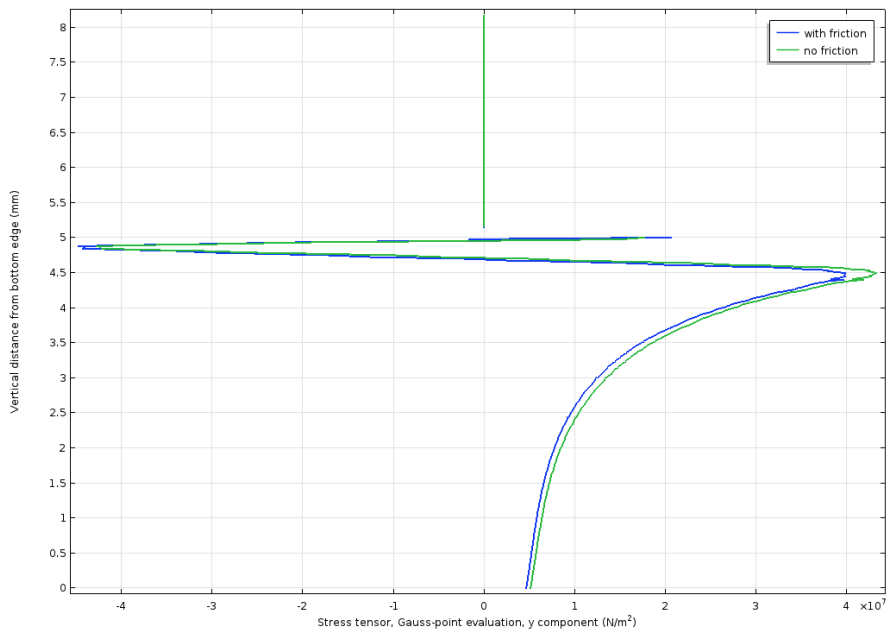


Data set=St2 - unloaded, no friction (sol2) von Mises stress, Gauss-point evaluation (N/m<sup>2</sup>)





Vertical residual stress profile at x=0.95 (y-component)



s105-stress\_x-no\_friction.avi



s105-vonMises-no\_friction.avi



# ZÁVĚR

## Pozitiva

- model dává očekávané výsledky

## Problémy a nejasnosti

- výpočetní náročnost, stabilita
- jaký použít model plasticity
- jak je reálná 3D kontaktní úloha s posunutím indentoru?
- (a ještě k tomu časově proměnná)
- penalty method překvapivě stabilnější než augmented Lagrangian
  
- materiálová data
- přesnost měření (dána použitou metodikou) zatím(?) omezuje validaci modelu