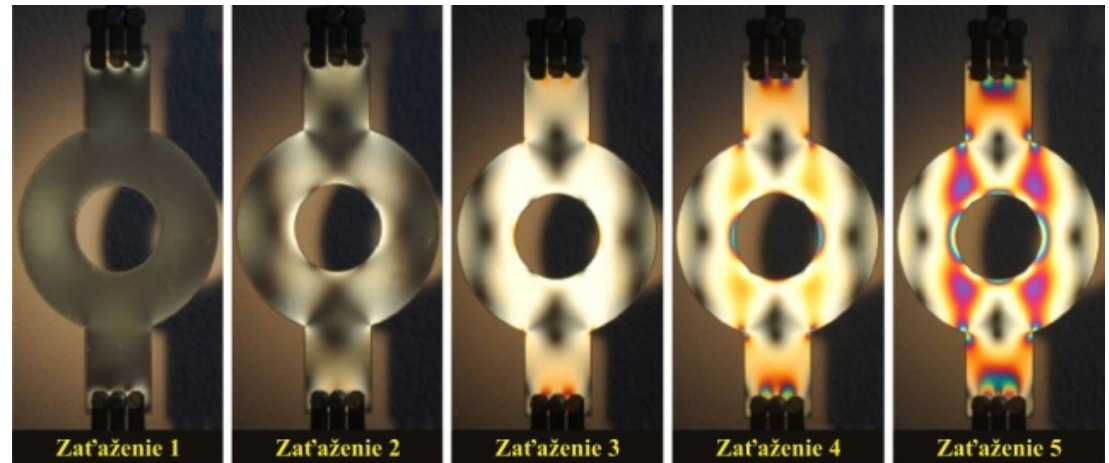
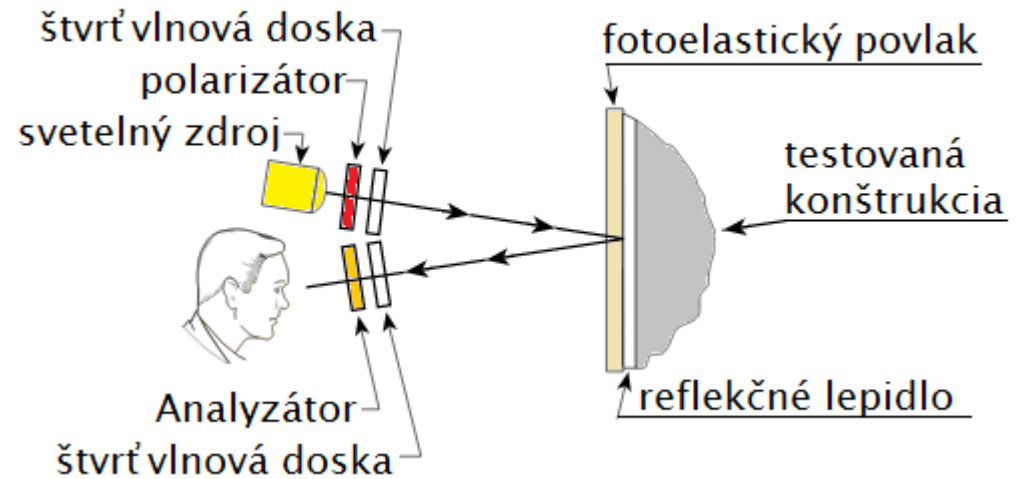


prof. Ing. Vladimír Chmelko, PhD.

## **Meranie napätí**

- photostress
- digital image correlation method (DIC) for strain measuring
- fiber optic strain sensing (FBG)
- ESPI – Electronic Spekle Pattern Interferometry
- vibrating string gauges (VSG)
- strain gauges

# Photostress

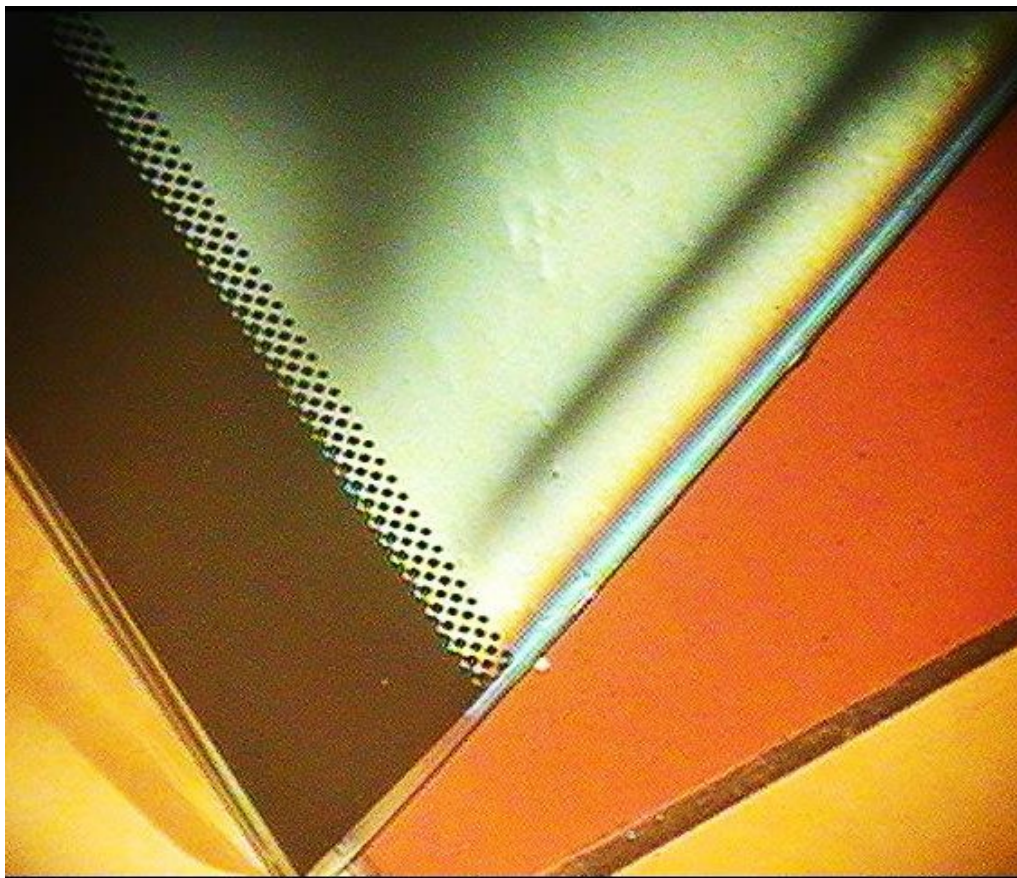


- Problémy:**
- konštantnosť hrúbky reflexnej fólie
  - prispôsobenie sa fólie tvaru súčiastky
  - nalepenie fólie na povrch

Farba	beam path displacement (nm)	Napätie Stress (MPa)
Čierna (Black)	0	0
Modro šedá (Blue gray)	160	7
Biela (White)	260	11
Bielo žltá (whiteyellow)	270-300	12
Svetlo žltá (light yellow	300	13
Červeno oranžová (red-orange)	500	21
Červená (red)	530	22,5
Fialová (violet)	570	25
Blankytne modrá (brigth blue)	660	28



0°C



22°C

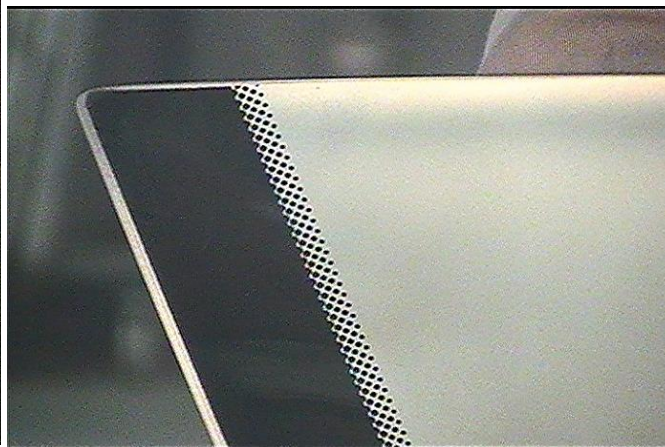




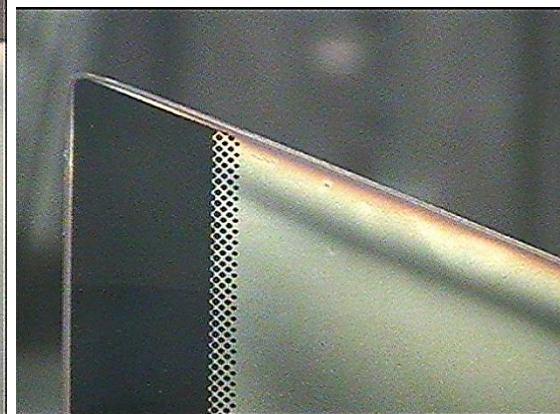
**VNÚTORNÉ**



**VONKAJŠIE**



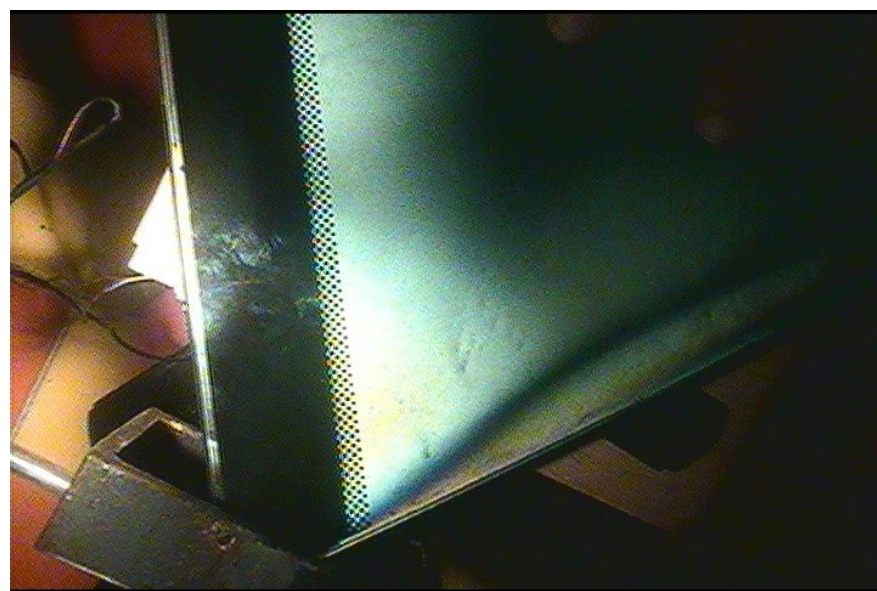
**ZLEPENÉ**



**20 kg**

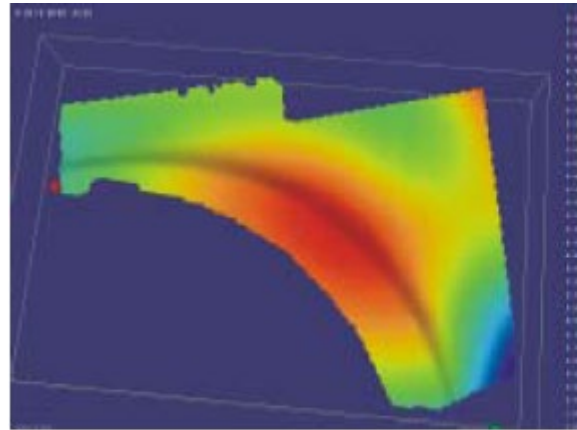
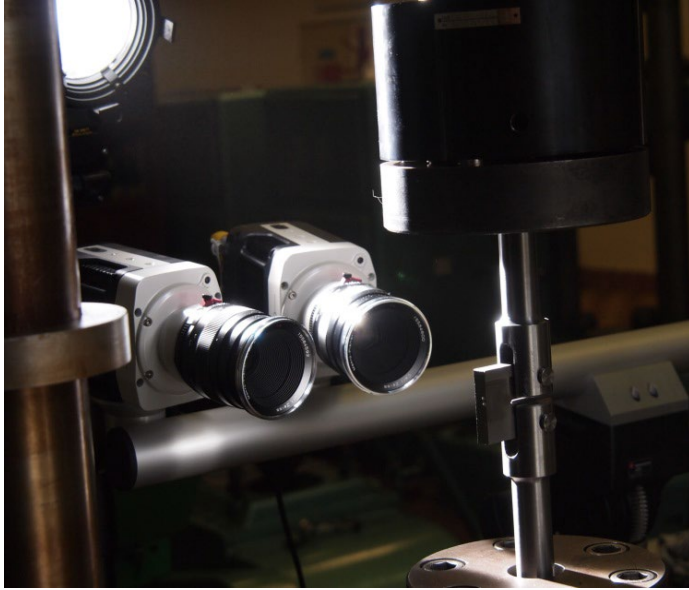


**30 kg**

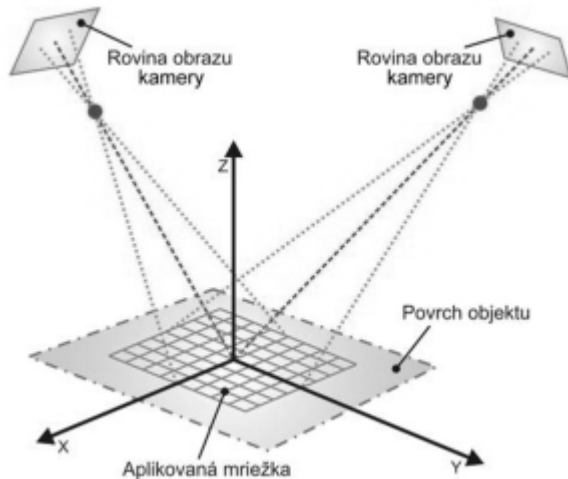




# DIC (Digital Image Correlation)



*Deformation analysis on the corner of a helicopter structure (carbon fibre reinforced plastics)*



$$\sum_{x,y} (G_t(x_t, y_t) - G(x, y))^2$$

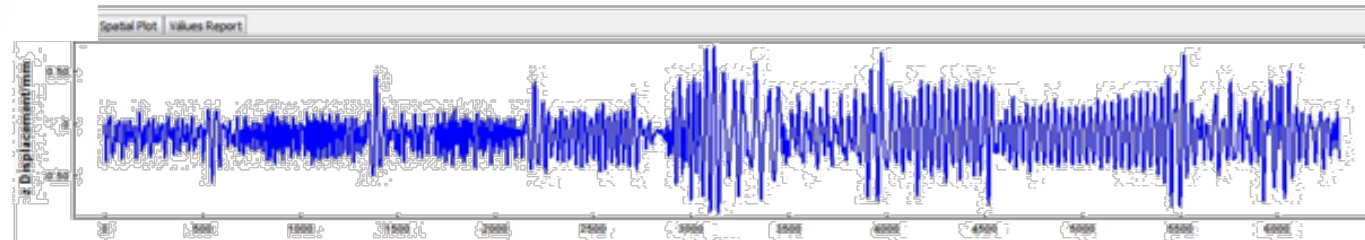
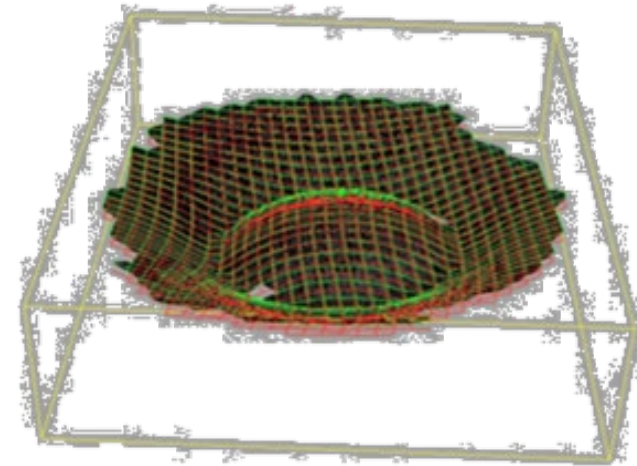
$$G_t(x_t, y_t) = g_0 + g_1 G(x_t, y_t)$$

$$x_1 = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy$$

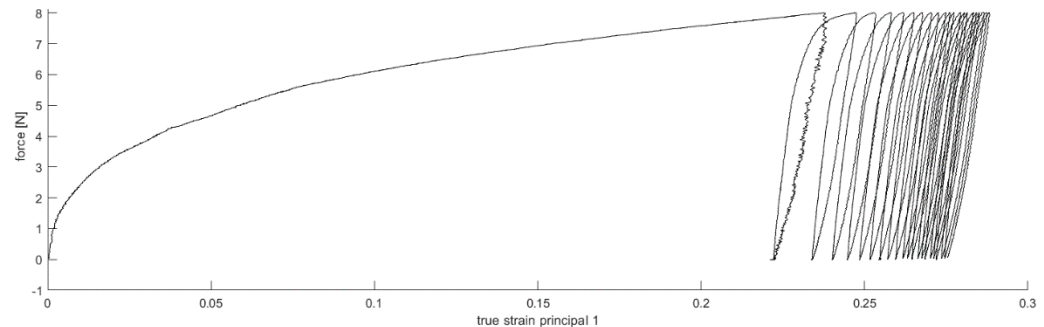
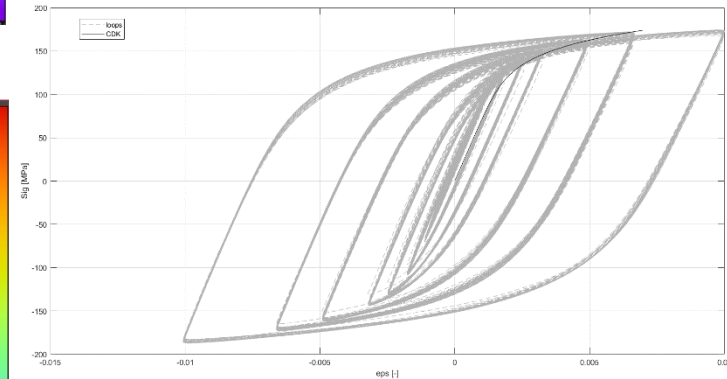
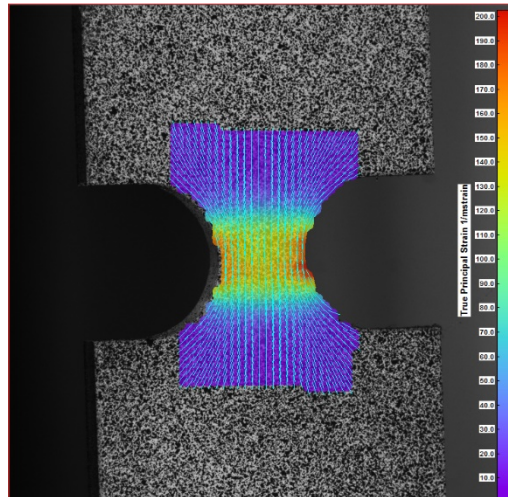
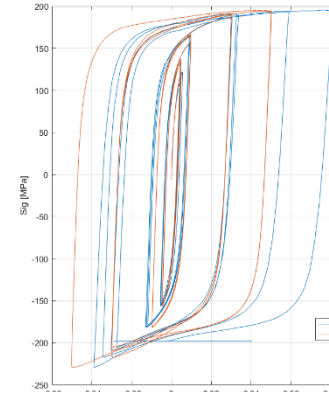
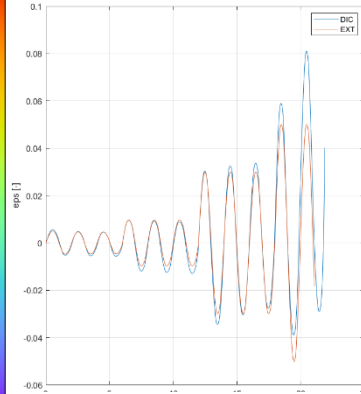
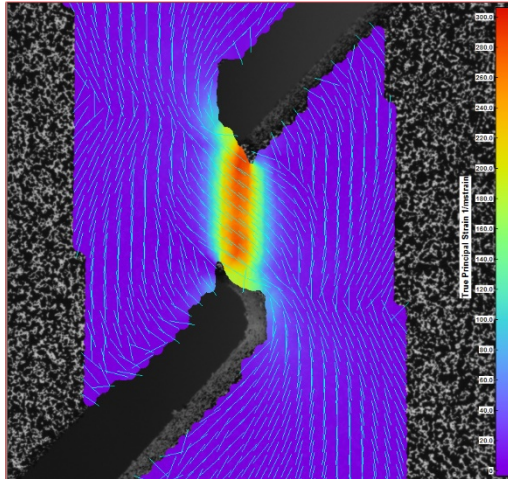
$$y_1 = a_4 + a_5 x + a_6 y + a_7 xy$$

## Problémy:

- vytvorenie bodov na povrchu
- rozlíšenie a optika

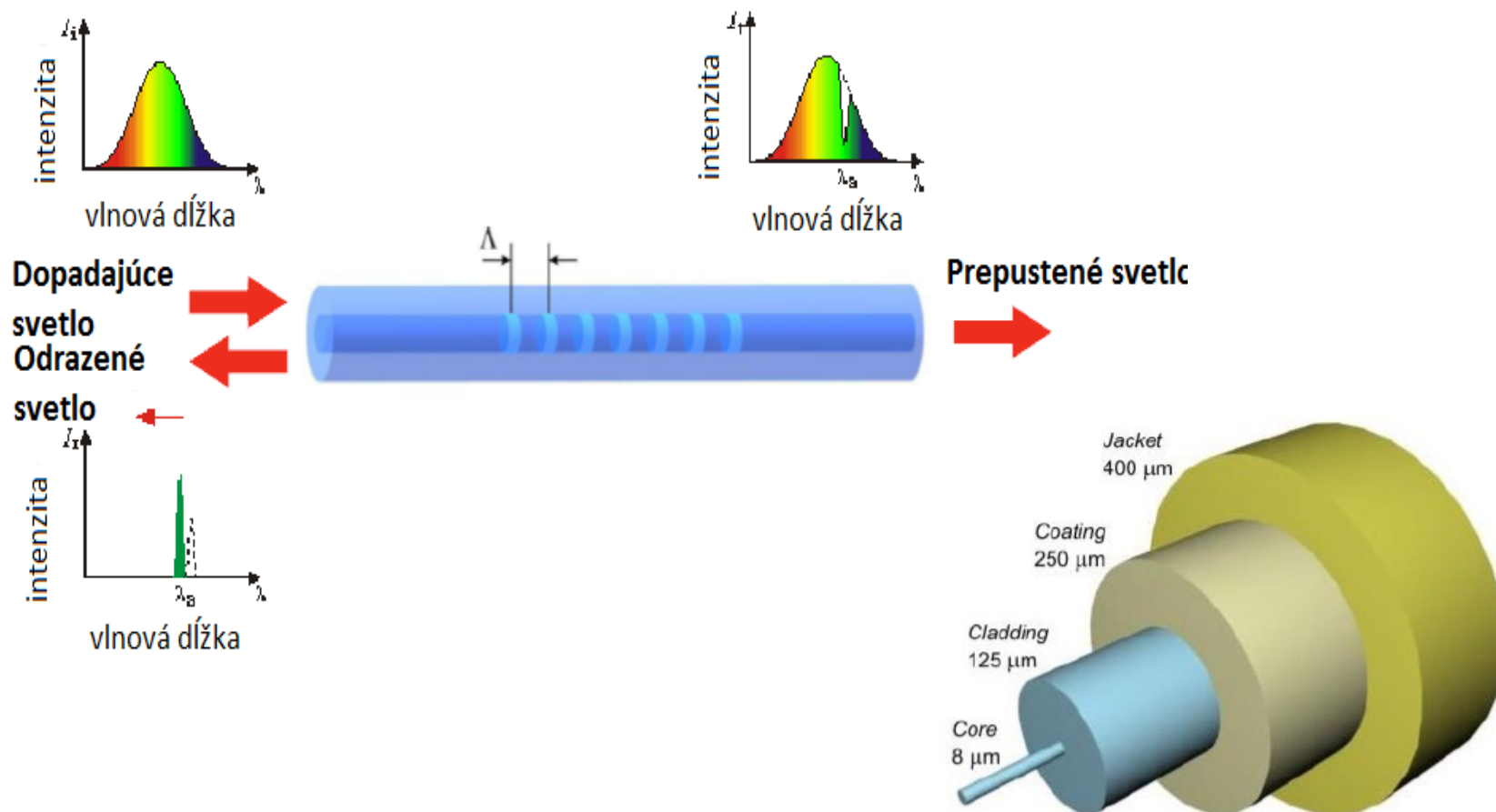


# DIC (Digital Image Correlation)



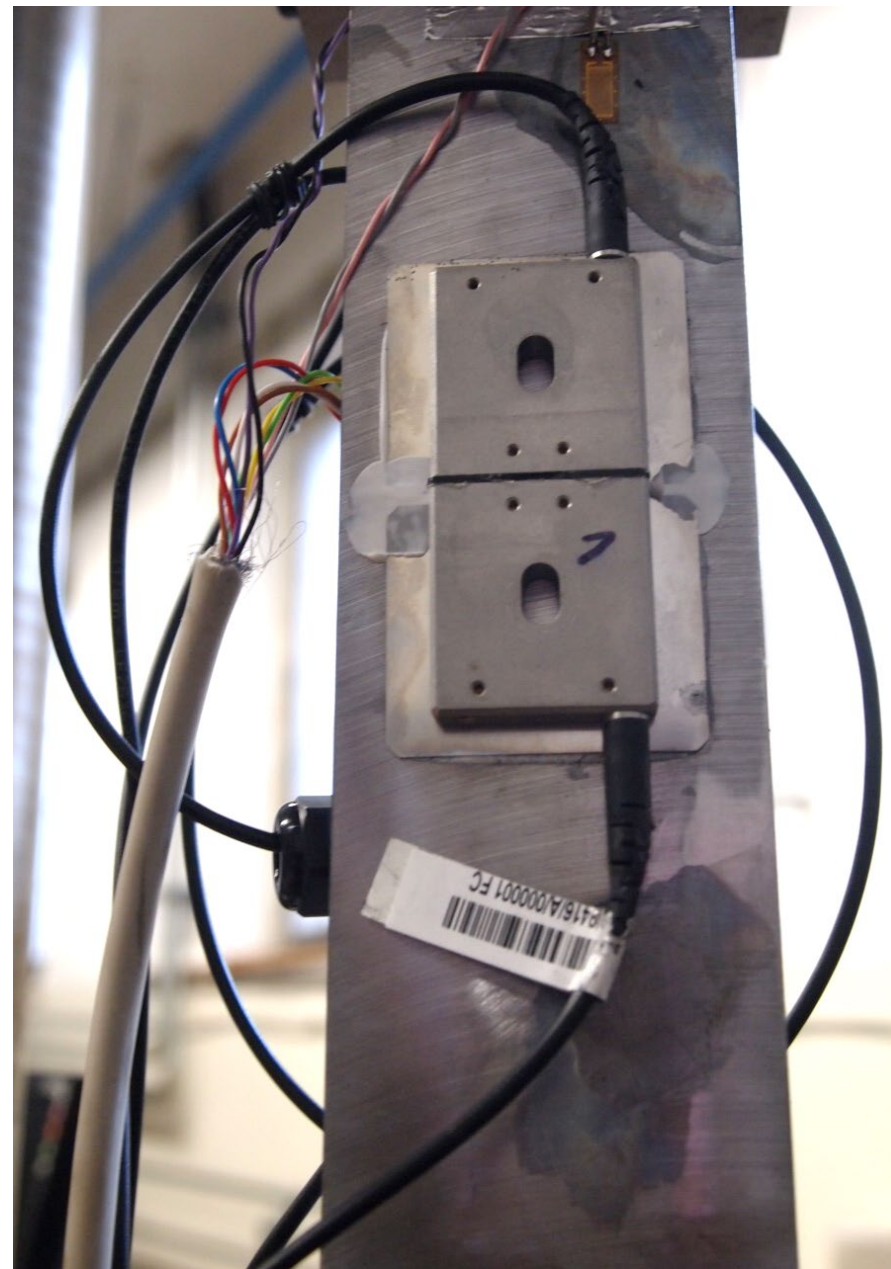


# FBG sensors

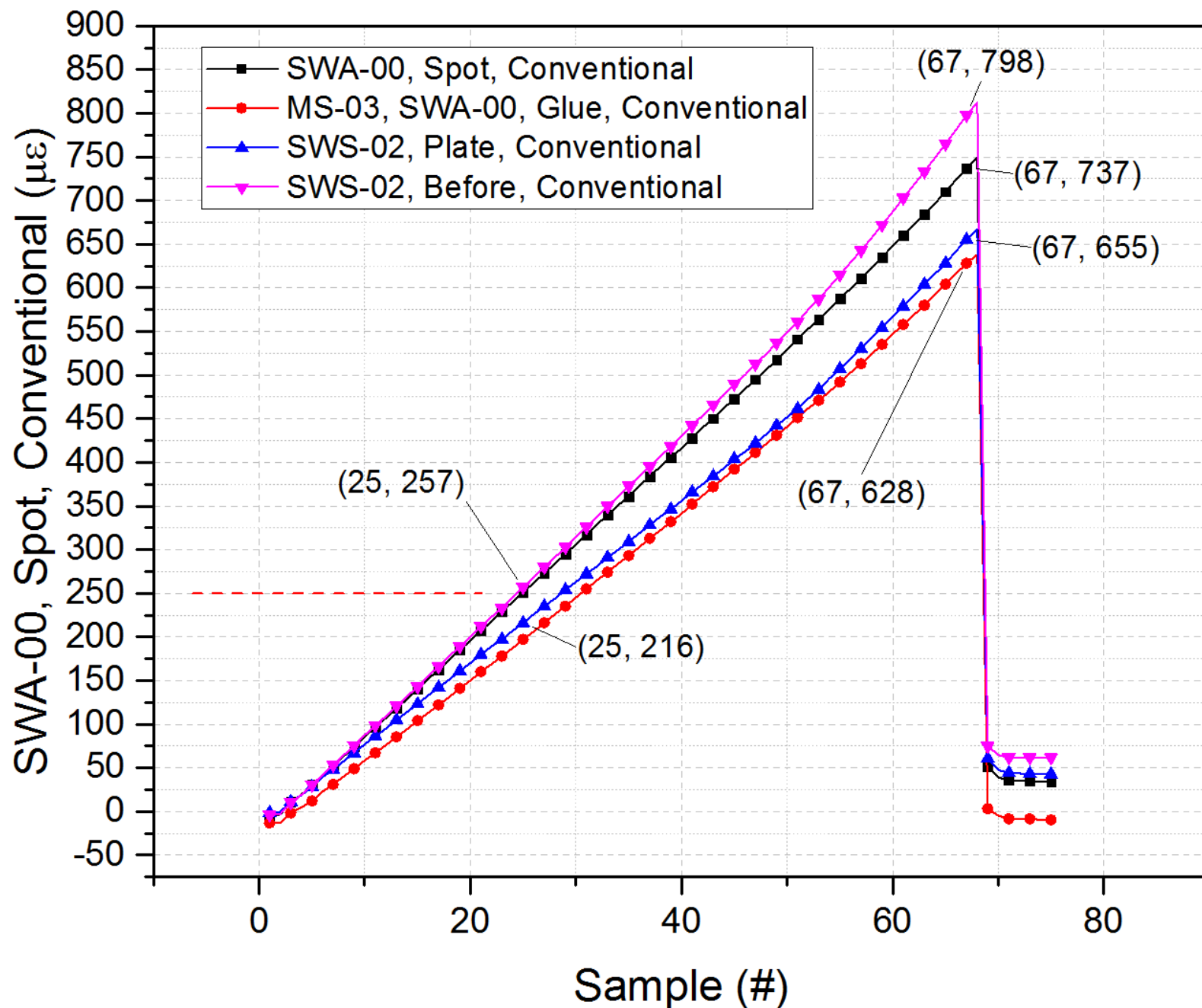


- Problémy:**
- stálosť predpätia
  - vyššie frekvencie (max. jednotky Hz)
  - vibrácie Braggovej mriežky
  - trajektória vlákna

# Kalibrácia FBG senzorov pomocou odporových tenzometrov

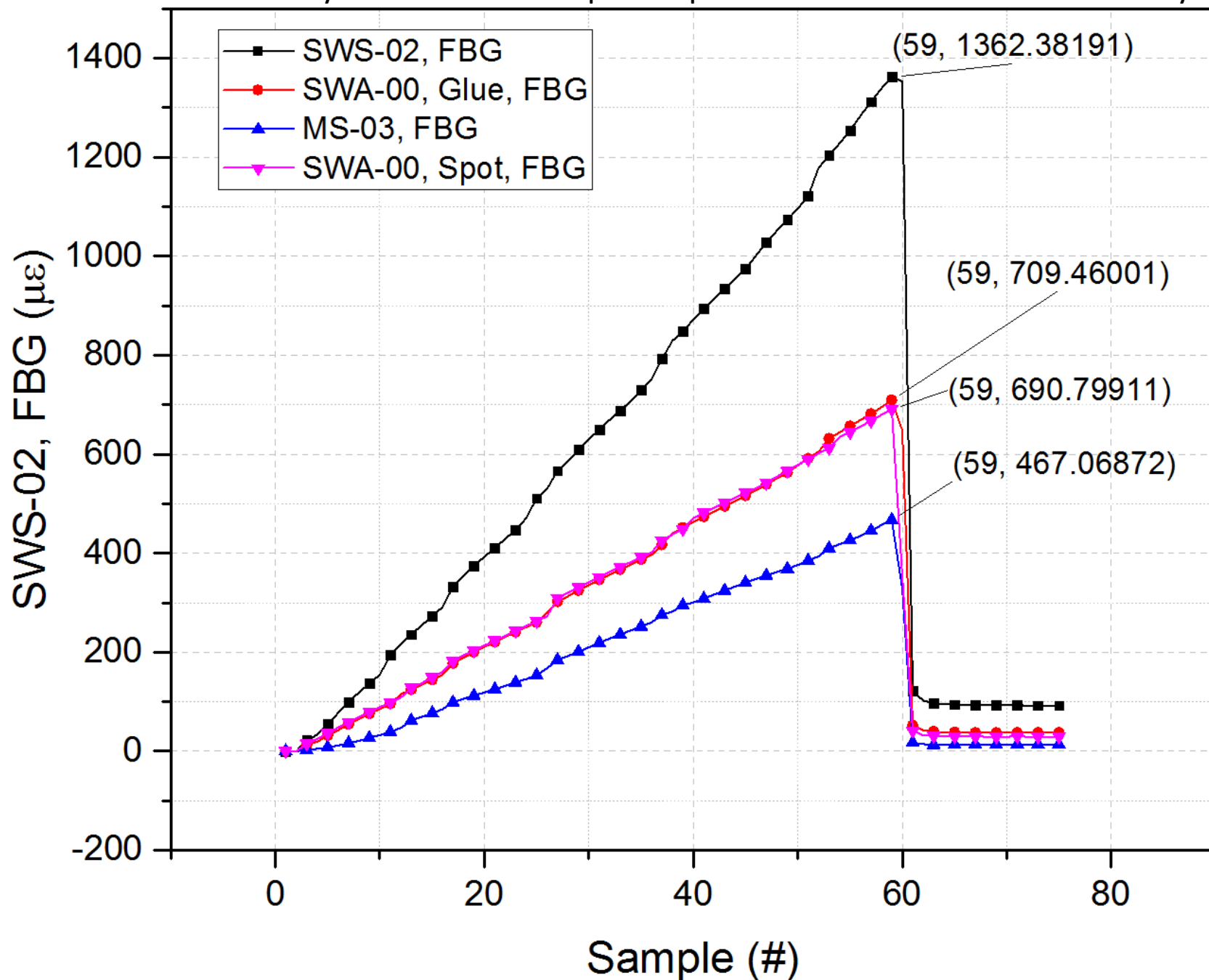


# Priebeh deformácií v rôznych miestach Jäckl profilu pri zaťažovaní ťahom - tenzometre

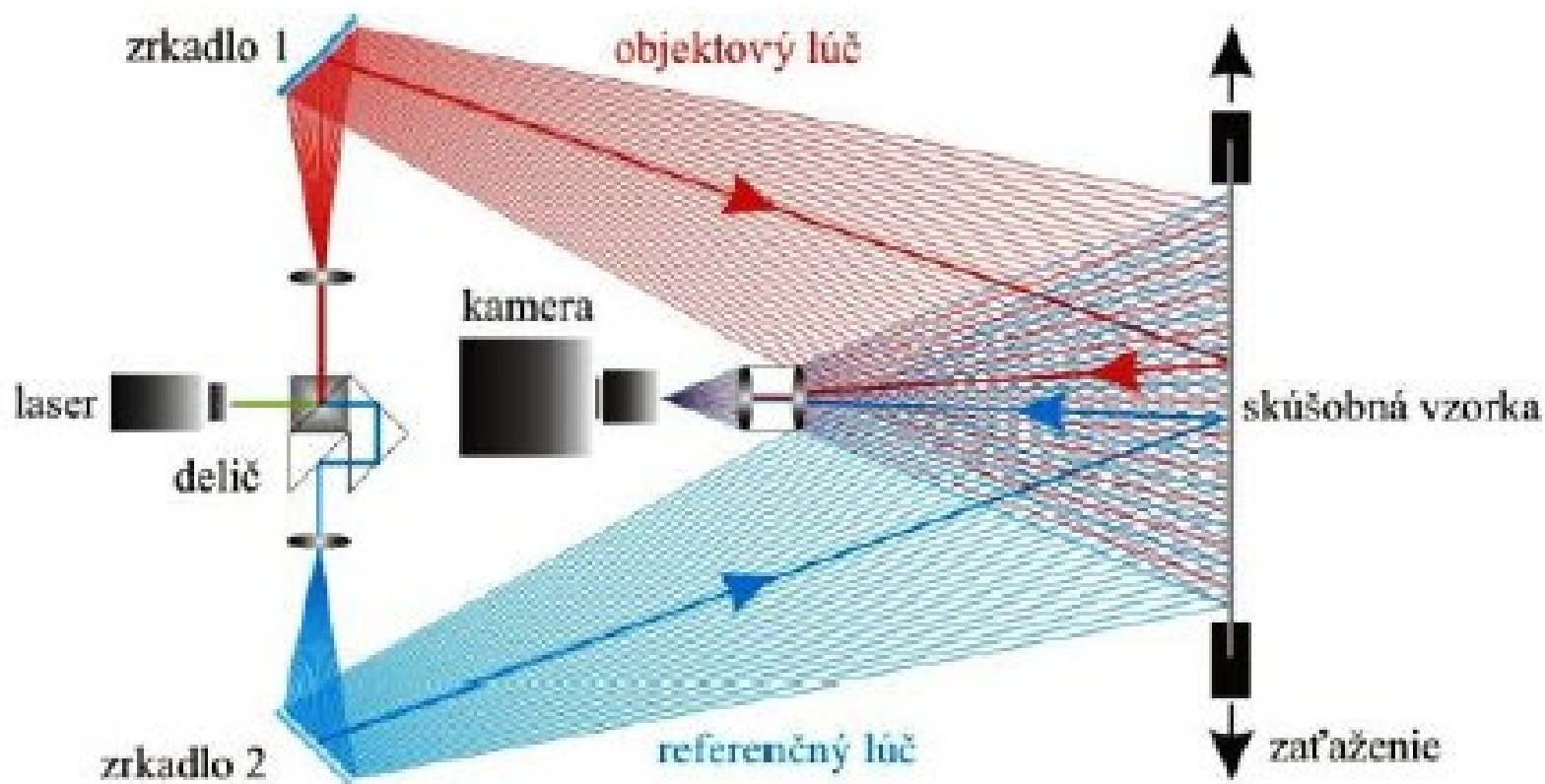


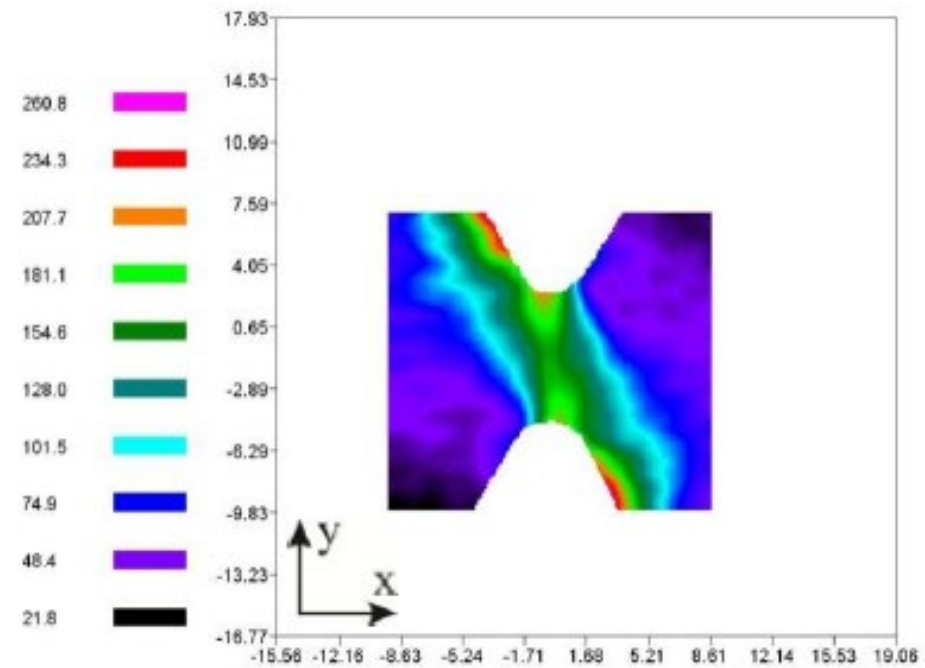
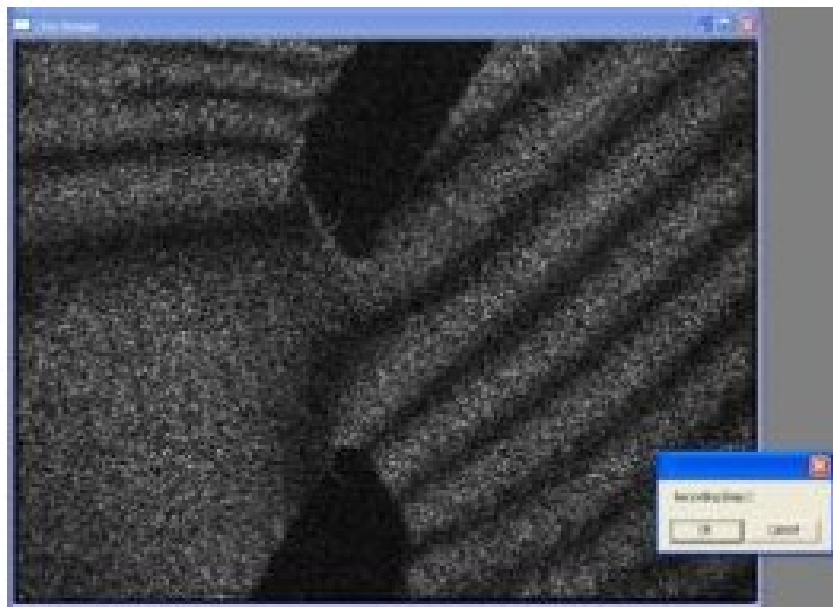
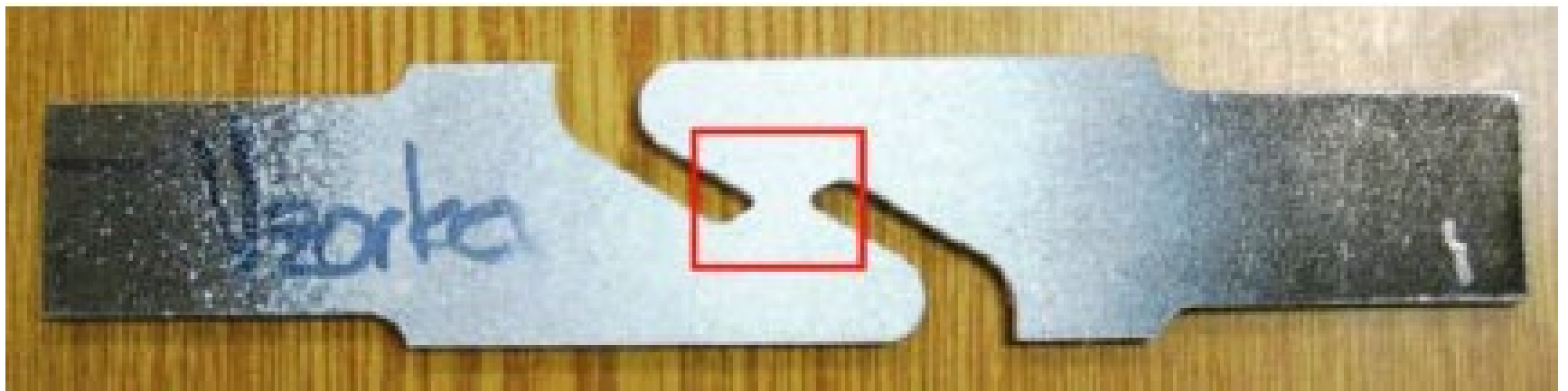


Priebeh deformácií v rôznych miestach Jäckl profilu pri zaťažovaní ťahom – FBG senzory



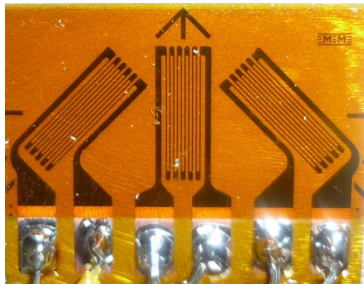
# ESPI – Electronic Speckle Pattern Interferometry







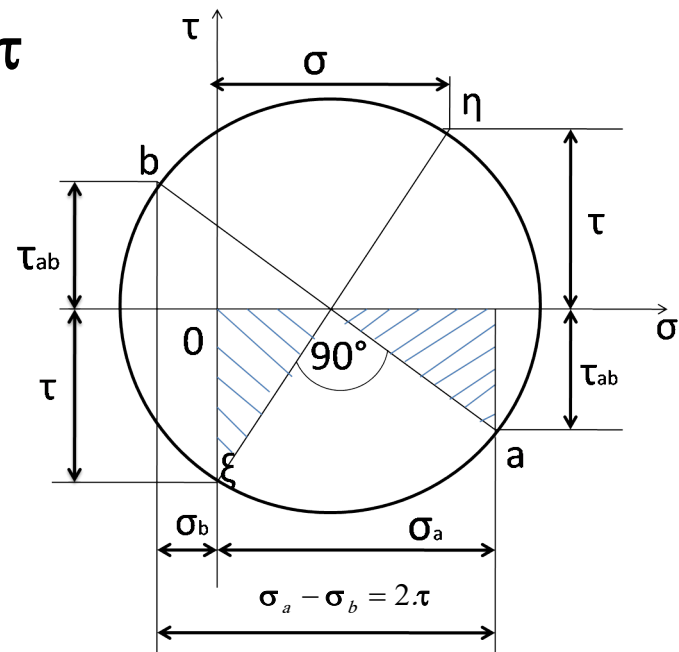
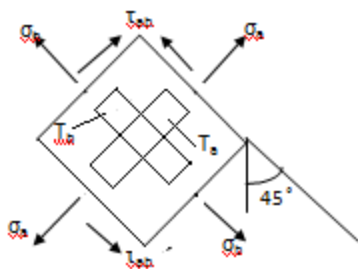
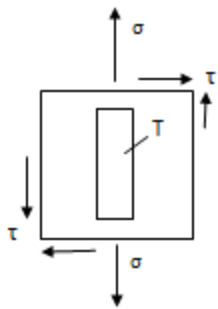
# Odporové tenzometre



$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = (1 + \beta_p + 2\mu_p) \frac{\Delta l}{l} = K \frac{\Delta l}{l}$$

## Tenzometrická ružica – oddelenie $\sigma$ a $\tau$

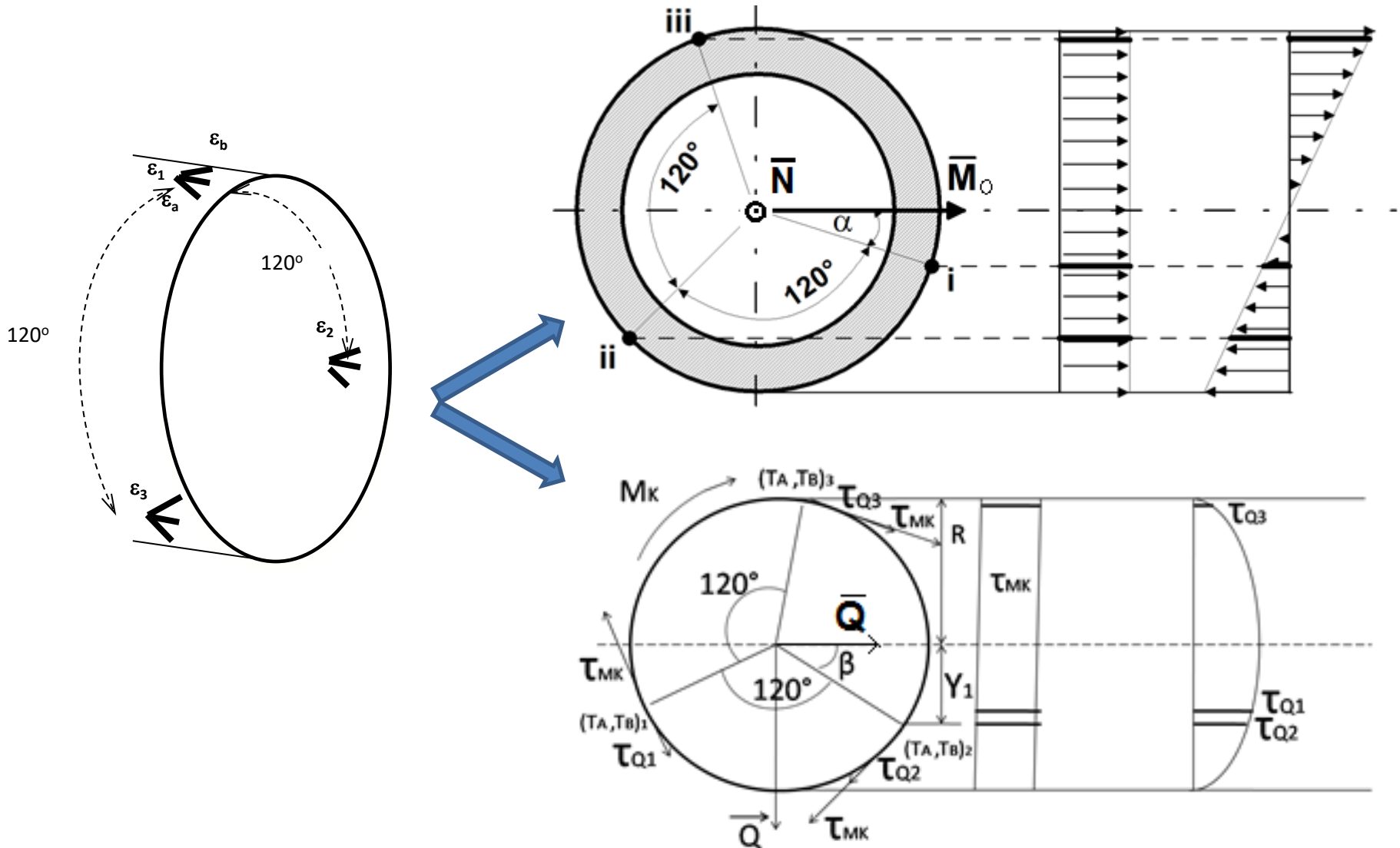


$$\sigma_a = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_a + \mu \varepsilon_b)$$

$$\sigma_b = \frac{E}{1 - \mu^2} (\varepsilon_b + \mu \varepsilon_a)$$

$$\sigma_a - \sigma_b = 2G(\varepsilon_a - \varepsilon_b) = 2\tau_{ab}$$

# Rozmiestnenie snímačov po obvode prierezu – oddelenie zložiek namáhania (N, Mo, Mk, T)



## Separácia normálových napätí

$$\sigma_i = \sigma_N + \sigma_{Moi} = \sigma_N + \frac{M}{J_z} r. \sin. \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} (i - 1) \right)$$

$$\sigma_{oi} = \frac{M}{J_z} r. \sin. \left( \alpha + \frac{2\pi}{3} (i - 1) \right) \quad \sum_i \sigma_i = 3\sigma_N + \sum_i \sigma_{Moi} = 3\sigma_N$$

### Výsledné vzťahy

$$\sigma_N = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

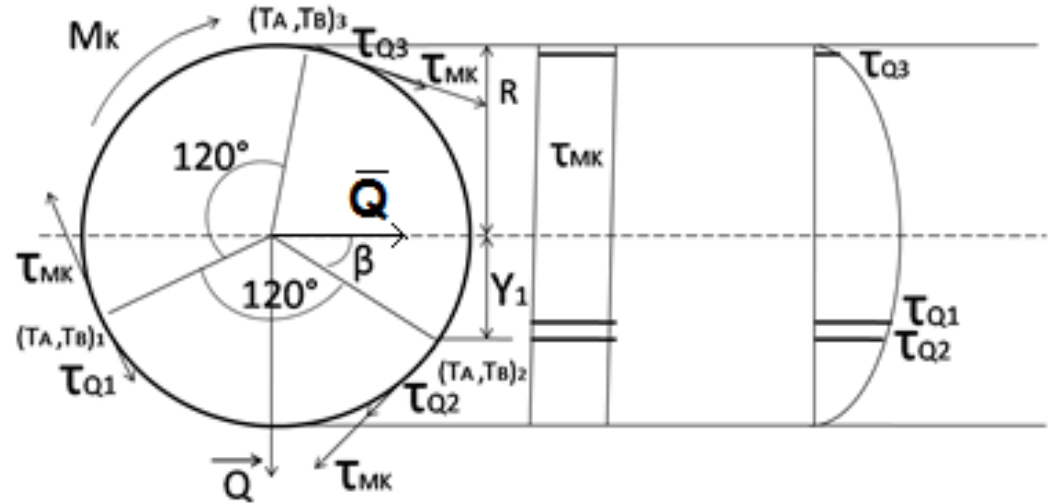
$$\operatorname{tg}(\alpha) = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{3}(\sigma_2 - \sigma_3)}$$

$$\sigma_{M_0} = \frac{2}{3} E \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2 - (\varepsilon_1 \varepsilon_2 + \varepsilon_2 \varepsilon_3 + \varepsilon_1 \varepsilon_3)}$$



# Separácia šmykových napätí

$$\tau_i = \tau_{M_k} + \tau_{Q_i}$$



$$\tau_{Q_i} = \frac{4\, Q}{3\, \pi r^3} \sqrt{r^2 - y_i^2} = \frac{4\, Q}{3\, \pi r^2} \cos(\beta + \frac{2\pi}{3} (i - 1))$$

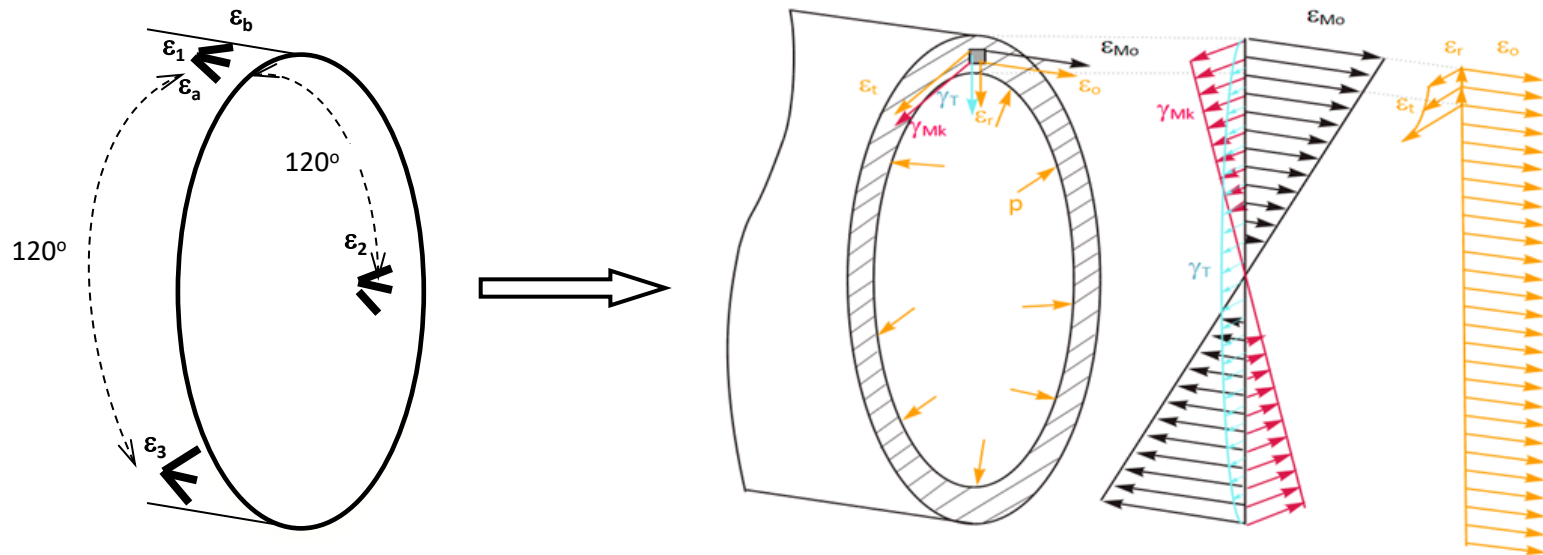
$$\sum_i \tau_i = 3\tau_{M_k} + \sum_i \tau_{Q_i} = 3\tau_{M_k}$$

# Výsledné vzťahy

$$\tau_{M_k} = \frac{1}{3} G [(\varepsilon_{1_a} - \varepsilon_{1_b}) + (\varepsilon_{2_a} - \varepsilon_{2_b}) + (\varepsilon_{3_a} - \varepsilon_{3_b})]$$

$$\tau_Q = \frac{2\tau_1 - \tau_2 - \tau_3}{\cos \beta}$$

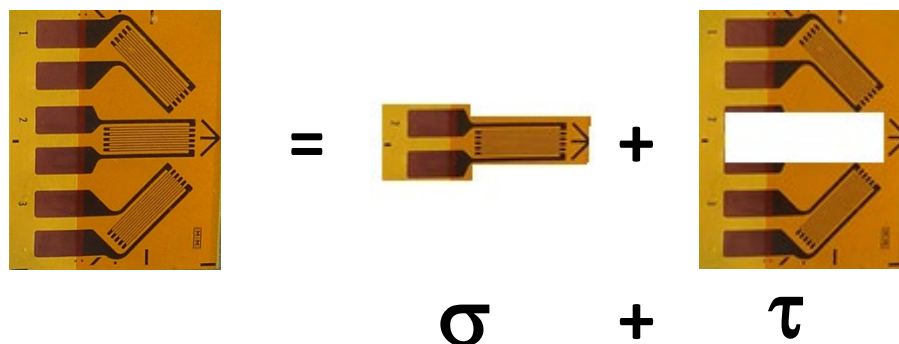
$$\tan \beta = \sqrt{3} \frac{\tau_3 - \tau_2}{2\tau_1 - \tau_2 - \tau_3}$$



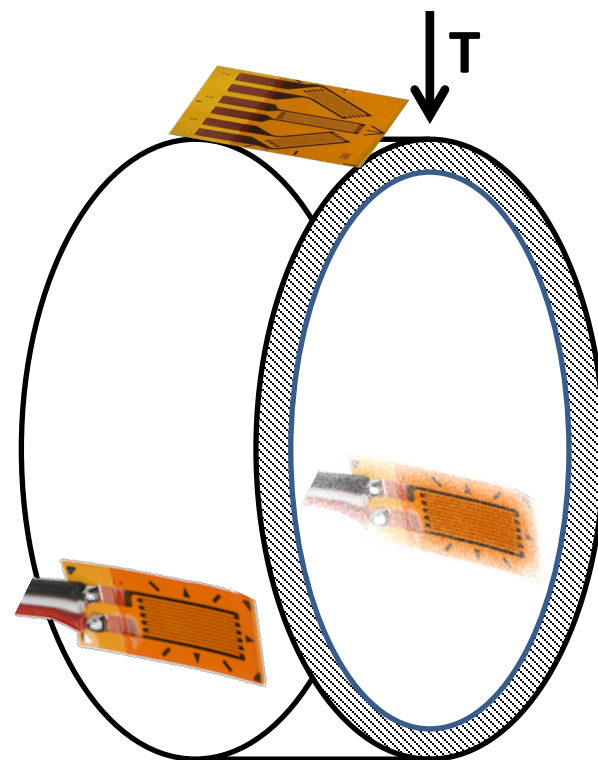
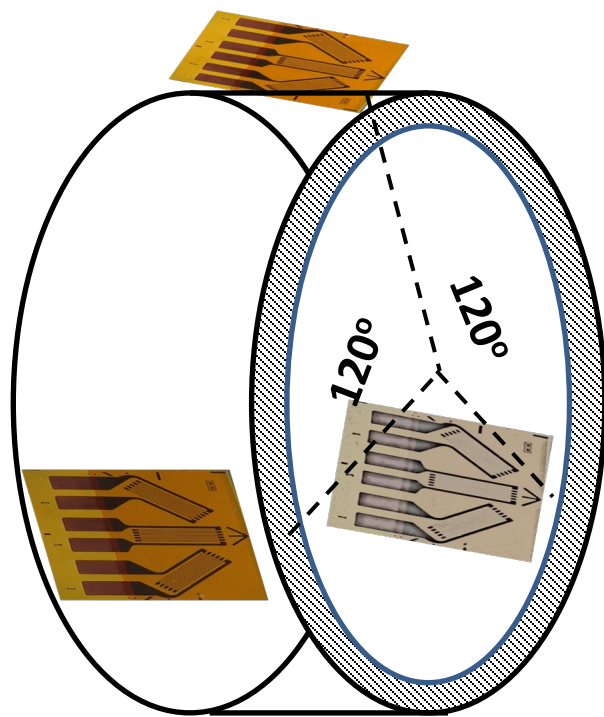
- Kompletný napäťovo-deformačný stav
- Identifikácia kritického bodu, môže meniť polohu
- Identifikácia kritickej roviny
- Možnosť znížiť počet snímačov v priereze



# Determination of significant loading process

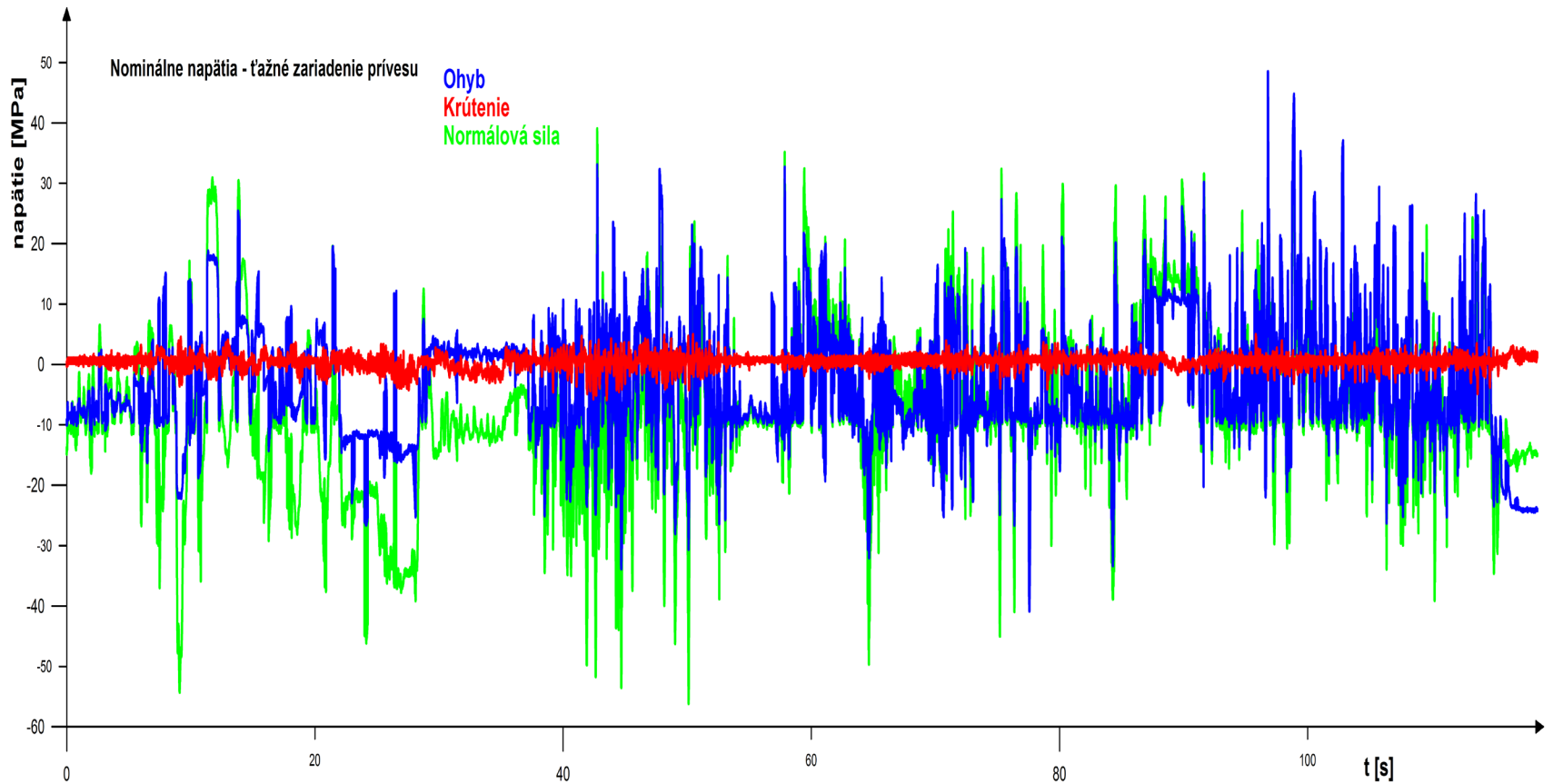


Industrial utility models  
IUM 5069-2012, No. 7466  
IUM 5070-2012, No. 7467





# Aplikácie v reálnej prevádzke



**zložky namáhania v nominálnom priereze ťažnej vzpery**

## Aplikácie v reálnej prevádzke



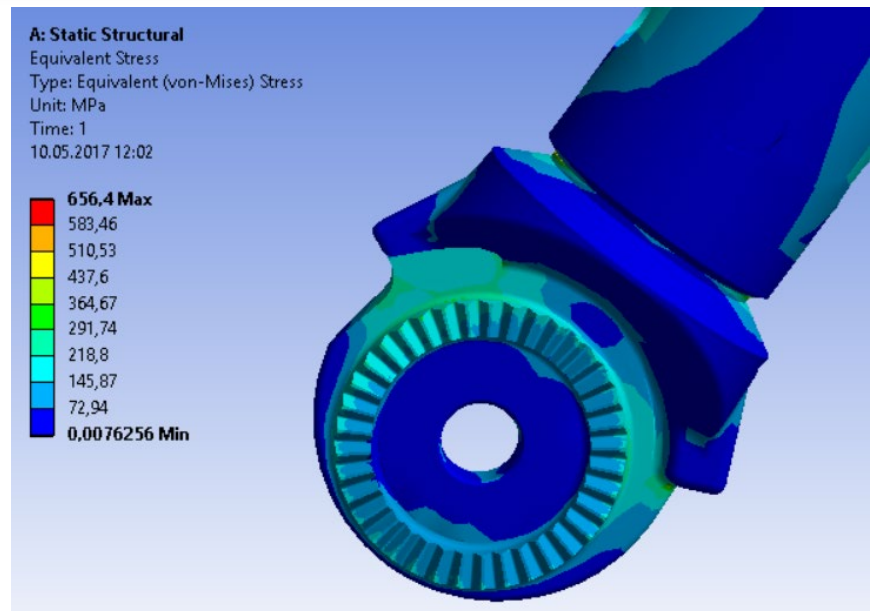
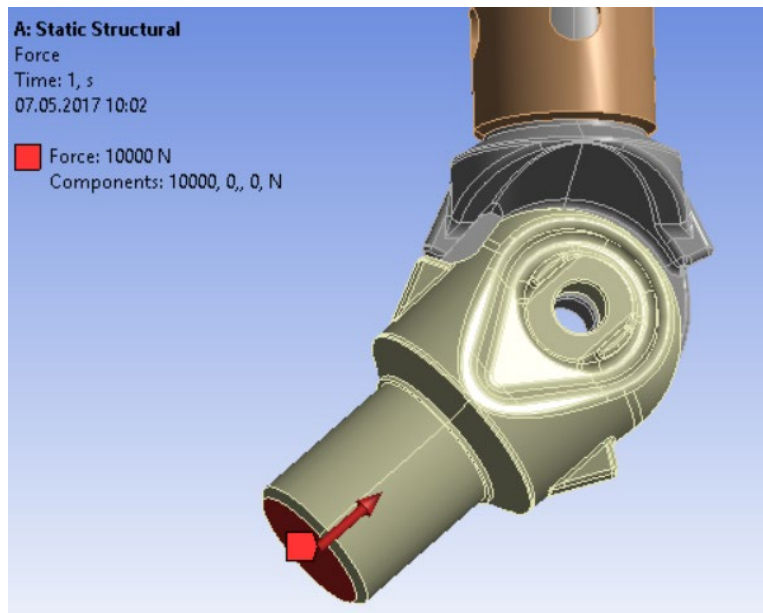
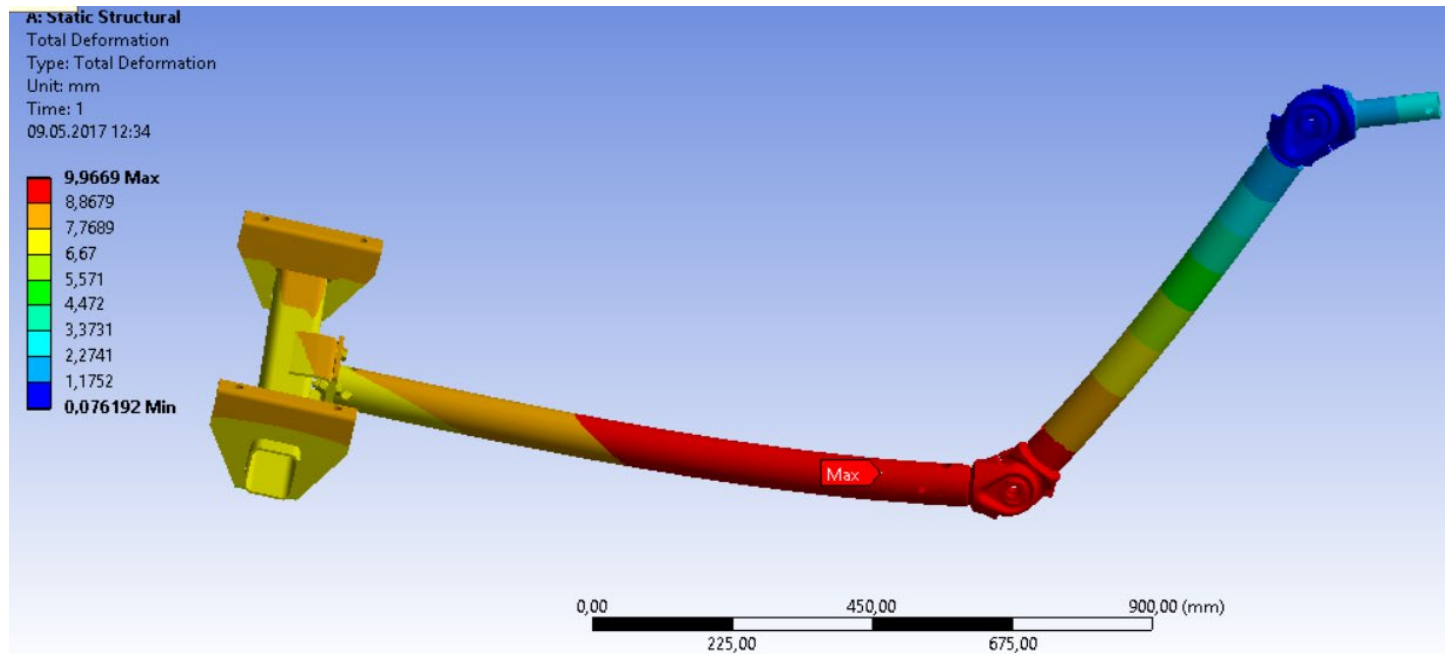


## Aplikácie v reálnej prevádzke



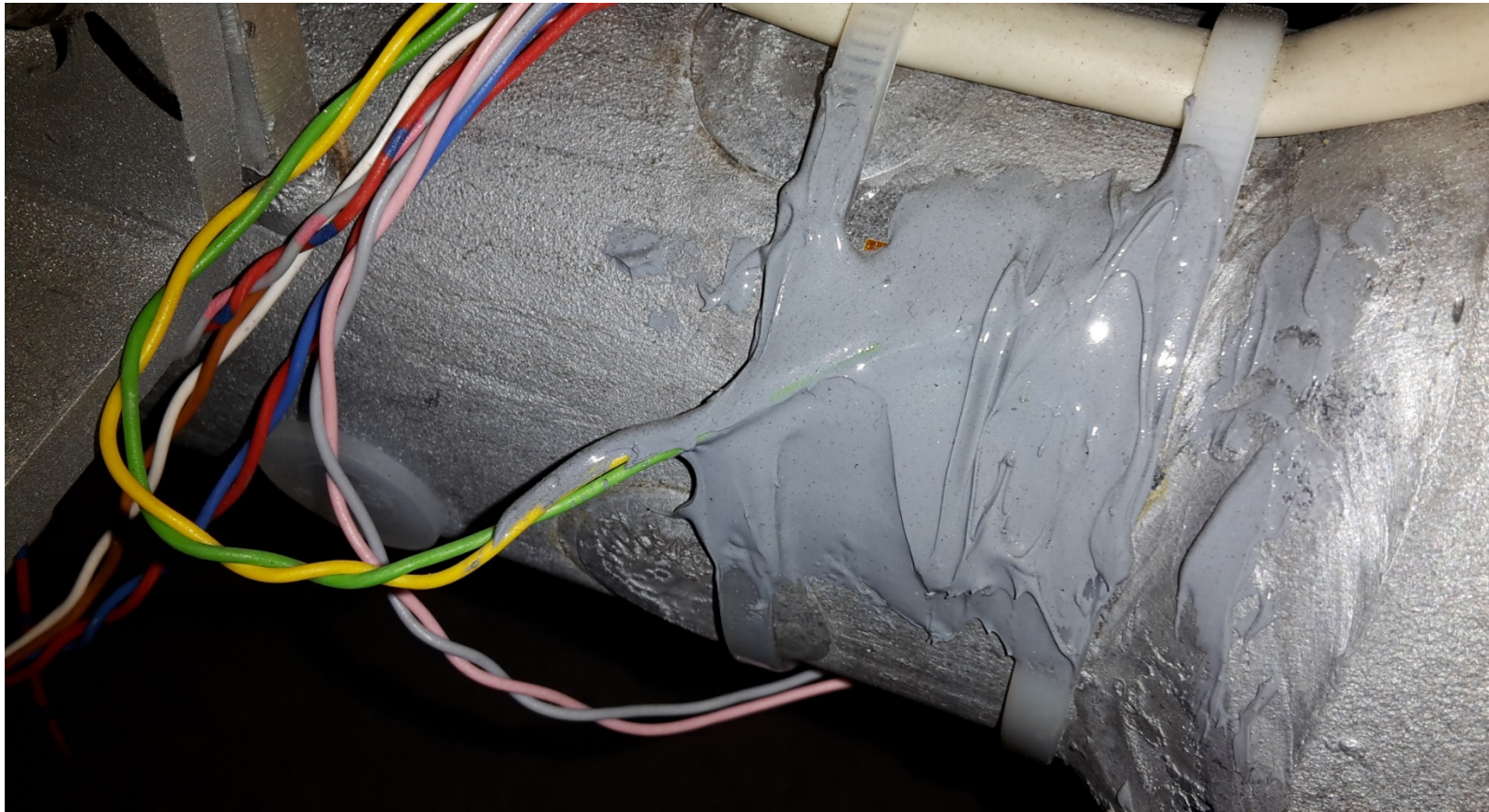
90° ružica pre výpočet hlavných napätí v bode

# Aplikácie v reálnej prevádzke



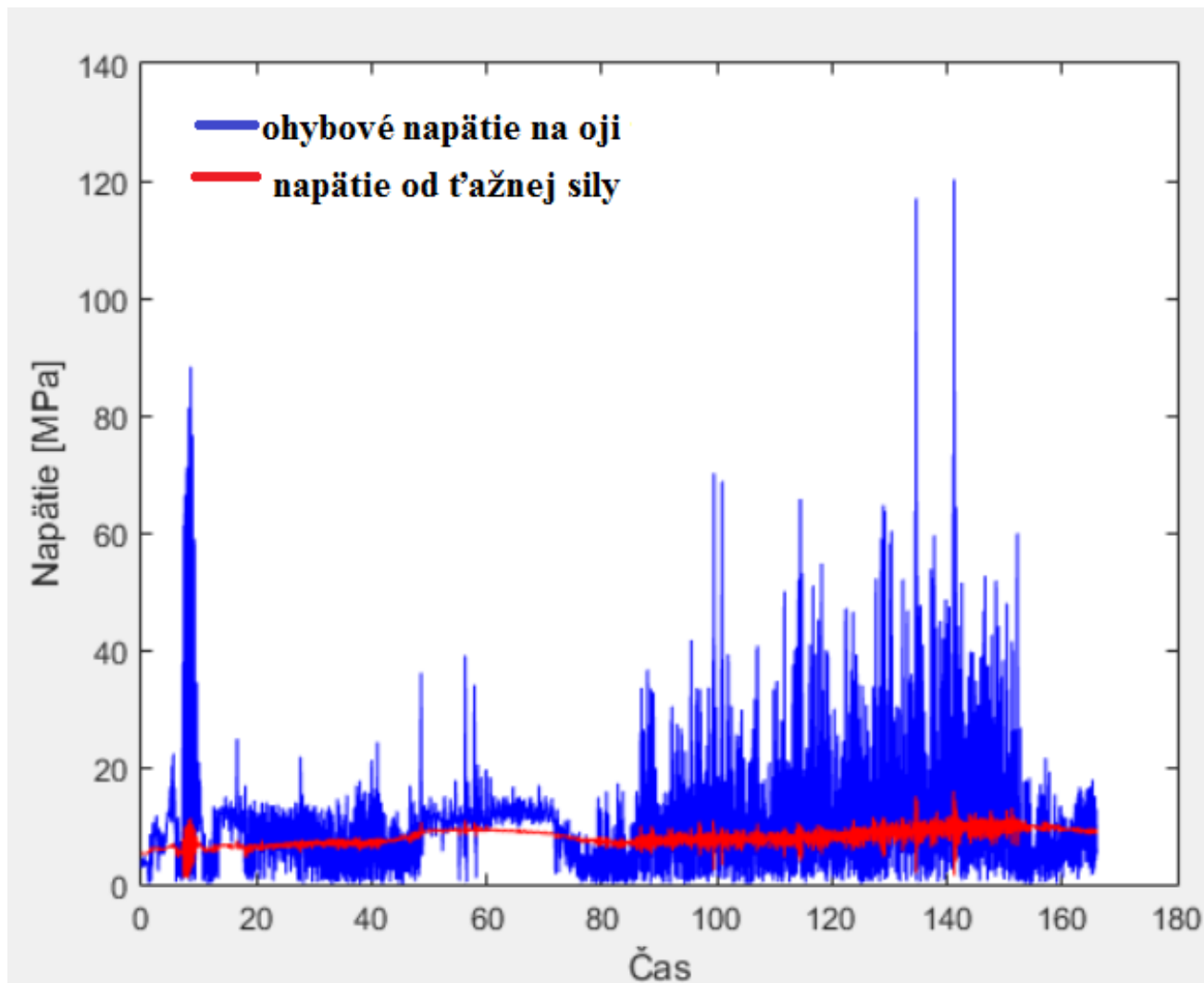


## Aplikácie v reálnej prevádzke



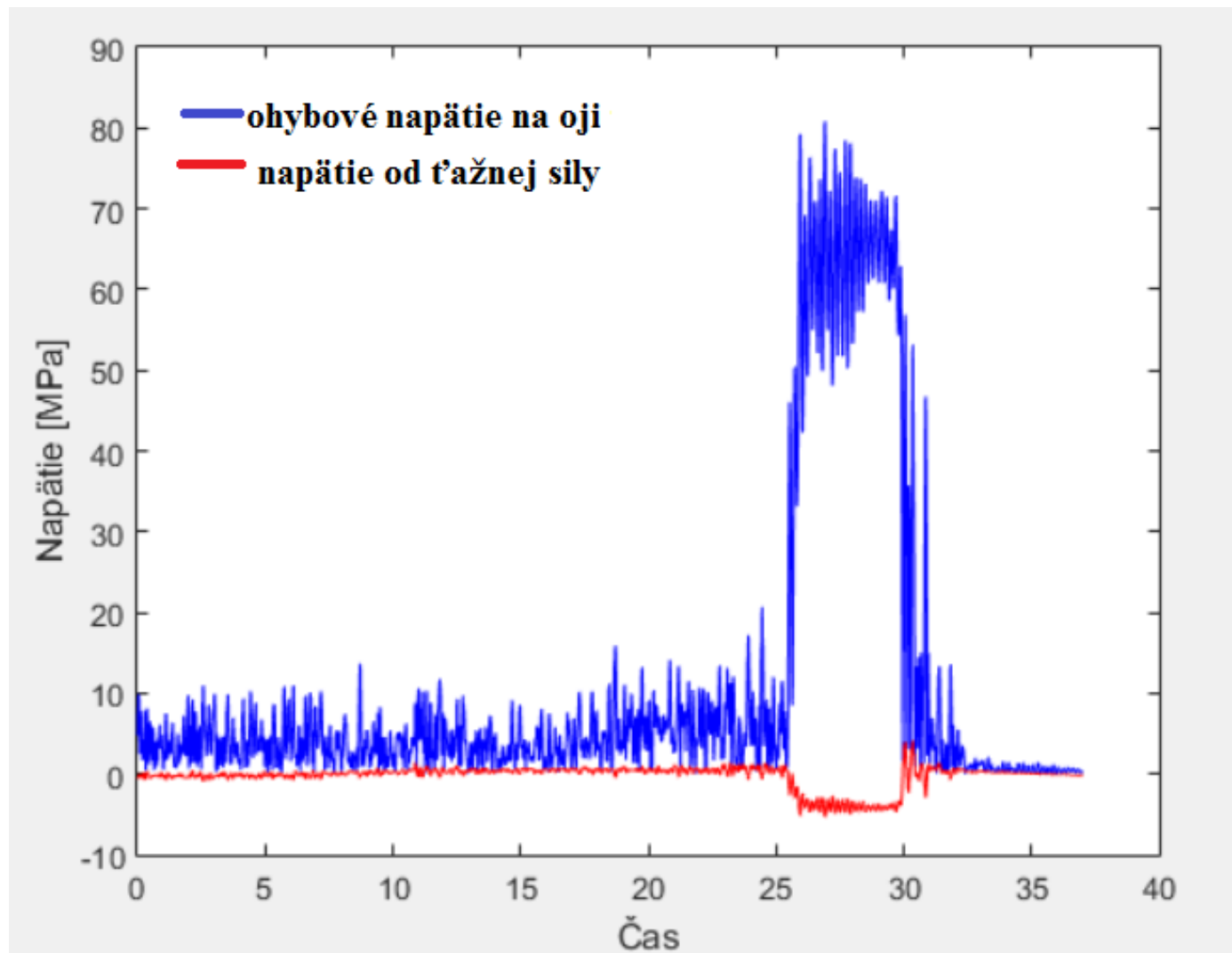
Špeciálne rozmiestnenie senzorov po obvode kruhového prierezu pre výpočet jednotlivých zložiek namáhania

## Aplikácie v reálnej prevádzke



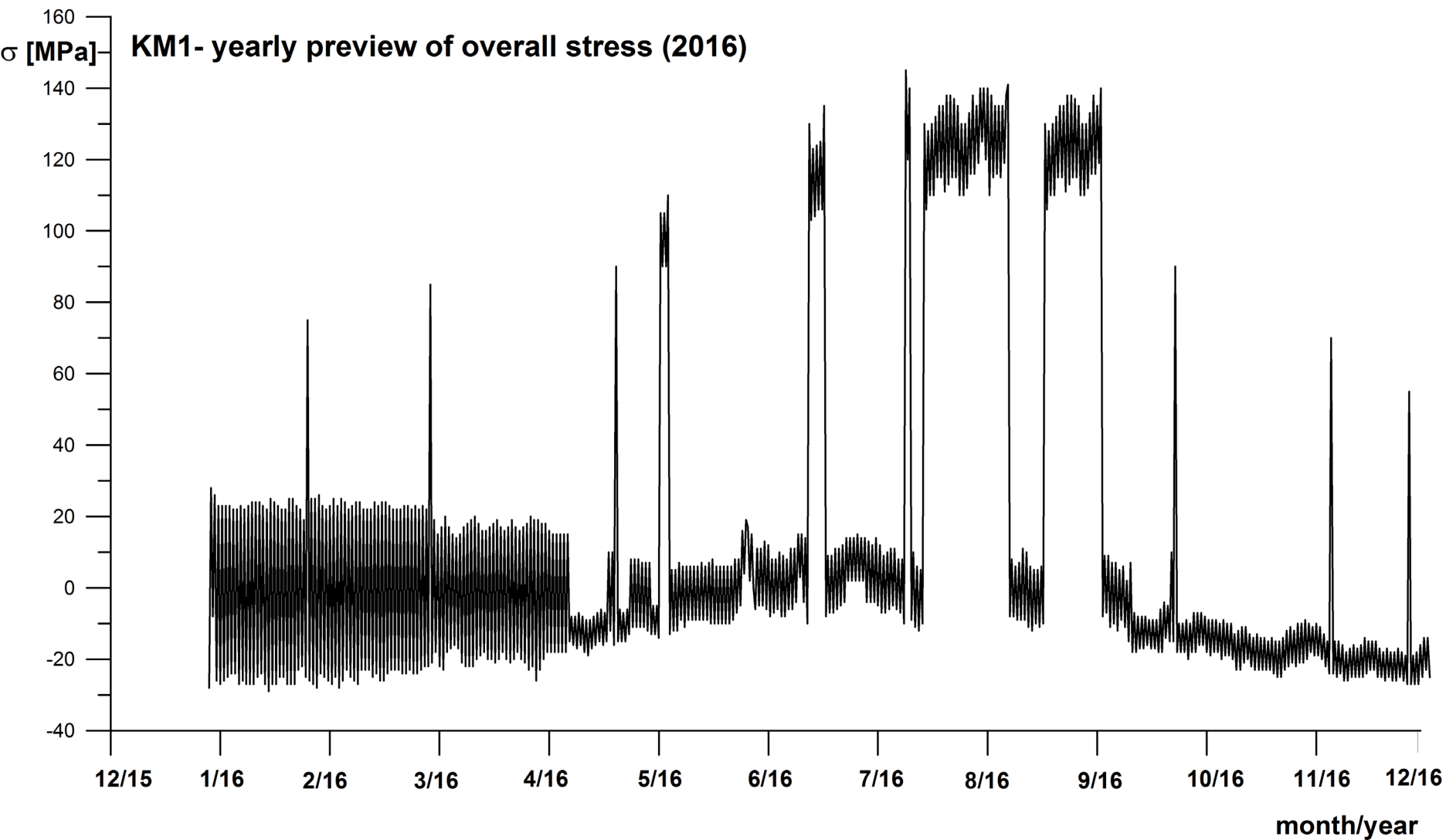
dlažobné kocky – asfalt - panel

# Aplikácie v reálnej prevádzke



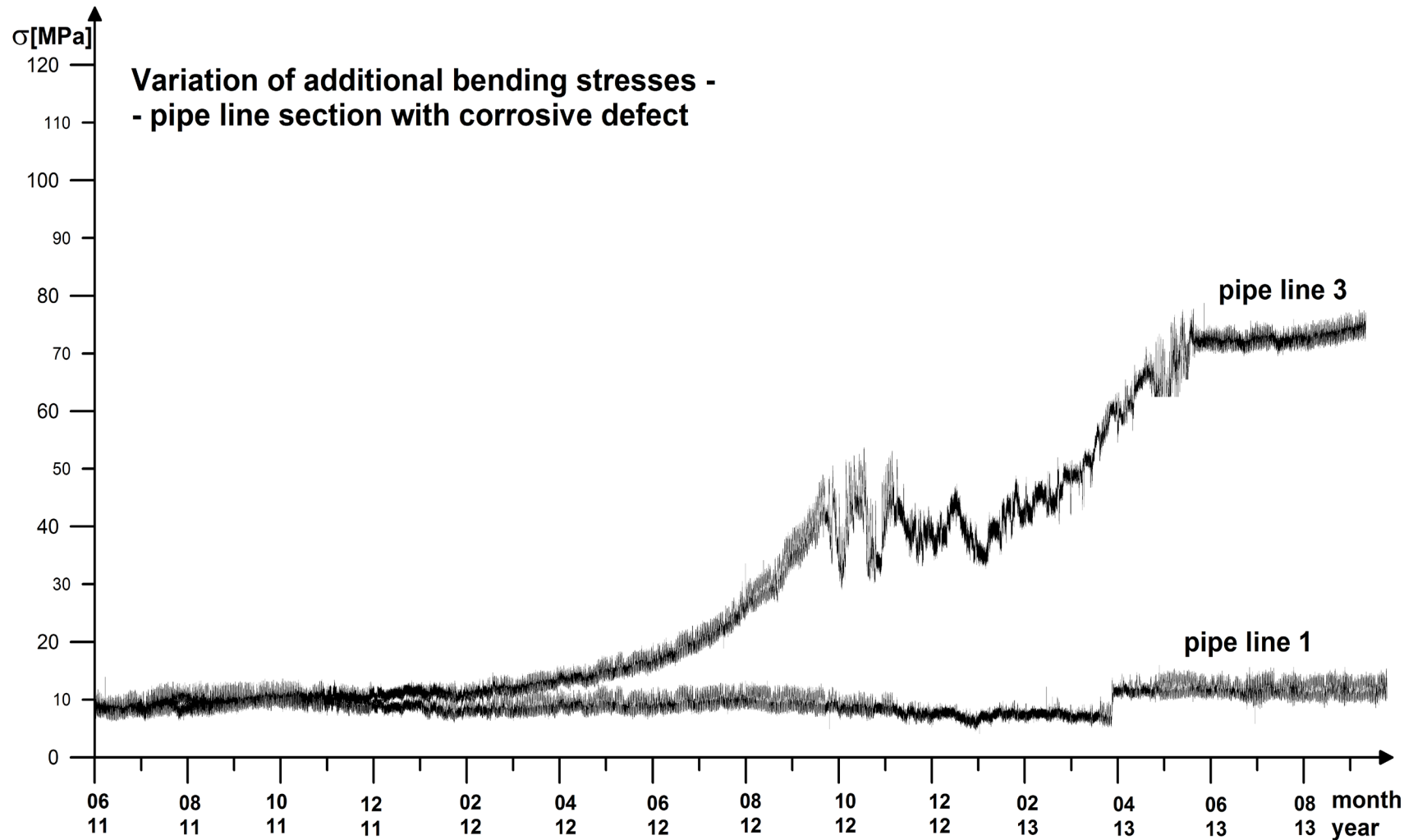
**brzdenie**

# Celoročný priebeh maximálnych napätí v tlakovom potrubí (nábehy, odstávky, kmitanie)





Viacročný priebeh maximálnych napätí v tlakovom potrubí - nárast napätia od ohybu na línii 3



# Priame merania prinášajú reálnejšie poznanie (skutočné namáhanie v prevádzke vs. skúška podľa normy)

