



# **ANALÝZA ZPĚTNÉHO ODPRUŽENÍ ÚHLOVÝCH PROFILŮ Z KOMPOZITŮ S TERMOPLASTICKOU MATRICÍ**

Z. Padovec, M. Růžička, V. Stavrovský,  
V. Sháněl, M. Dvořák, H. Chlup

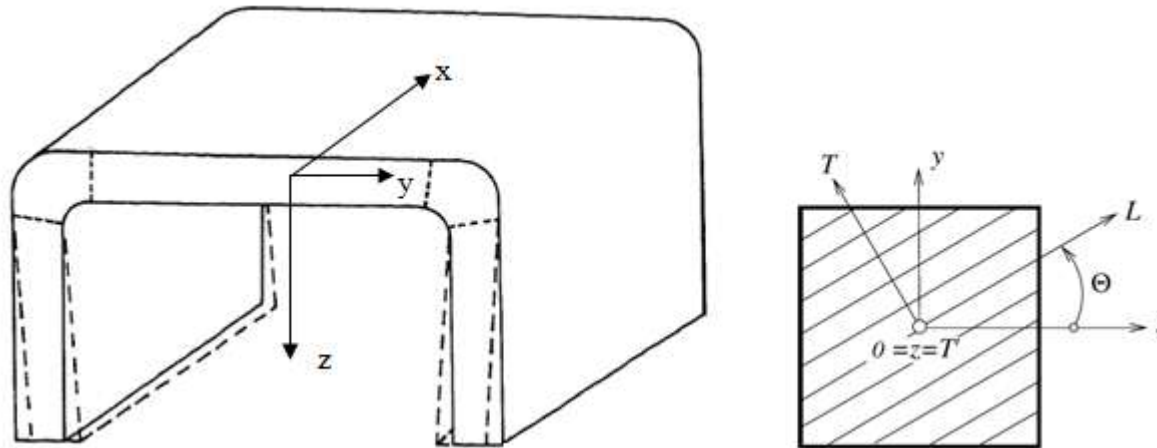
ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav mechaniky, biomechaniky  
a mechatroniky

# Obsah přednášky


- Úvod
- Analytické modely
  - zvlněná vlákna (tkaniny)
  - přímá vlákna
- Zpětné odpružení
  - jednosměrná **x** vrstvená deska
  - symetrie **x** nesymetrie
  - rovná deska **x** jedna křivost **x** dvě křivosti
- Porovnání modelů pro C/PPS desky
- Vliv matrice na zpětné odpružení (porovnání s C/PEEK a C/PEKK)
- Numerický model
- Popis experimentu
- Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiech
- Verifikace analytického modelu s výsledky pro hybridní kompozity
- Ukázka programu
- Závěr

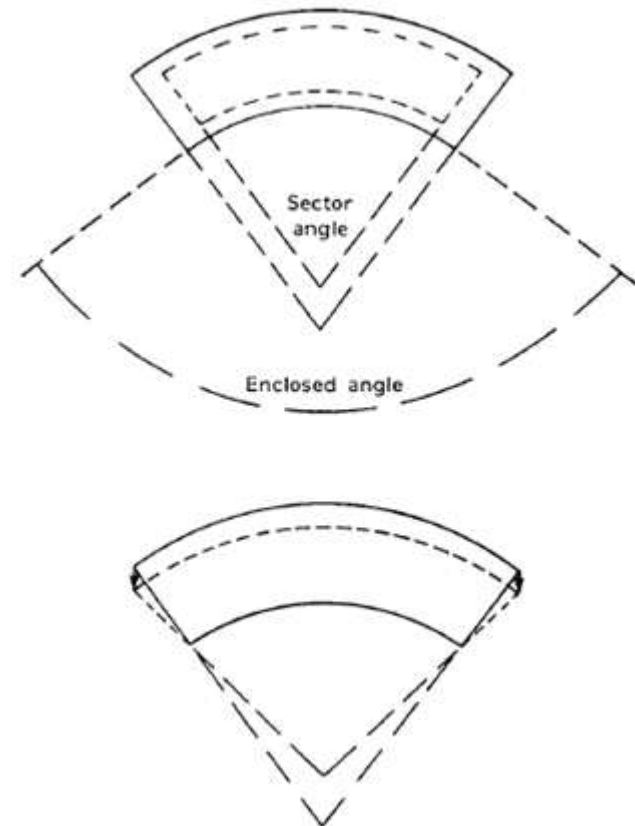
# Úvod

- zbytková napětí během vytvrzování laminátu vedou k jeho rozměrovým změnám po vyjmutí z formy
- jednou z těchto změn je zpětné odpružení úhlových sekcí (mezi ostatní patří například průhyb rovinných sekcí, zvrásnění na povrchu, posun jednotlivých vrstev vůči sobě, atd...)
- zpětné odpružení závisí na mnoha parametrech (velikost úhlu, tloušťka kompozitu, skladba, délka pásnic, materiál a povrch formy, vytvrzovací proces,...)



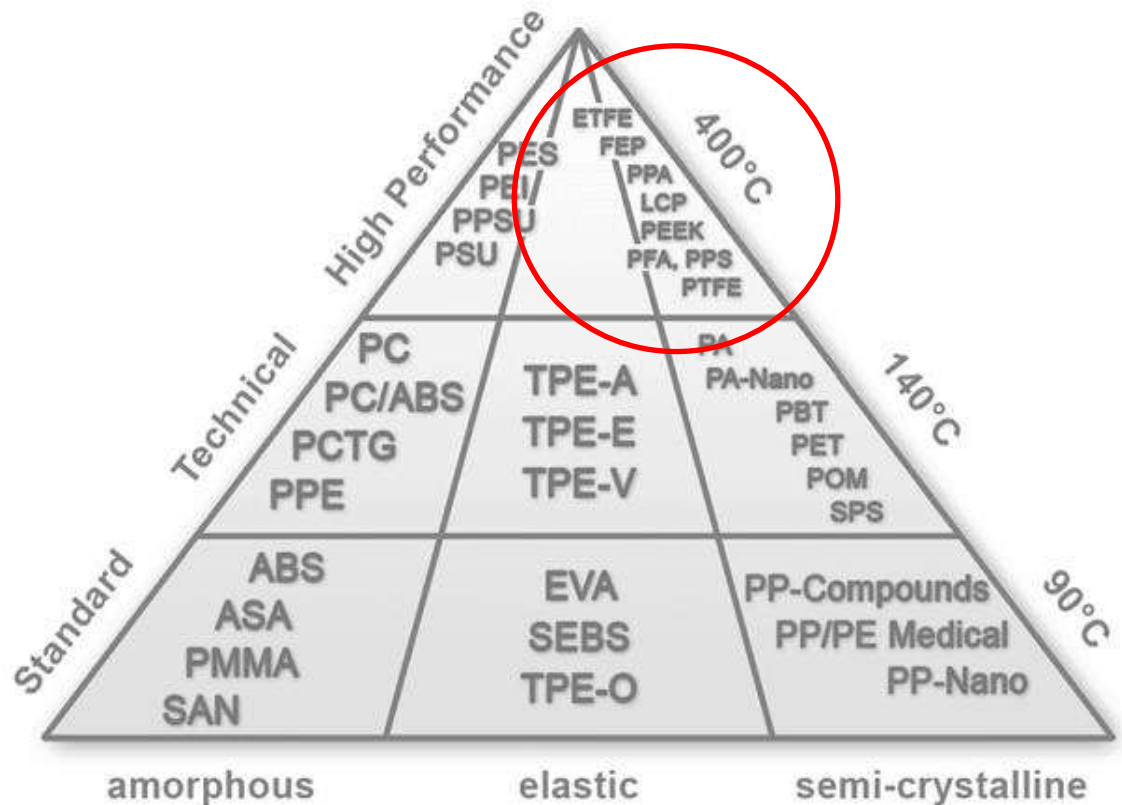
# Úvod

- změna úhlu součásti po vyjmutí z formy 1-2,5°  nutná modifikace formy
- příčiny zpětného odpružení:
  - rozdíl v koeficientech teplotní roztažnosti v podélném a příčném (po tloušťce) směru
  - rozdíl v koeficientech hygroskopické roztažnosti v podélném a příčném (po tloušťce) směru
  - smrštění matrice během vytvrzovacího cyklu



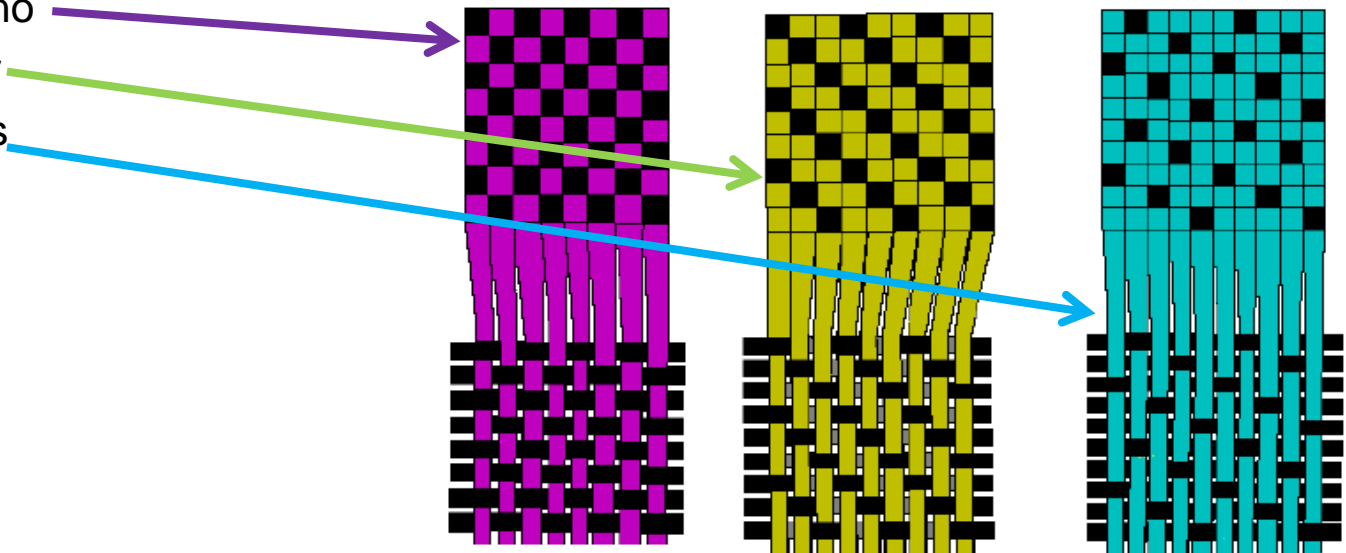
# Úvod

- kompozity s termoplastickou maticí
  - rozdílná výrobní technologie než pro termosety
  - opakovatelnost procesu
  - houževnatost
  - dobrá pevnost v tlaku
  - damage tolerance
  - dielektrické vlastnosti
  - nízká absorpce vlhkosti



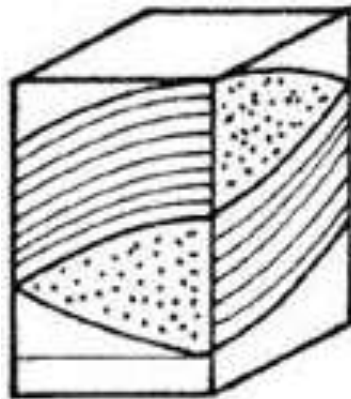
# Analytické modely

- zvlněná vlákna (tkaniny) dle Kabelky
- vstupní data pro model
  - hmotnost tkaniny  $M$  [g/m<sup>2</sup>]
  - dostava  $n$  [1/cm]
  - tloušťka tkaniny  $h$  [mm]
  - materiál a geometrie osnovy a útku
  - typ vazby
    - plátno
    - kepr
    - atlas

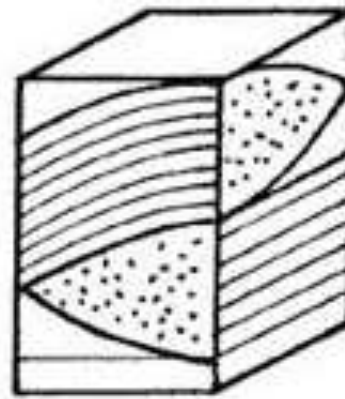


# Analytické modely

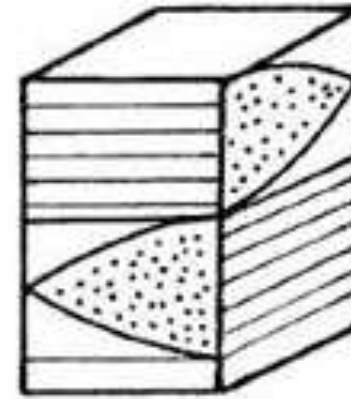
- zvlňněná vlákna (tkaniny)
- termoelastické charakteristiky kompozitu = termoelastické charakteristiky elementu, typického pro danou vazbu
- element I – typický pro plátňnovou vazbu
- keprová a atlasová vazba lze složit z kombinace elementů I a II



**I**



**III**



**II**

# Analytické modely

- zvlněná vlákna (tkaniny)
- předpoklady
  - tloušťka elementu je dána součtem tloušťek vláken a matrice
  - vazba je těsná
  - zvlnění vláken je pravidelné (sinus) a vlákna jsou prizmatická
  - vlákna jsou v průřezu rovnoměrně rozdělena
  - matrice i vlákna jsou lineárně elastická, matrice je isotropní, vlákna transversálně isotropní
  - teplota je stejná v celém objemu, neexistují žádná zbytková napětí
  - v celém objemu nejsou žádné jiné komponenty nebo poruchy kromě vlákna a matrice




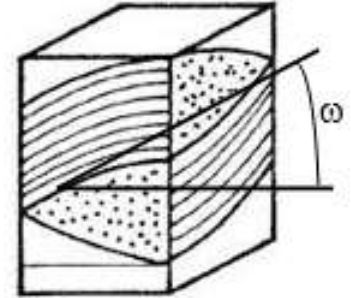
# Analytické modely

- zvlněná vlákna (tkaniny)
- efektivní vlastnosti elementu I jsou  $S_{ij} = \frac{1}{2\Omega} \int_{-\Omega}^{\Omega} S_{ij}(\omega) d\omega$  ,  
kde  $S_{ij}$  jsou prvky matice poddajnosti,

$\Omega$  je maximální hodnota  $\omega$ , což je úhel zvlnění vláken

v osnově (respektive v útku) a závisí na tloušťce a výšce pramenců

- efektivní vlastnosti pro keprovou a atlasovou vazbu leží mezi krajními případy – element I a II  matice poddajnosti je vypočítaná jako průměrná hodnota z charakteristik pro element I a II ( $S_I$  a  $S_{II}$ ), tj. 
$$\bar{S} = \frac{iS_I + jS_{II}}{i + j}$$



# Analytické modely

- zvlněná vlákna (tkaniny)
- integrací a nahrazení goniometrických funkcí prvními členy Taylorova rozvoje obdržíme rovnice pro efektivní charakteristiky pro osnovu (respektive útek)

$${}^1E_x = \frac{E_L}{1 + \frac{\Omega^2}{3} \left[ \frac{E_L}{G_{LT}} - 2(1 + \nu_{LT}) \right]}$$

$${}^1E_y = E_T$$

$${}^1G_{xy} = \frac{G_{LT}}{1 + \frac{\Omega^2}{3} \left( \frac{G_{LT}}{G_{TT'}} - 1 \right)}$$

...

- je-li  $\Omega=0$ ,  
přejdou tyto vztahy do vztahů pro přímá vlákna

# Analytické modely

- přímá vlákna
- mikromechanika dle Chamise

$$E_L = V_f E_{fL} + (1 - V_f) E_m$$

$$E_T = \frac{E_m}{1 - \sqrt{V_f} \left(1 - \frac{E_m}{E_{fT}}\right)}$$

$$E_{T'} = E_T$$

...



- elementy matice poddajnosti **S**

# Zpětné odpružení

- jednosměrná deska – odvození pro teplotní vliv

$$SB = \frac{\gamma' - \gamma}{\gamma}$$

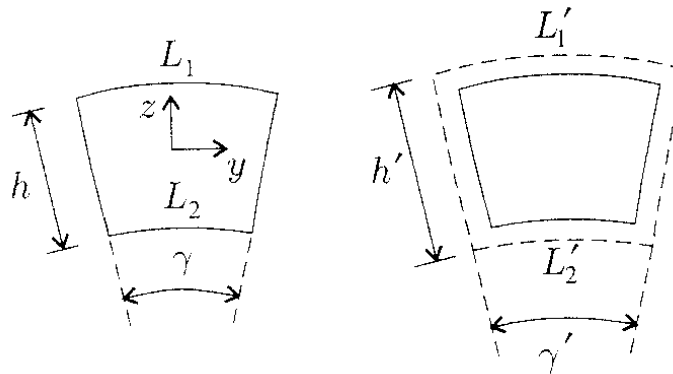
$$\gamma' = \frac{L_1 - L_2}{h'}$$

$$\gamma = \frac{L_1 - L_2}{h}$$

$$L_1 = L_1 + \alpha_y \Delta T L_1, L_2 = L_2 + \alpha_y \Delta T L_2, h' = h + \alpha_z \Delta T h$$

$$SB = \frac{(\alpha_y - \alpha_T) \Delta T}{1 + \alpha_T \Delta T}$$

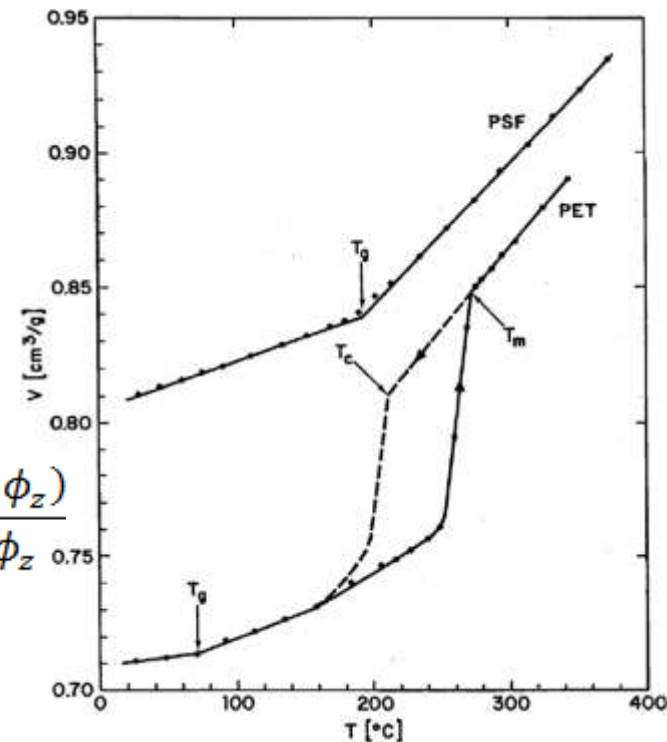
$$SB \cong (\alpha_y - \alpha_T) \Delta T = \varepsilon_y^t - \varepsilon_z^t$$



# Zpětné odpružení

- jednosměrná deska – ostatní vlivy
- zpětné odpružení vlivem absorpce vlhkosti
- zpětné odpružení vlivem smrštění matrice během vytvrzování
  - důležité u matric, které během vytvrzovacího cyklu přechází z amorfnní do krystalické fáze
  - krystaly mají větší hustotu než amorfnní fáze
  - může mít větší vliv než změna teploty
  - pouze u semikrystalických matric
- celková úhlová změna lze zapsat jako superpozice těchto tří efektů

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma_t + \Delta\gamma_h + \Delta\gamma_c = \gamma \frac{(\alpha_x - \alpha_z)\Delta T}{1 + \alpha_z\Delta T} + \gamma \frac{(\beta_x - \beta_z)\Delta c}{1 + \beta_z} + \gamma \frac{(\phi_x - \phi_z)}{1 + \phi_z}$$



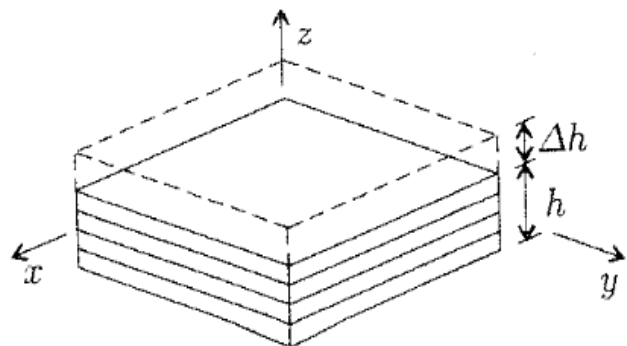
# Zpětné odpružení

- vrstvená deska
- nutno spočítat změnu tloušťky od jednotlivých vlivů
- komplikované odvození, klasická laminační teorie nestačí (rovinný problém)

$$\Delta h = \int_{-h_b}^{h_t} \varepsilon_z dz$$

$$\varepsilon_z = \varepsilon_3 = [S_{13} \quad S_{23} \quad S_{36}] \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} + \Delta T \alpha_3 + c \beta_3 + \phi_3$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & 2mn \\ n^2 & m^2 & -2mn \\ -mn & mn & m^2 - n^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix}$$



$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = [\bar{Q}] \left( \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} - \Delta T \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} - c \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \phi_x \\ \phi_y \\ \phi_{xy} \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix}$$

$$\Delta H^t = \sum_{k=1}^N \left\{ [S_{13} \quad S_{23} \quad S_{36}] [T_q]_k \left( (z_k - z_{k-1}) [\bar{Q}]_k \left( \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} - \Delta T \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}_k \right) + \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \right) + (z_k - z_{k-1}) (\Delta T (\alpha_3)_k) \right\}$$

# Zpětné odpružení

- vrstvená deska
- analogické odvození pro vliv vlhkosti a smrštění matrice

$$\Delta H^h = \sum_{k=1}^N \left\{ [S_{13} \quad S_{23} \quad S_{36}] [T_q]_k \left( (z_k - z_{k-1}) [\bar{Q}]_k \left( \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} - \Delta c \begin{bmatrix} \beta_x \\ \beta_y \\ \beta_{xy} \end{bmatrix}_k \right) + \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \right) + (z_k - z_{k-1}) (\Delta c (\beta_3)_k) \right\}$$

$$\Delta H^c = \sum_{k=1}^N \left\{ [S_{13} \quad S_{23} \quad S_{36}] [T_q]_k \left( (z_k - z_{k-1}) [\bar{Q}]_k \left( \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \Phi_x \\ \Phi_y \\ \Phi_{xy} \end{bmatrix}_k \right) + \frac{z_k^2 - z_{k-1}^2}{2} [\bar{Q}]_k \begin{bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \right) + (z_k - z_{k-1}) (\Phi_3)_k \right\}$$

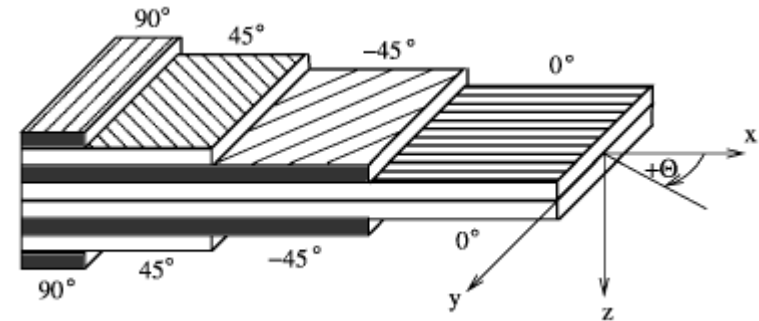
# Zpětné odpružení

- vrstvená deska
- rovná deska

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x^{0,T} \\ \varepsilon_y^{0,T} \\ \gamma_{xy}^{0,T} \\ \kappa_x^T \\ \kappa_y^T \\ \kappa_{xy}^T \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{16} & b_{11} & b_{12} & b_{16} \\ a_{12} & a_{22} & a_{26} & b_{12} & b_{22} & b_{26} \\ a_{16} & a_{26} & a_{66} & b_{16} & b_{26} & b_{66} \\ b_{11} & b_{12} & b_{16} & d_{11} & d_{12} & d_{16} \\ b_{12} & b_{22} & b_{26} & d_{21} & d_{22} & d_{26} \\ b_{16} & b_{26} & b_{66} & d_{16} & d_{26} & d_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \\ M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{Bmatrix}$$

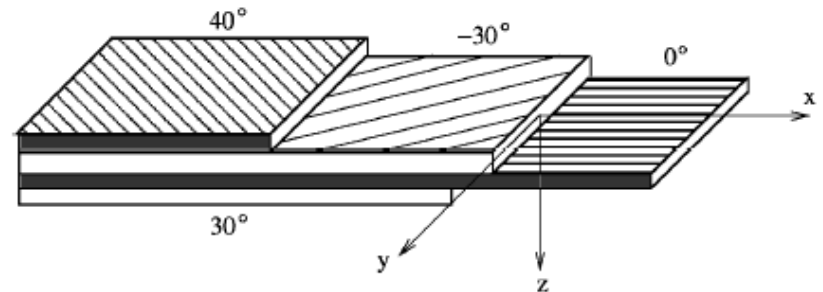
- symetrická deska

$$\text{springback} = \frac{(\alpha_y - \alpha_z)\Delta T}{1 + \alpha_z\Delta T} = \frac{\varepsilon_y^T - \varepsilon_z^T}{1 + \varepsilon_z^T}$$



- nesymetrická deska

$$\text{springback} = R\kappa_y^T + \frac{\varepsilon_y^T - \varepsilon_z^T}{1 + \varepsilon_z^T}$$



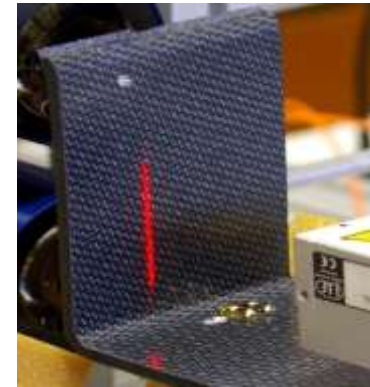


# Zpětné odpružení

- vrstvená deska
- deska s jednou křivostí

$$\begin{Bmatrix} N_x^{thc} \\ N_y^{thc} \\ N_{xy}^{thc} \\ M_x^{thc} \\ M_y^{thc} \\ M_{xy}^{thc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\kappa_y^T \Rightarrow \kappa_y^T + \frac{1}{R_y} (\varepsilon_y^T - \varepsilon_z^T)$$



- deska se dvěma křivostmi

$$\begin{Bmatrix} N_x^{thc} \\ N_y^{thc} \\ N_{xy}^{thc} \\ M_x^{thc} \\ M_y^{thc} \\ M_{xy}^{thc} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{Bmatrix}$$

$$\kappa_x^T \Rightarrow \kappa_x^T + \frac{1}{R_x} (\varepsilon_x^T - \varepsilon_z^T)$$

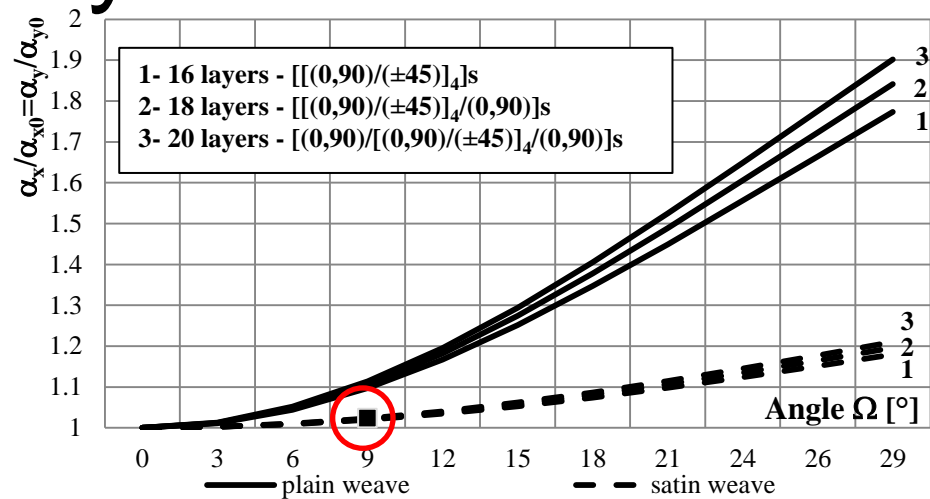
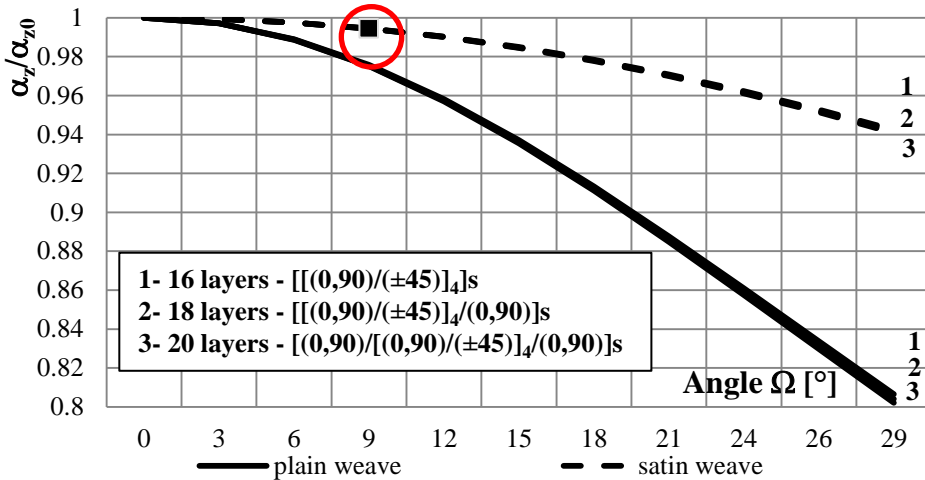


# Porovnání modelů pro C/PPS desky

- desky s jednou křivostí
- C/PPS,  $V_f=49\%$ ,  $\Delta T=160^\circ\text{C}$
- tkanina 5H satin (atlasová vazba), vlákno Toray T300J 3K, dostava ve směru osnovy a útku  $n_x=n_y=7$  na 1 cm, tloušťka tkaniny  $h=0,3$  mm
- skladba
  - 32 vrstev  $[(0,90)/(\pm 45)]_4$   $R_y=5$  mm
  - 36 vrstev  $[(0,90)/(\pm 45)]_4/(0,90)$   $R_y=6$  mm
  - 40 vrstev  $[(0,90)/[(0,90)/(\pm 45)]_4/(0,90)]_s$   $R_y=7$  mm
- termoelastické charakteristiky vlákna a matrice

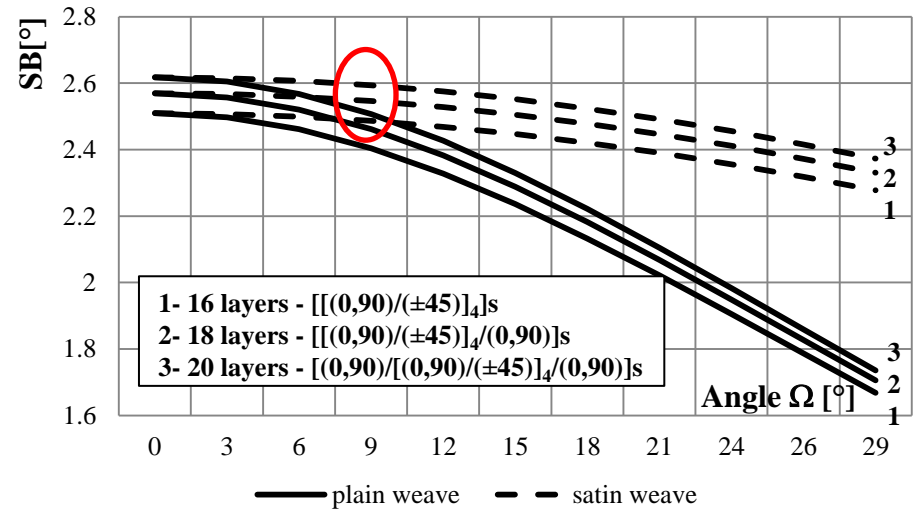
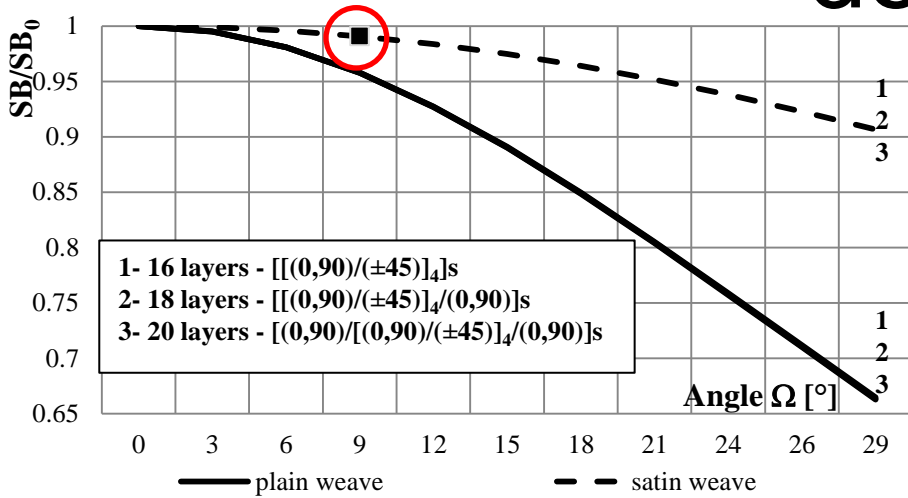
$E_{fL}[\text{MPa}]$	$E_{fT}[\text{MPa}]$	$\nu_{fL}[-]$	$G_{f12}[\text{MPa}]$	$G_{f23}[\text{MPa}]$	$\alpha_{fL}[^\circ\text{C}^{-1}]$
230000	15000	0,3	50000	27000	$-3,8 \cdot 10^{-7}$
$\alpha_{fT}[^\circ\text{C}^{-1}]$	$\Phi_f[\%]$	$E_m[\text{MPa}]$	$\nu_m[-]$	$\alpha_m[^\circ\text{C}^{-1}]$	$\Phi_m[\%]$
$12,5 \cdot 10^{-6}$	0	3800	0,36	$5,2 \cdot 10^{-5}$	2,015

# Porovnání modelů pro C/PPS desky

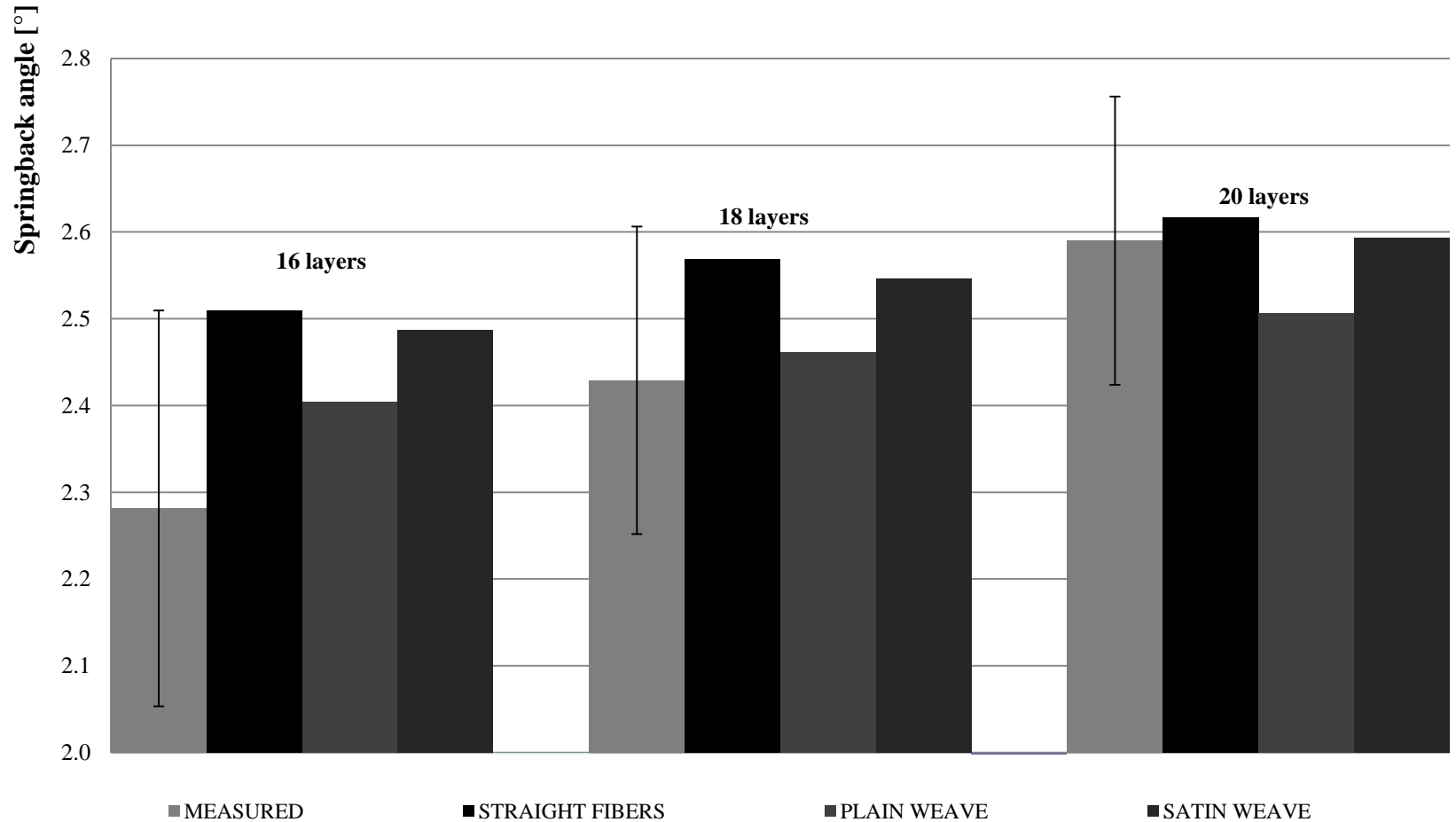


- závislosti pro ostatní termoelastické charakteristiky celého kompozitu byly stanoveny analogicky

# Porovnání modelů pro C/PPS desky



# Porovnání modelů pro C/PPS desky



# Porovnání modelů pro C/PPS desky

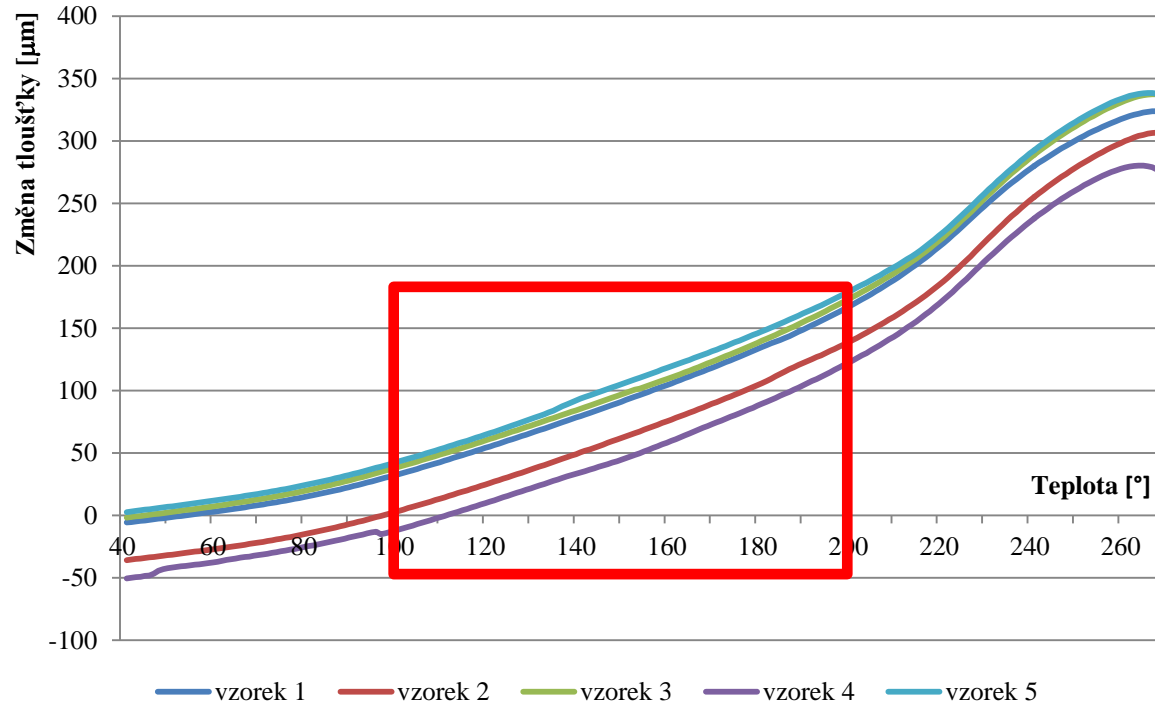
- tabulka koeficientů teplotních roztažností a koeficientů smrštění pro jednotlivé skladby

Skladba	PŘÍMÁ VLÁKNA			ATLASOVÁ VAZBA		
	$\alpha_x$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_y$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_z$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_x$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_y$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_z$ [C <sup>-1</sup> ]
[[ (0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	4,98e <sup>-6</sup>	4,98e <sup>-6</sup>	3,88e <sup>-5</sup>	5,08 e <sup>-6</sup>	5,08 e <sup>-6</sup>	3,86e <sup>-5</sup>
[[ (0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> /(0,90) ] <sub>s</sub>	4,70e <sup>-6</sup>	4,70e <sup>-6</sup>	3,93e <sup>-5</sup>	4,81 e <sup>-6</sup>	4,81 e <sup>-6</sup>	3,91e <sup>-5</sup>
[(0,90)/[(0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> /(0,90) ] <sub>s</sub>	4,48e <sup>-6</sup>	4,48e <sup>-6</sup>	3,98e <sup>-5</sup>	4,59e <sup>-6</sup>	4,59e <sup>-6</sup>	3,96e <sup>-5</sup>

Skladba	PŘÍMÁ VLÁKNA			ATLASOVÁ VAZBA		
	$\Phi_x$ [-]	$\Phi_y$ [-]	$\Phi_z$ [-]	$\Phi_x$ [-]	$\Phi_y$ [-]	$\Phi_z$ [-]
[[ (0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> ] <sub>s</sub>	1,14e <sup>-3</sup>	1,14e <sup>-3</sup>	9,73e <sup>-3</sup>	1,16e <sup>-3</sup>	1,16e <sup>-3</sup>	9,7e <sup>-3</sup>
[[ (0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> /(0,90) ] <sub>s</sub>	1,07e <sup>-3</sup>	1,07e <sup>-3</sup>	9,87e <sup>-3</sup>	1,1e <sup>-3</sup>	1,1e <sup>-3</sup>	9,81e <sup>-3</sup>
[(0,90)/[(0,90)/(±45) ] <sub>4</sub> /(0,90) ] <sub>s</sub>	1,01e <sup>-3</sup>	1,01e <sup>-3</sup>	9,97e <sup>-3</sup>	1,04e <sup>-3</sup>	1,04e <sup>-3</sup>	9,91e <sup>-3</sup>

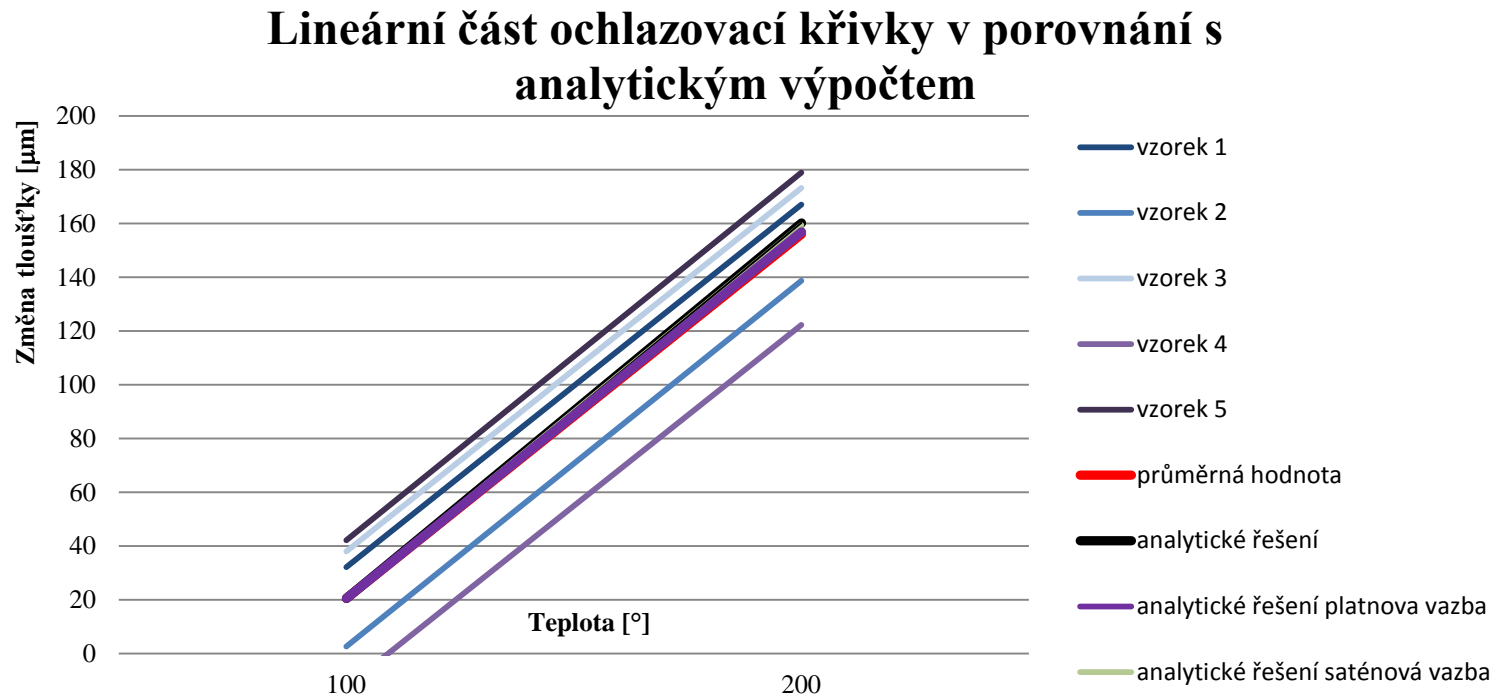
# Porovnání modelů pro C/PPS desky

- měření změny tloušťky kompozitní desky metodou TMA (Visteon-Autopal Services s.r.o., Nový Jičín), verifikace s analytickým modelem



# Porovnání modelů pro C/PPS desky

- pro srovnání s analytickým modelem – vybrána lineární část mezi 100 a 200°C (jen teplotní vliv na změnu tloušťky)



- dobrá shoda modelu s naměřenými hodnotami



# Vliv matrice na velikost zpětného odpružení

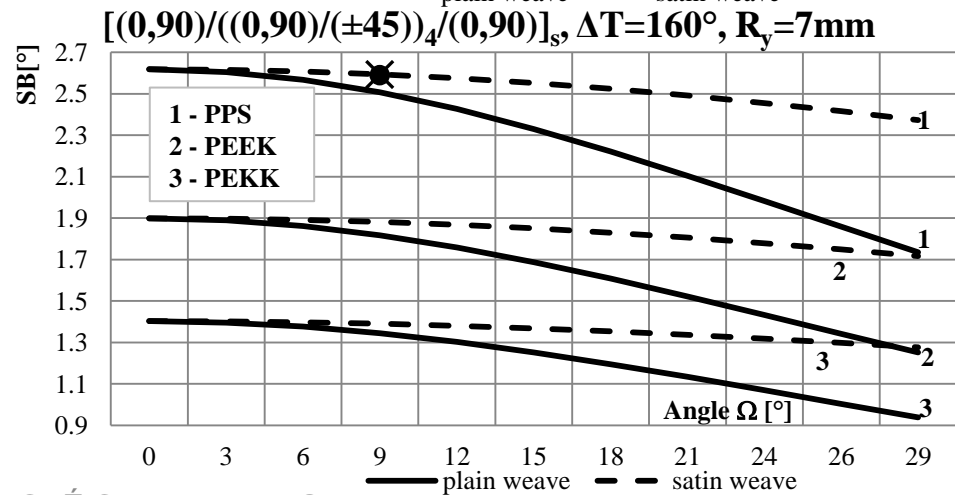
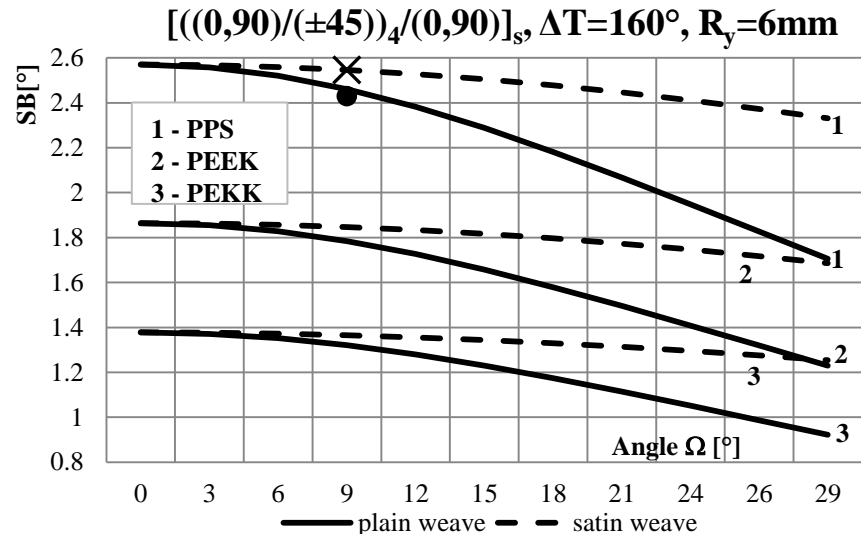
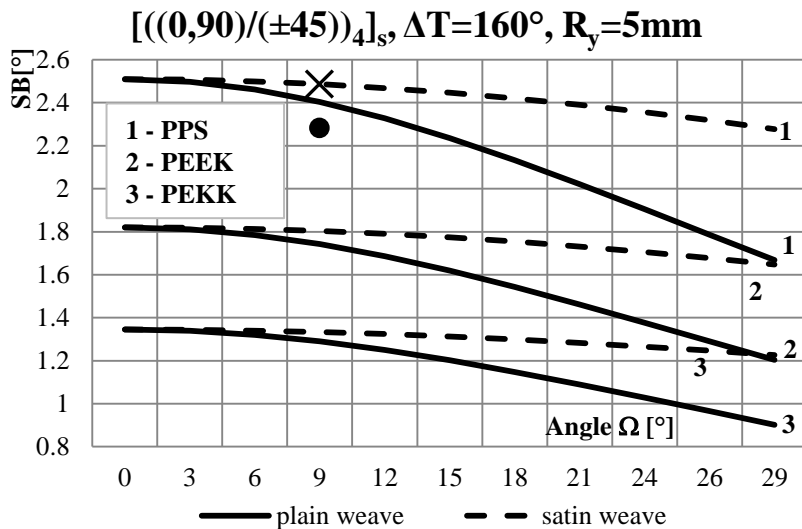
- porovnání C/PPS desek s deskami, které by byly vyrobeny z C/PEEK a C/PEKK (tkanina i objemový podíl vláken zůstává stejný, mění se jen matrice)
- vlastnosti vlákna

$E_{fL}$ [MPa]	$E_{fT}$ [MPa]	$\nu_f$ [-]	$G_{f12}$ [MPa]	$G_{f23}$ [MPa]	$\alpha_{fL}$ [C <sup>-1</sup> ]	$\alpha_{fT}$ [C <sup>-1</sup> ]	$\Phi_f$ [%]
230000	15000	0,3	50000	27000	-3,8.10 <sup>-7</sup>	12,5.10 <sup>-6</sup>	0

- vlastnosti matric

<b>Matrice</b>	$E_m$ [MPa]	$\nu_m$ [-]	$\alpha_m$ [°C <sup>-1</sup> ]	$\Phi_m$ [%]	<b>Relativní cena</b>
<b>PPS</b>	3800	0,36	5,2.10 <sup>-5</sup>	2,015	\$
<b>PEEK</b>	3500	0,4	4,7.10 <sup>-5</sup>	1,15	\$\$\$
<b>PEKK</b>	4400	0,4	2,1.10 <sup>-5</sup>	1	\$\$

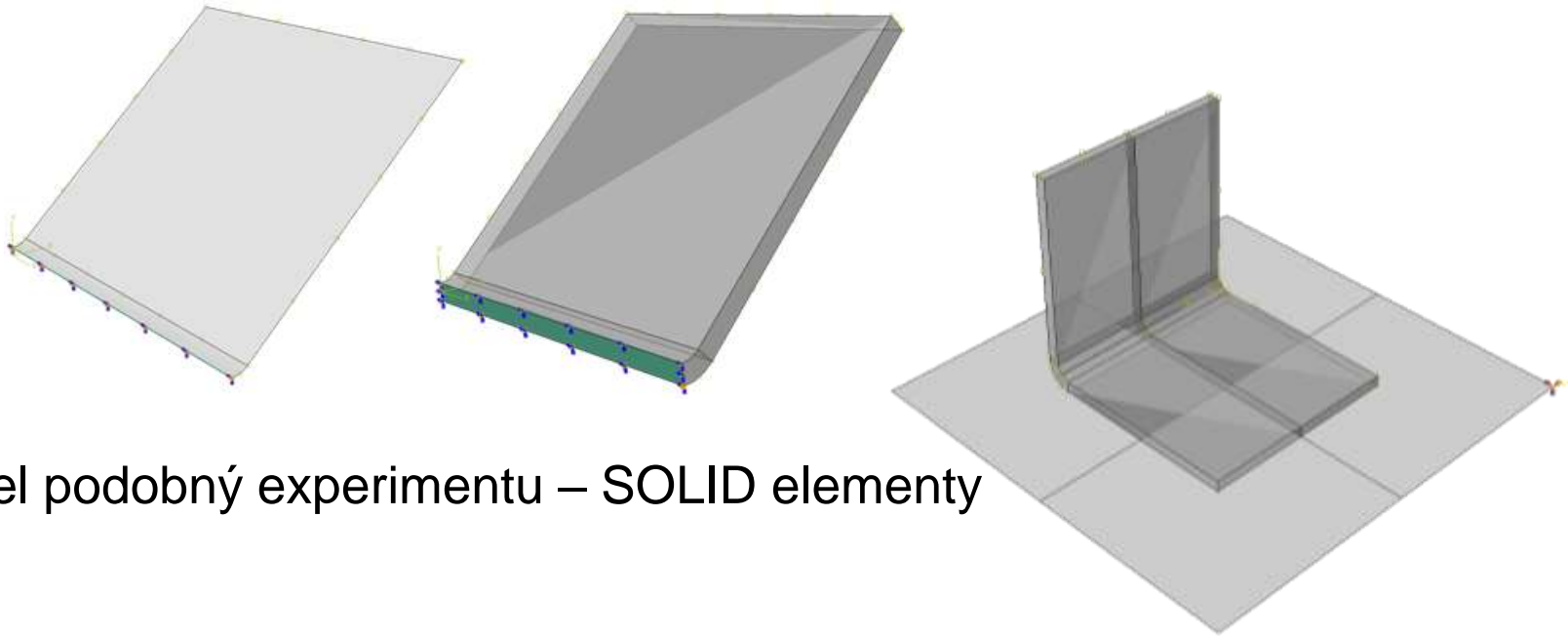
# Vliv matrice na velikost zpětného odpružení



- • naměřená data z výroby
- X analyticky vypočtená hodnota

# Numerický model

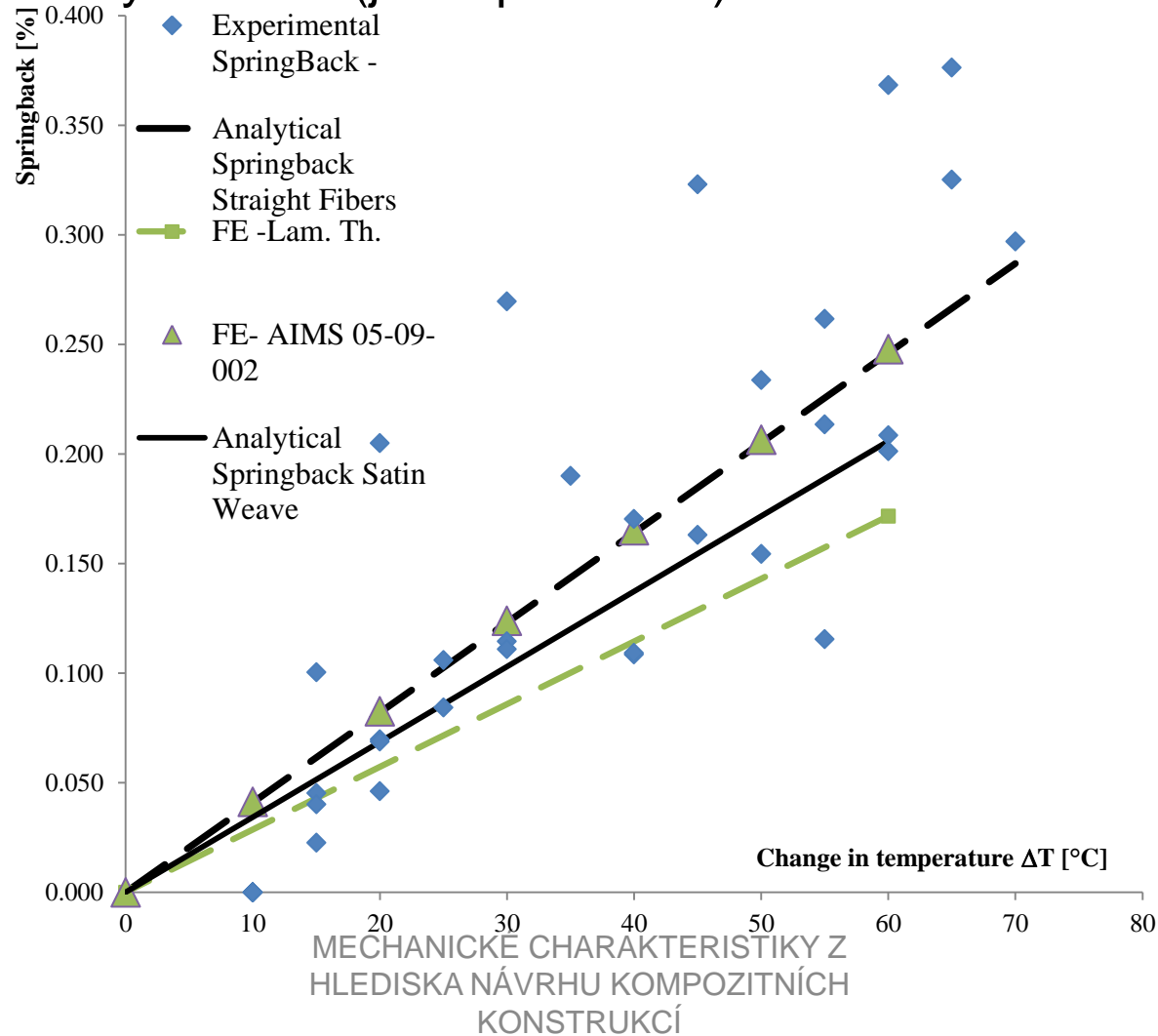
- porovnání s experimentem provedeným ve spolupráci s Laboratoří biomechaniky člověka (jen teplotní vliv)
- porovnání s daty naměřenými u výrobce
- metoda konečných prvků – software Abaqus
- porovnání SHELL, CONTINUUM SHELL a SOLID elementů



- model podobný experimentu – SOLID elementy 3D8I

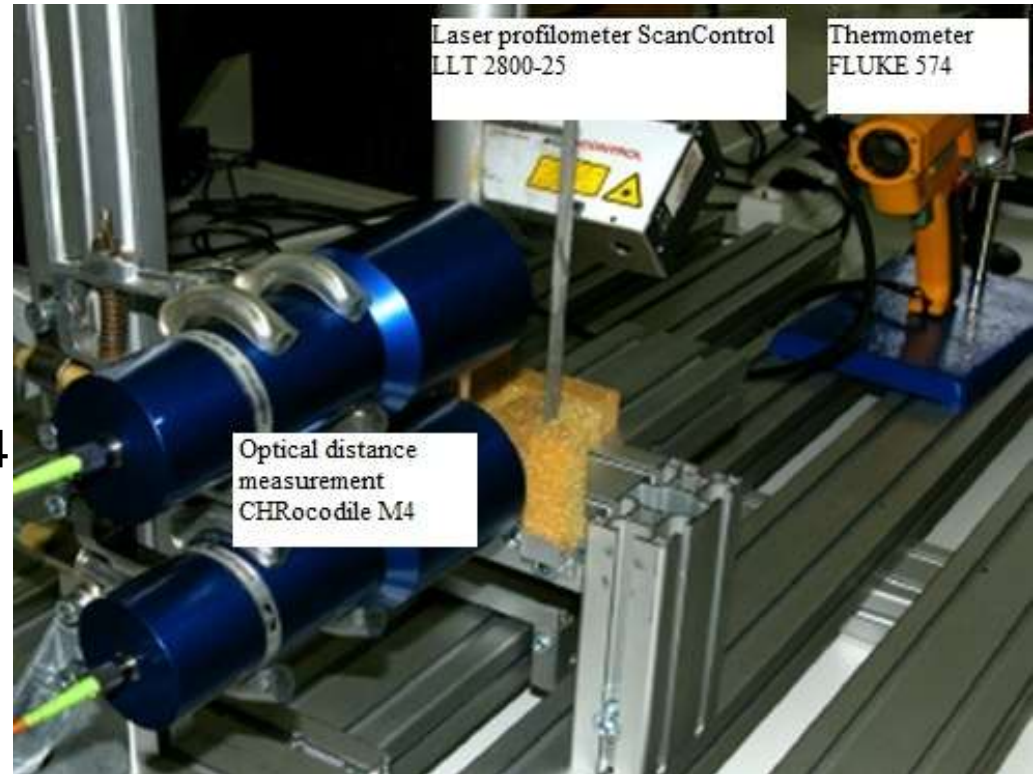
# Numerický model

- porovnání s experimentem provedeným ve spolupráci s Laboratoří biomechaniky člověka (jen teplotní vliv)



# Experiment

- hlavním cílem bylo zjistit deformaci úhelníku vlivem změny teploty
- teplotní čidlo PT 100
- bezdotykový infračervený teploměr FLUKE 574
- laserový profilometr ScanControl LLT 2800-25
- optické sondy na měření vzdálenosti CHRocodile M4

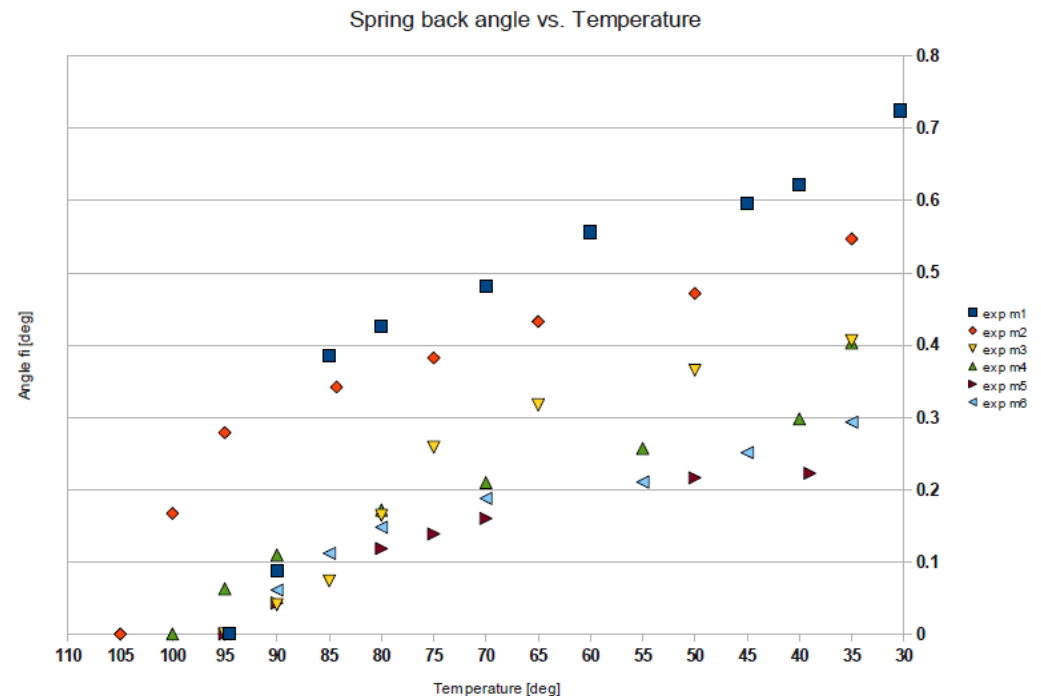


# Experiment

- vzorek byl ohřát v peci na cca 100°C, vyjmut a následně chlazen na pokojové teplotě (25-27°C)
- měření začínalo na cca 95°C a končilo na cca 35° a trvalo cca 30 minut
- provedeno 7 měření
- vzorkovací frekvence laseru byla 20Hz
- vzorkovací frekvence optických sond byla 32Hz

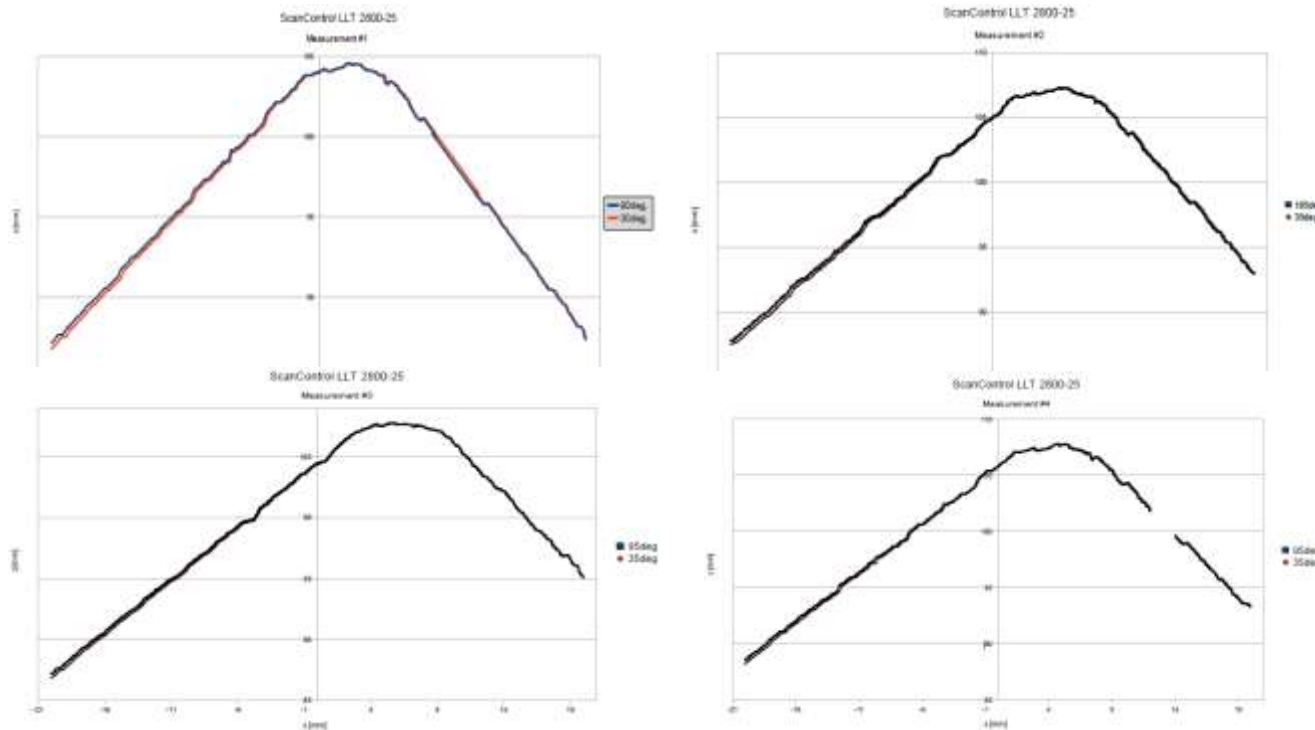
# Experiment

- data z měření pomocí CHRocodile M4
- sondy zaměřily dva body na vertikální části ve vzájemné vzdálenosti 88,3 mm
- výstupem byl posuv bodů, který byl následně přepočítán na úhlovou změnu



# Experiment

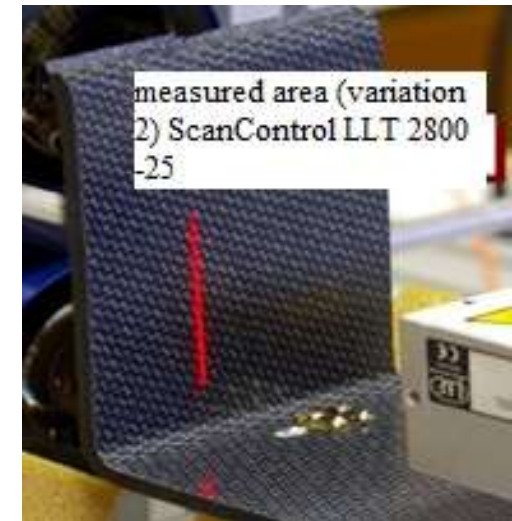
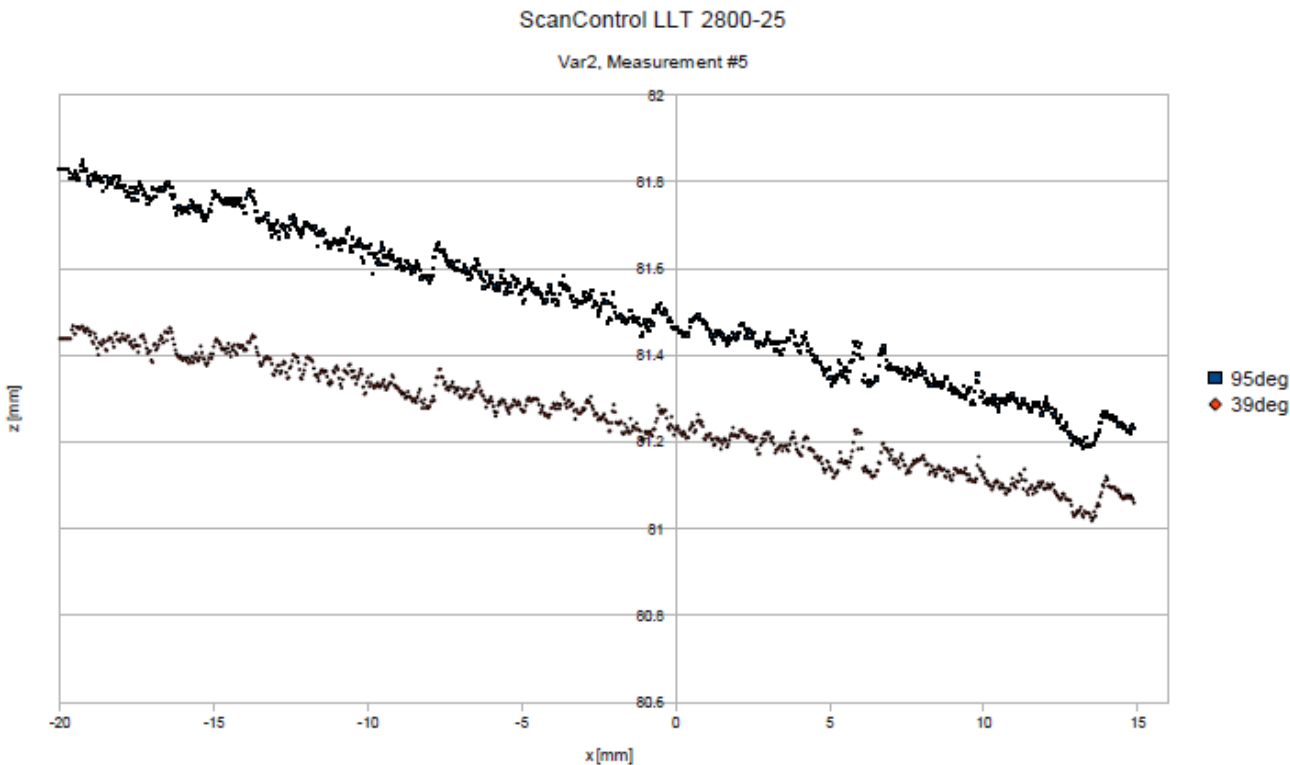
- data z měření pomocí ScanControl LLT 2800-25
- varianta 1
- měření 20 mm horizontální a 20 mm vertikální části





# Experiment

- data z měření pomocí ScanControl LLT 2800-25
- varianta 2
- měření vertikální části

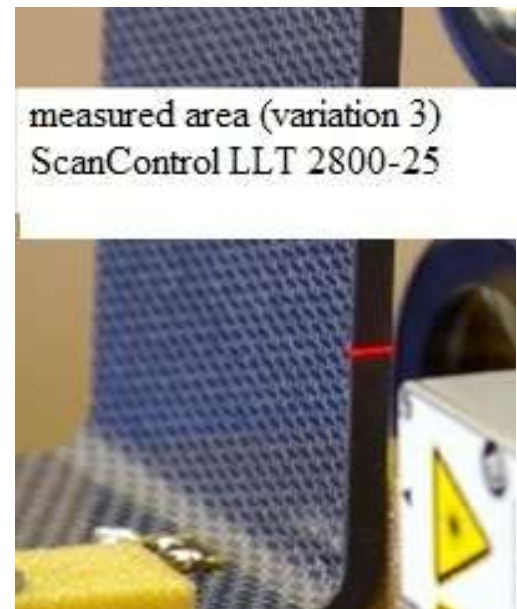
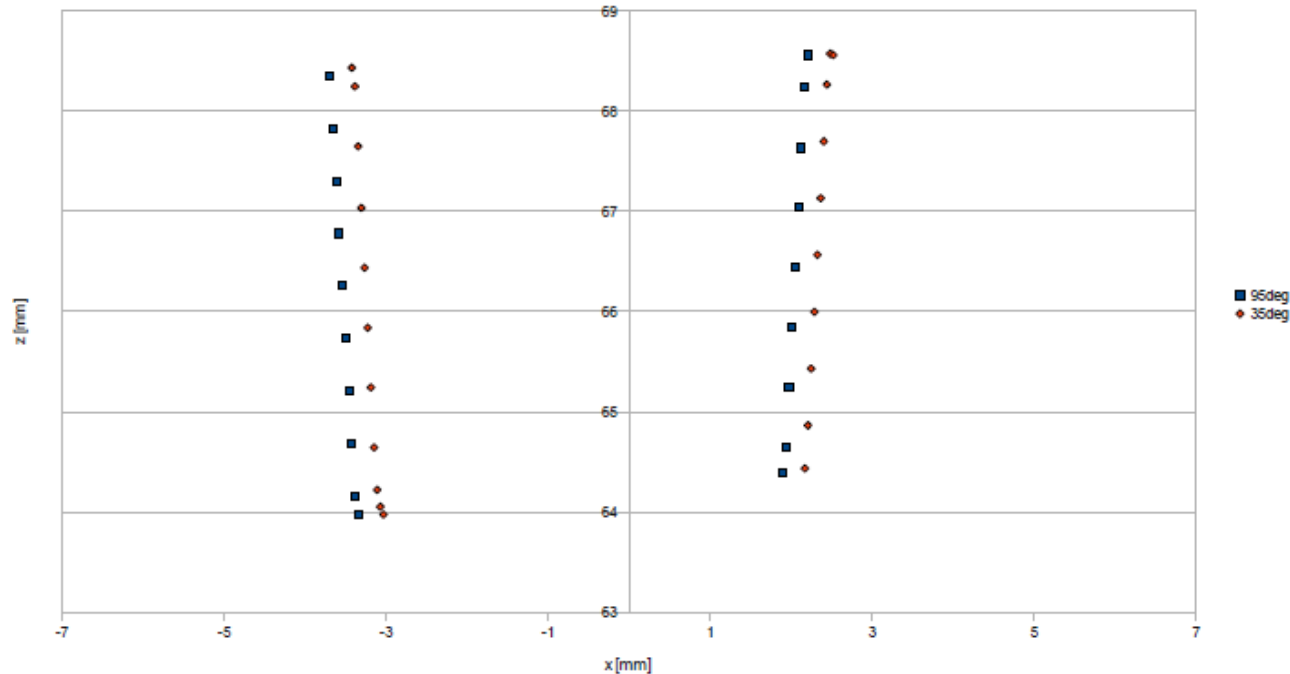


# Experiment

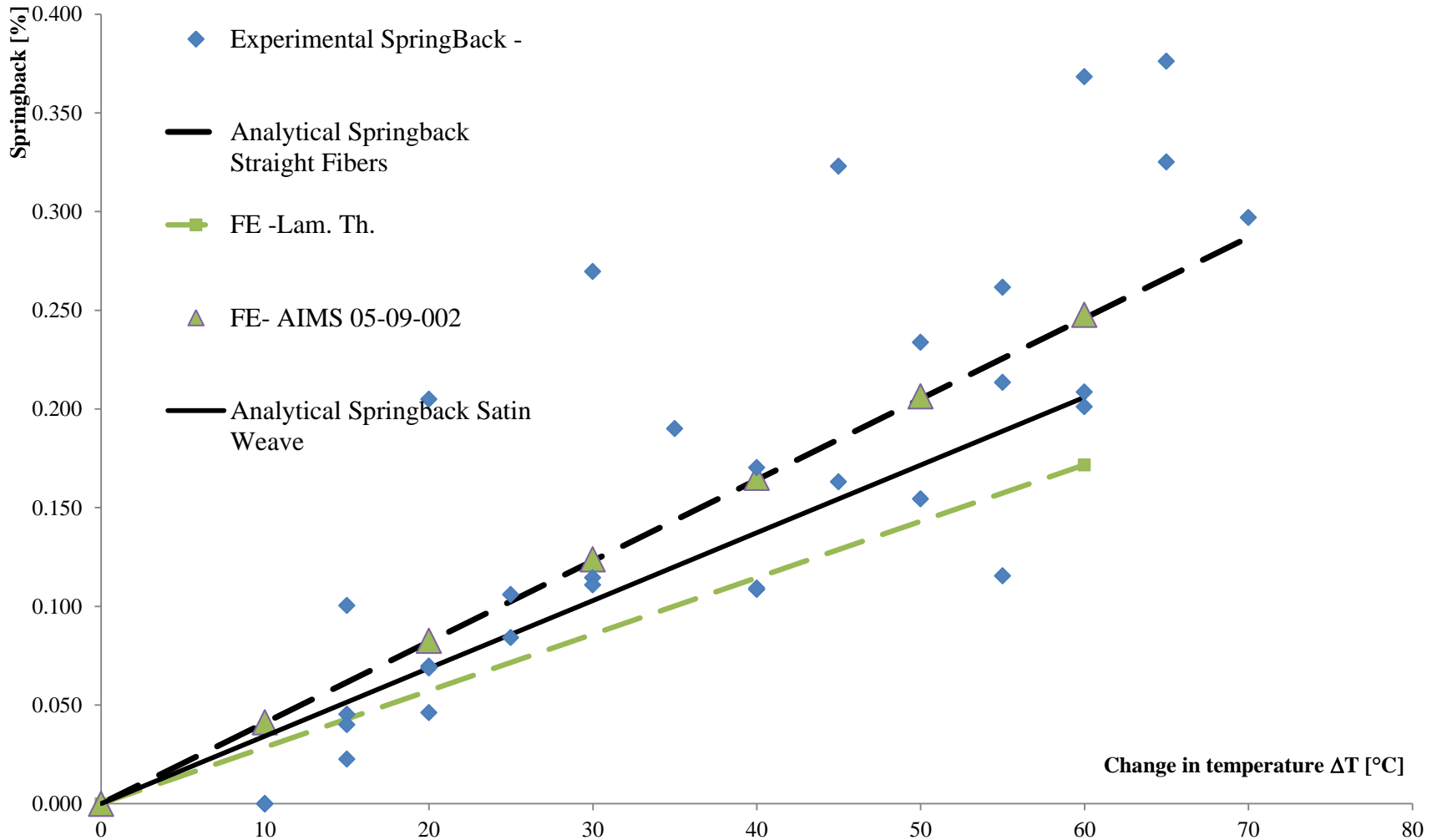
- data z měření pomocí ScanControl LLT 2800-25
- varianta 3
- měření po tloušťce

ScanControl LLT 2800-25

Var3, Measurement #8



# Experiment

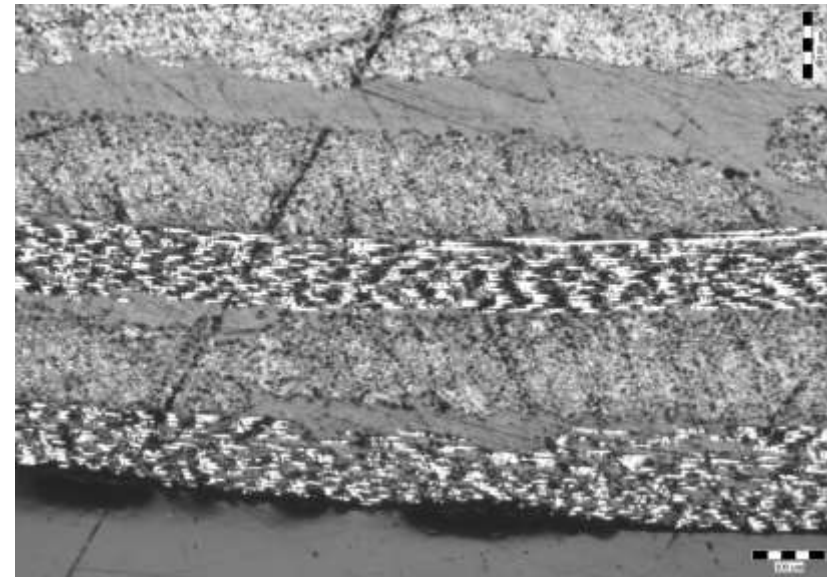


# Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiech

- vlivem výrobní technologie vzniká v rádiech dílů gradient objemového podílu vláken, který vede ke značné nesymetrii laminátu
- skladba je symetrická geometricky - příslušné vrstvě nad neutrálnou osou odpovídá vrstva pod neutrálnou osou, avšak vlivem proměnnému objemovému podílu si neodpovídají termoelastické charakteristiky v těchto příslušných vrstvách
- vrstva, která je v kontaktu s tvářecím nástrojem má nejvyšší objemový podíl vláken, vrstva která je nejdále má objemový podíl nejnižší

# Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiech

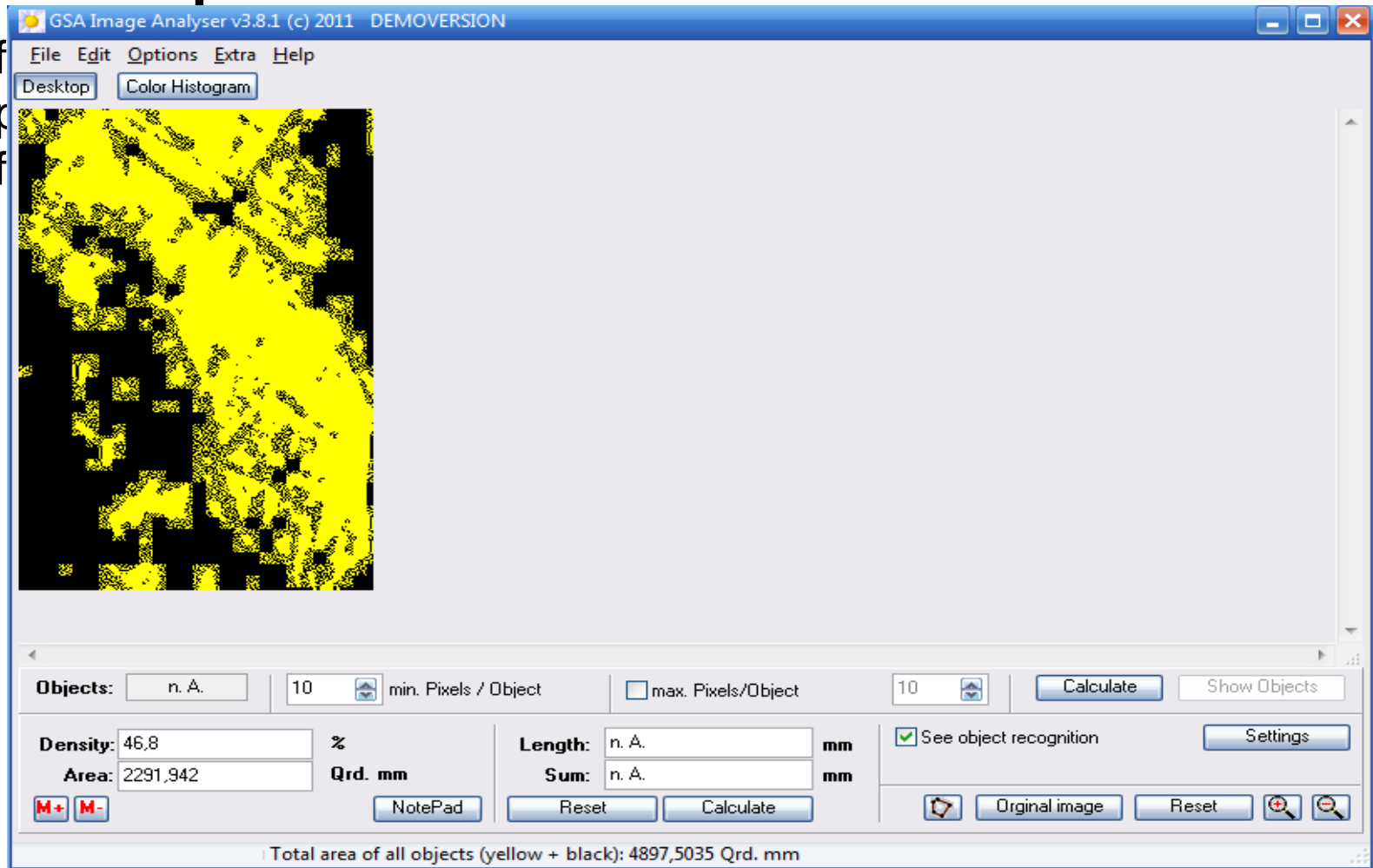
- 3 vybroušené vzorky (16, 18 a 20 vrstev)
- přes elektronový mikroskop, který byl propojen s počítačem a kamerou byly pořízeny fotografie skladby jednotlivých vzorků



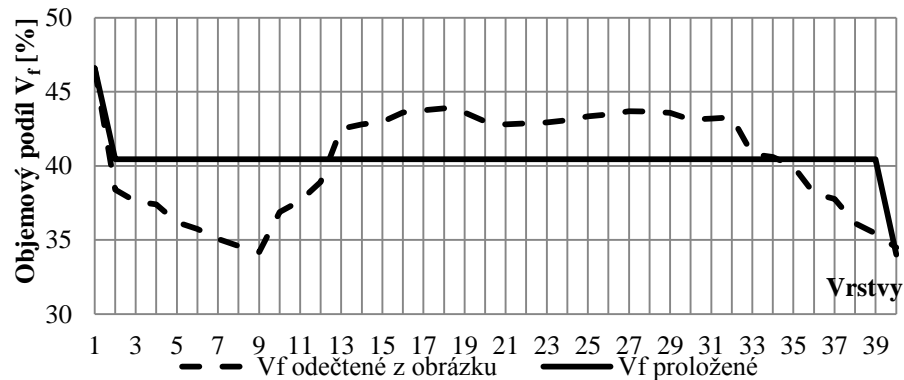
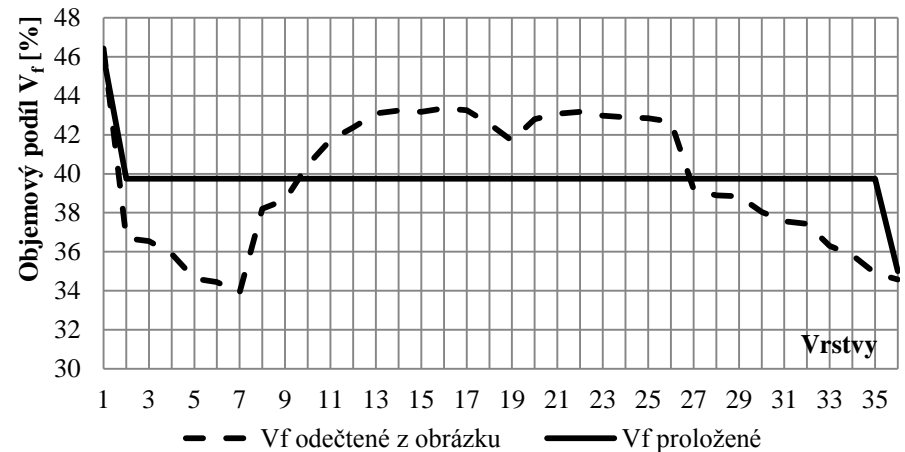
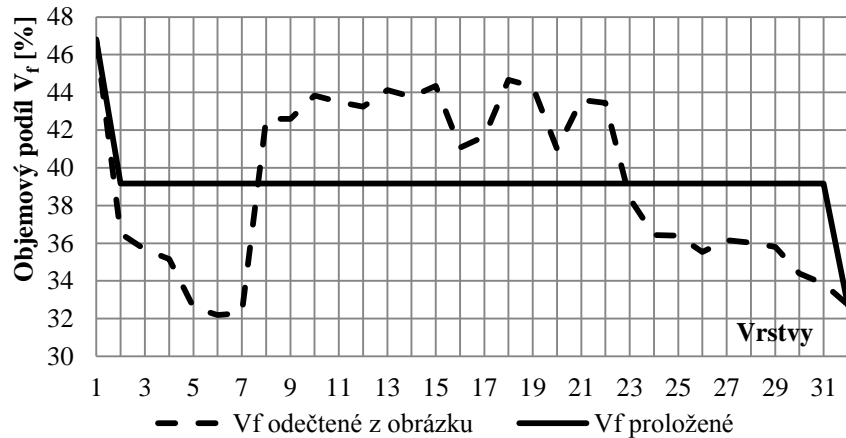
# Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiech

- 

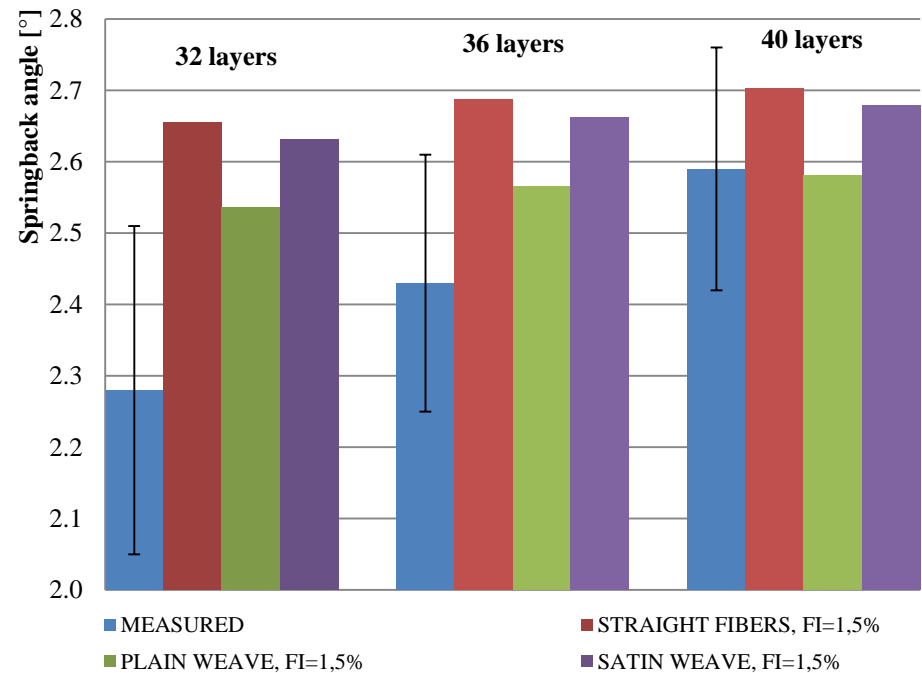
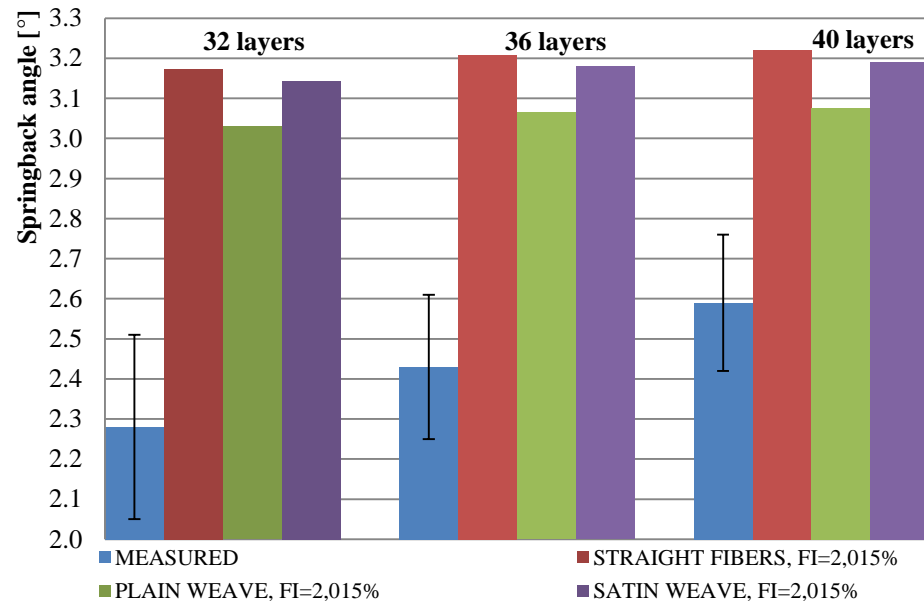
v  
e



# Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiích



# Vliv proměnného objemového podílu vláken v rádiech



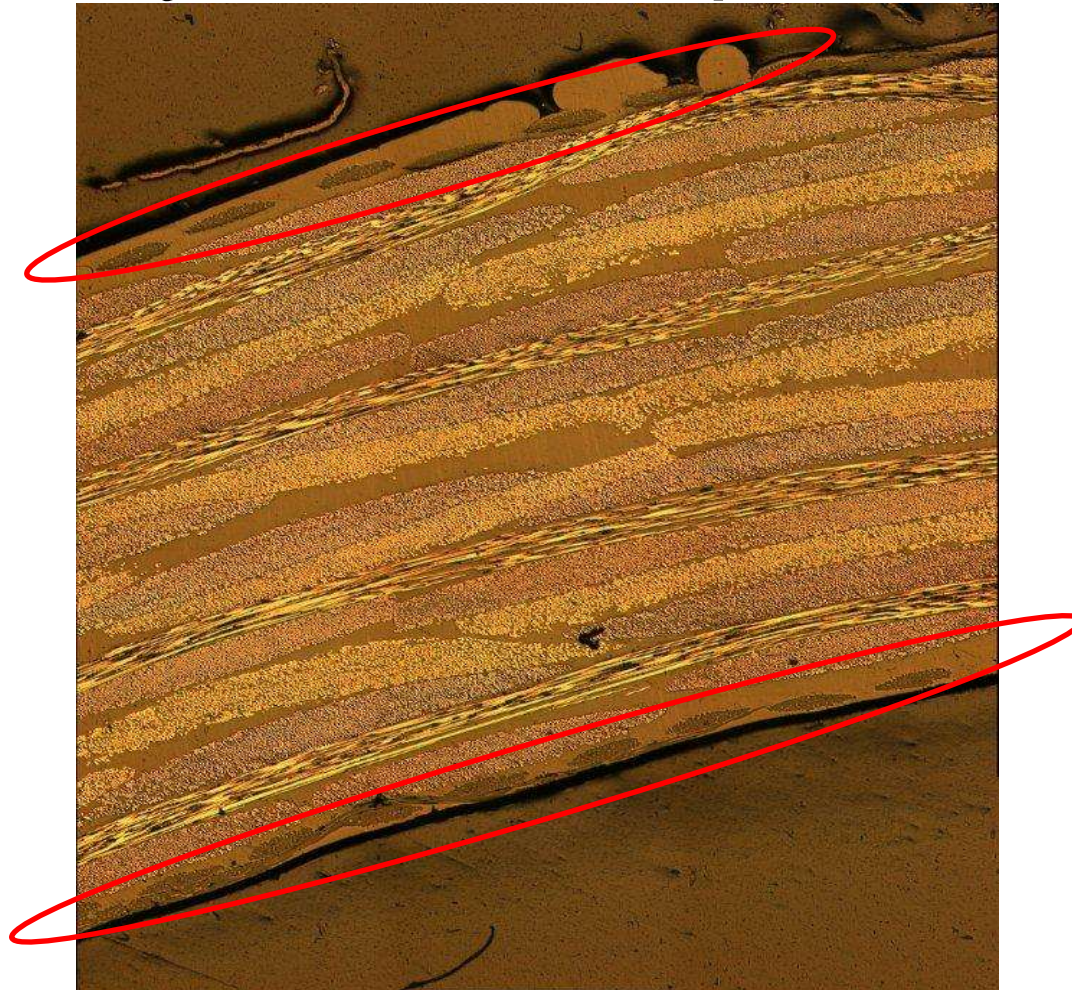


# Aplikace analytického modelu na hybridní kompozit

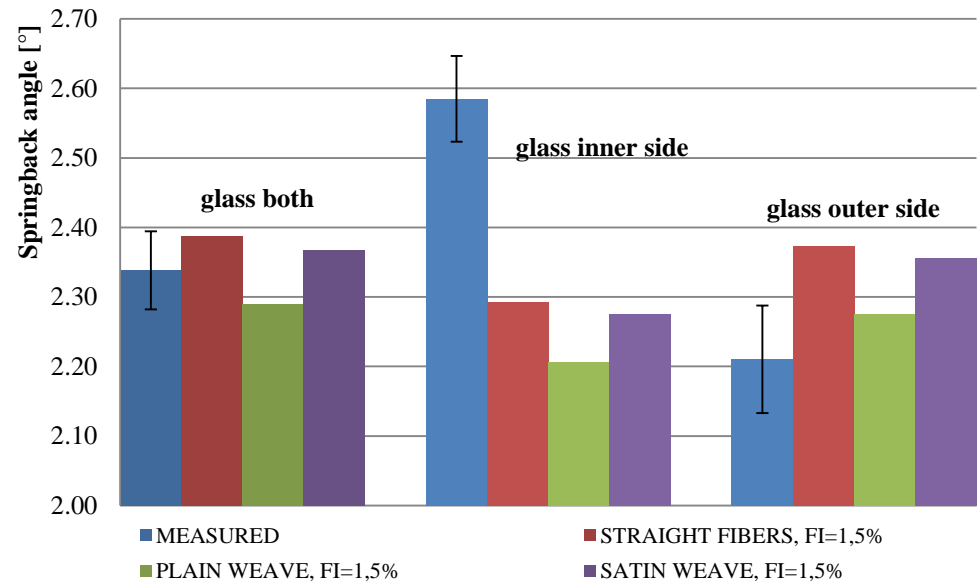
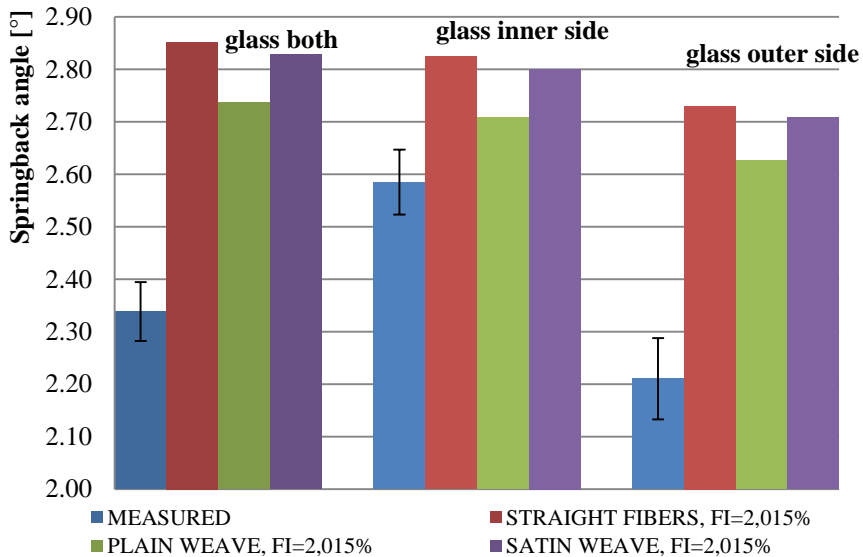
- kompozitní deska s jednou křivostí, 8 vrstev tkaniny s uhlíkovou výztuží plus 1 vrstva tkaniny se skleněnou výztuží zevnitř (respektive zvenku nebo na obou stranách)
- tkanina 4H satin (atlasová vazba), dostava ve směru osnovy a útku  $n_x=n_y=6$  na 1 cm, tloušťka  $h=0,04$  mm, objemový podíl skelného vlákna  $V_f=50,5$  %

<i>Počet vrstev</i>	<i>Skladba</i>	<i>Poloměr <math>R_y</math> [mm]</i>	<i>Velikost úhlu [°]</i>
8C+2G	<b>(0,90)</b> /[ [(0,90)/(±45)] <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> / <b>(0,90)</b>	5,662	99,647
8C+1G	<b>(0,90)</b> /[ [(0,90)/(±45)] <sub>2</sub> ] <sub>s</sub>	5,662	99,647
8C+1G	[[(0,90)/(±45)] <sub>2</sub> ] <sub>s</sub> / <b>(0,90)</b>	5,662	99,647

# Aplikace analytického modelu na hybridní kompozit



# Aplikace analytického modelu na hybridní kompozit

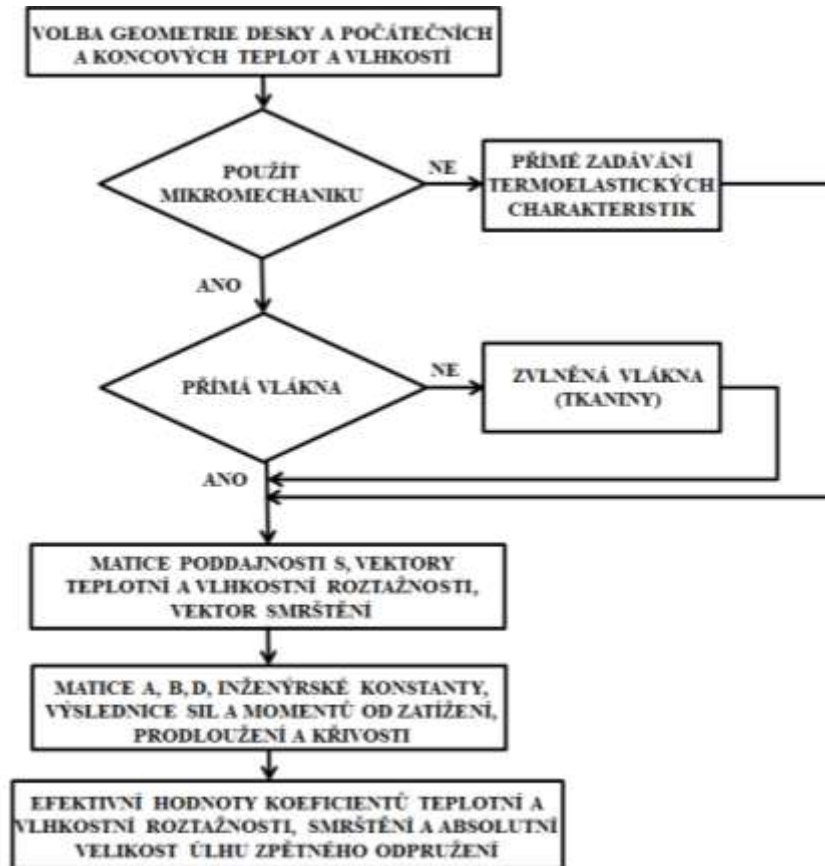


# Ukázka programu

- vytvořen program v Matlabu
- možnost výběru analytického modelu
  - přímá vlákna x zvlněná vlákna (tkaniny) x přímé zadávání prvků matice **S** a vektorů pro koeficienty teplotní roztažnosti, absorpce vlhkosti a smrštění
- uživatel zadává skladbu jednotlivých vrstev - každá vrstva může být složena z jiného vlákna, jiné matrice (v případě tkanin i jiná dostava a jiná vazba), může mít jinou tloušťku a rovněž mít jiný objemový podíl → možnost výpočtu hybridních kompozitů (jak interlaminární tak intralaminární hybridy)
- uživatel dále volí, zda je deska rovná, nebo má jednu (případně dvě křivosti), zadává počáteční a koncovou teplotu (respektive vlhkost)
- k programu v Matlabu bylo vytvořeno uživatelské rozhraní v jazyce Java

# Ukázka programu

- vývojový diagram



# Ukázka programu

Computational Model | Material & Lay up | Computations | Composite | Results

**Fibers**

- straight fibers
- undulated fibers
- S matrix +  $a, \beta, \phi$  vectors

**Curvatures and part angle**

Radius in x direction: 1.5  
Radius in y direction: 1.5  
Part angle: 90

**Moisture**

Initial moisture: 20  
Final moisture: 10

**Temperature**

Initial temperature: 20 °C  
Final temperature: 10 °C

**Matrix S**

2	5	1	7	4	1
1	9	41	4	9	3
5	3	5	1	4	3
6	4	2	5	8	4
3	3	1	6	5	8
3	2	1	4	1	66

Alpha: 

1
2
3
0
0
0

 Beta: 

1
2
3
0
0
0

 Phi: 

1
2
3
0
0
0

EL: 0  
ET: 0  
GLT: 0  
GT3: 0  
mLT: 0

Number of Layers: 1 | Layer number: 1  
Thickness of the layer: 1 | Angle of the layer: 45

Compute S | Input Layer

# Ukázka programu

Layer No.	Fiber	Matrix	Volumetric fibr...	Thickness of L...	Angle of fibers	Number of thr...	Number of thr...	Ratio of the ar...	Number of the...	Number of the...	Thickness of L...
1	I600	peek	49	1	45	7	7	1	1	0	0.3
2	sklo	peek	20	2	90	7	7	1	1	0	0.3
3	I600	peek	49	3	0	7	7	1	1	0	0.3
4	sklo	peek	20	4	45	7	7	1	1	0	0.3
5											
6											
7											
8											
9											
10											
11											
12											
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											

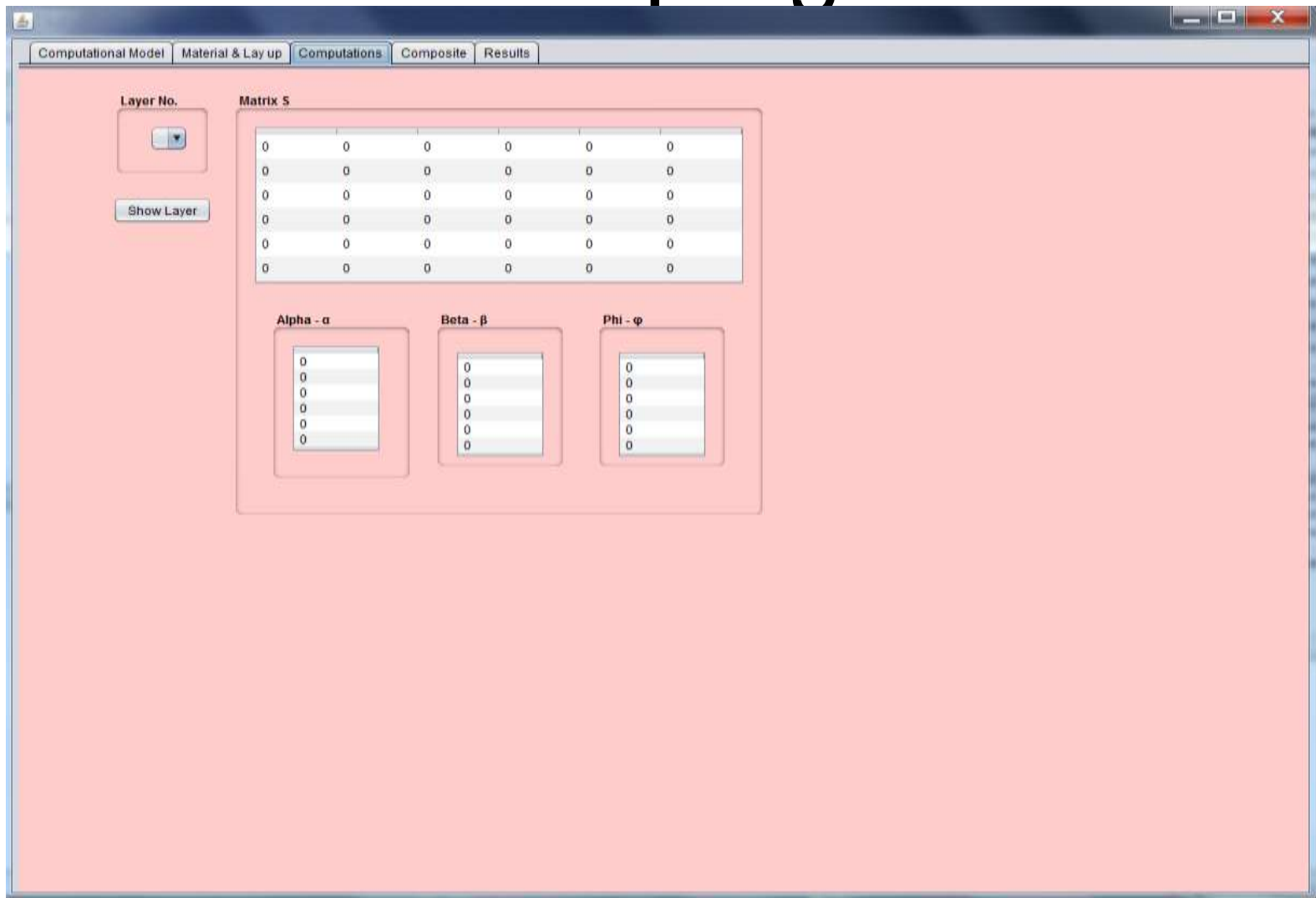
Number of Layers:

Layer copy

from:

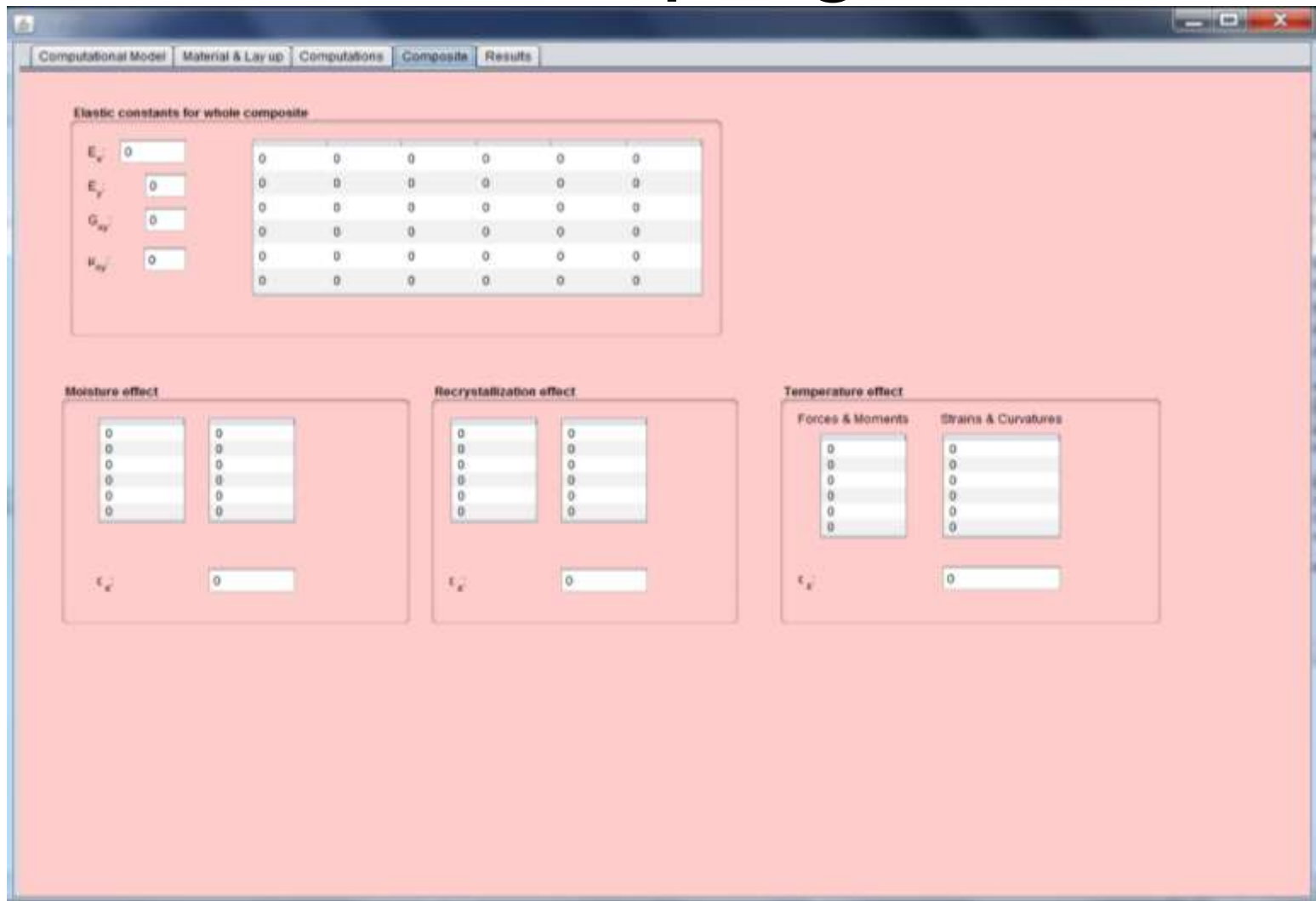
to:

# Ukázka programu

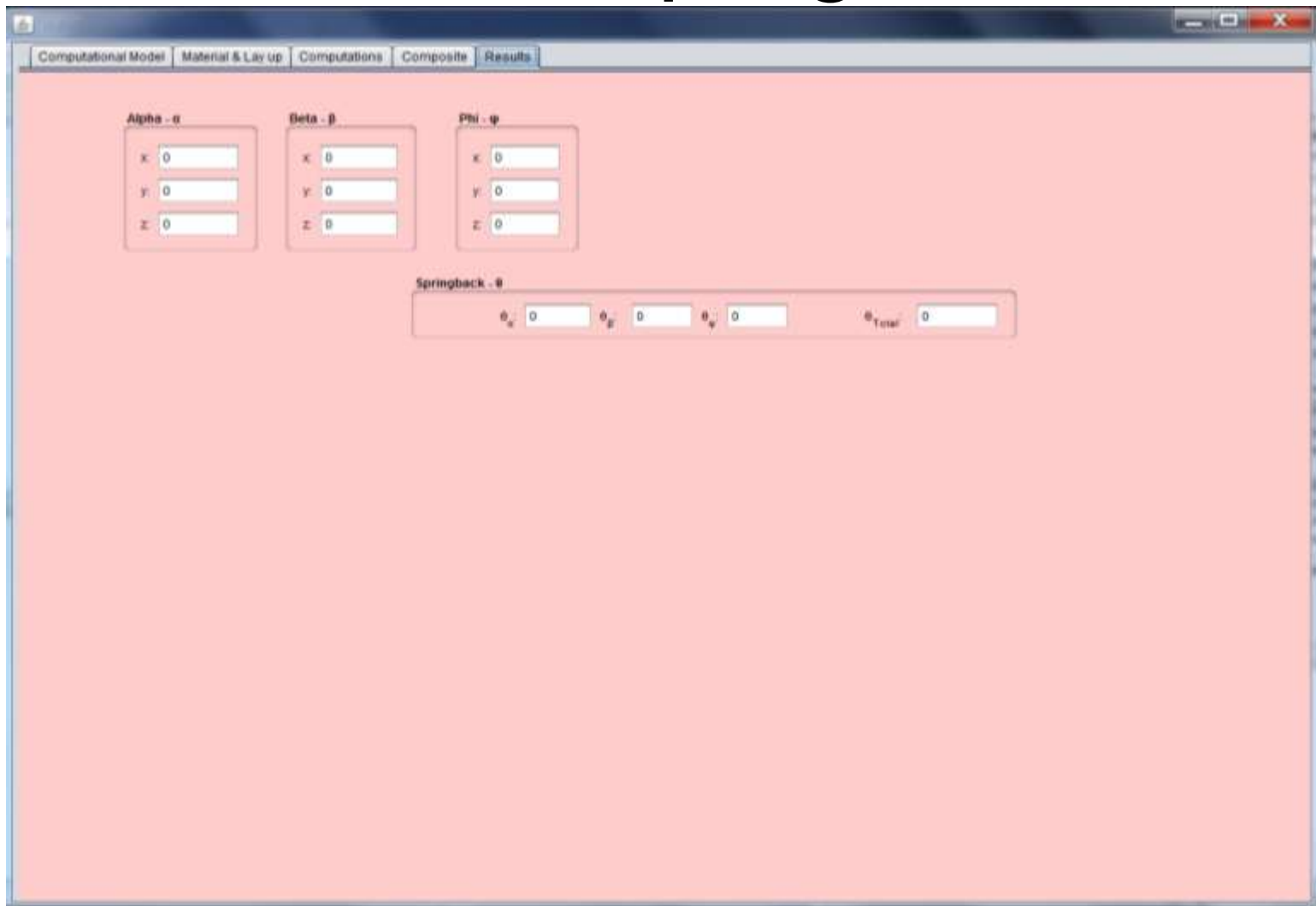




# Ukázka programu



# Ukázka programu



# Závěr a poděkování

- v rámci projektu Ministerstva průmyslu a obchodu ČR FR-TI1/463 a SGS12/176/OHK2/3T/12 Grantové agentury ČVUT v Praze byl sestaven analytický program pro výpočet zpětného odpružení úhlových sekcí kompozitních dílů
- analytický program umožňuje zadání jak přímých, tak zvlněných vláken (plátnová, keprová a atlasová vazba tkaniny) a výpočet zpětného odpružení i pro intra- a interlaminární hybridní kompozity
- výsledky vypočítané pomocí vytvořeného programu byly průběžně verifikovány s výsledky z výroby a s výsledky z experimentu realizovaného ve spolupráci s Laboratoří biomechaniky člověka a s výsledky získanými pomocí MKP softwaru Abaqus
- bylo dosaženo dobré shody analyticky predikovaných výsledků s výsledky z výroby
- program je možné použít jako nástroj pro predikci zpětného odpružení a s ním související korekce tvářecí formy