



ČVUT

ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE



Research Fund
for Coal & Steel

STABFI

Ohybová tuhost sendvičových panelů

Kamila Cábová



Motivace

Seznámení s podklady
pro analytický model ohybové tuhosti
sendvičových panelů



RFCS 751583

Steel cladding systems for **stab**ilization of steel buildings in **fire**

Obsah přednášky

- Úvod
- **Experimenty**
- **Numerické modely**
- **Analytický model**
 - Validace a doporučení
- Shrnutí

Úvod

Interakce mezi pláštěm a ocelovou konstrukcí je ovlivněna tuhostí a únosností:

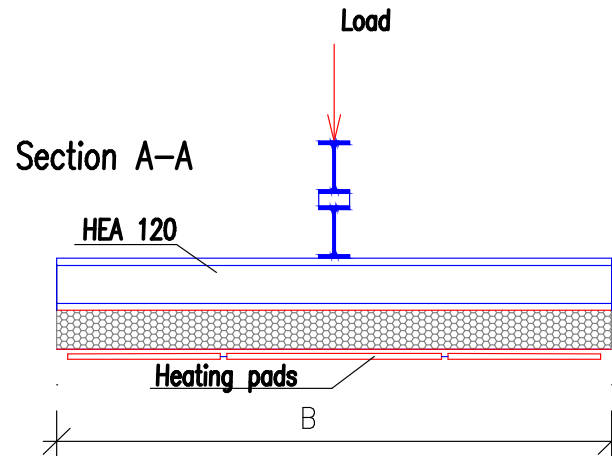
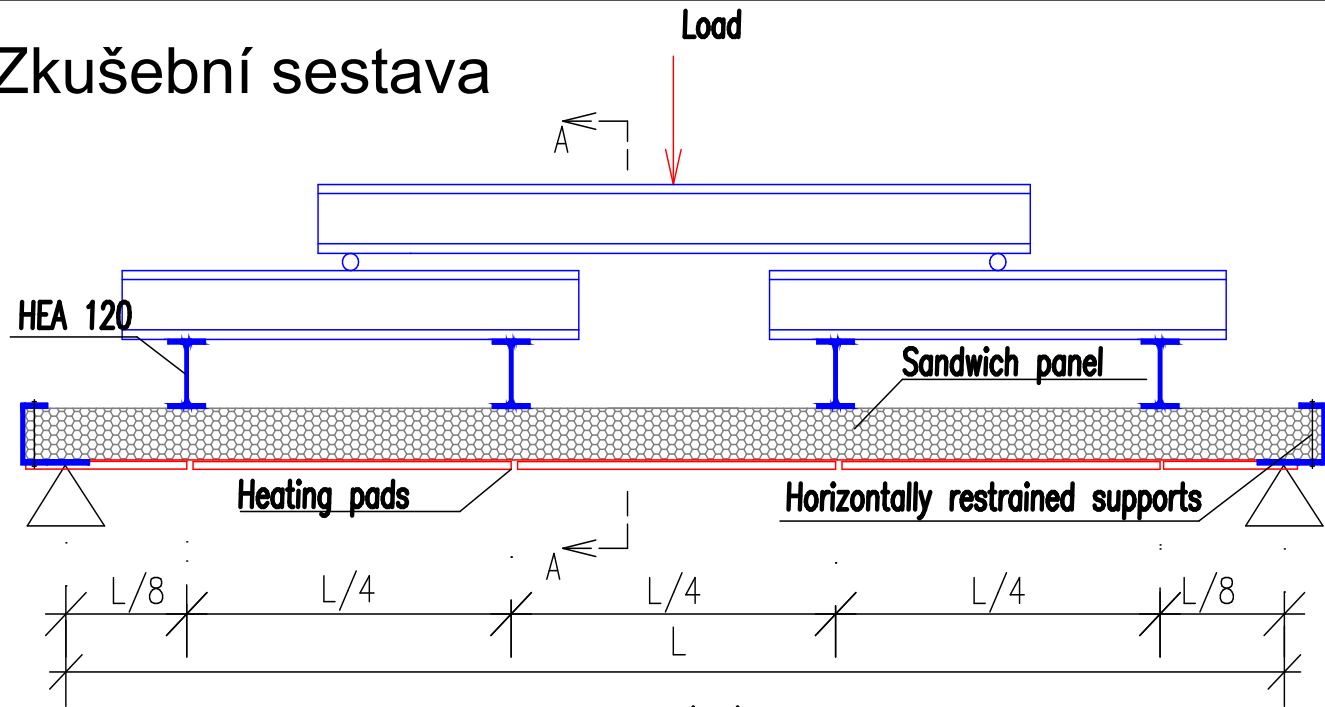
- spojů / spojovacích prostředků
- sendvičových panelů

Přednáška se zabývá

tuhostí a únosností sendvičových panelů v ohybu při požáru.

Experimenty v ohybu

- Zkušební sestava



Zkušební sestava



Rozsah zkoušek

celkem 18 zkoušek

Test configuration			Specimen size	
Panel	Panel thickness (mm)	Temperature (°C)	1200x2500 (mm)	1200x4000 (mm)
MV	100	20	1 test	0
		300	1 test	0
		450	1 test	0
		600	1 test	0
	230	20	1 test	0
		200	1 test	0
		300	1 test	1 test
		450	1 test	0
600	1 test	0		
Panel	Panel thickness (mm)	Temperature (°C)	1000x2500 (mm)	1000x4000 (mm)
PIR	100	20	1 test	0
		200	1 test	0
		250	1 test	0
		300	1 test	0
	160	20	1 test	0
		150	1 test	0
		200	1 test	0
		300	0	1 test

Zahřívání panelů

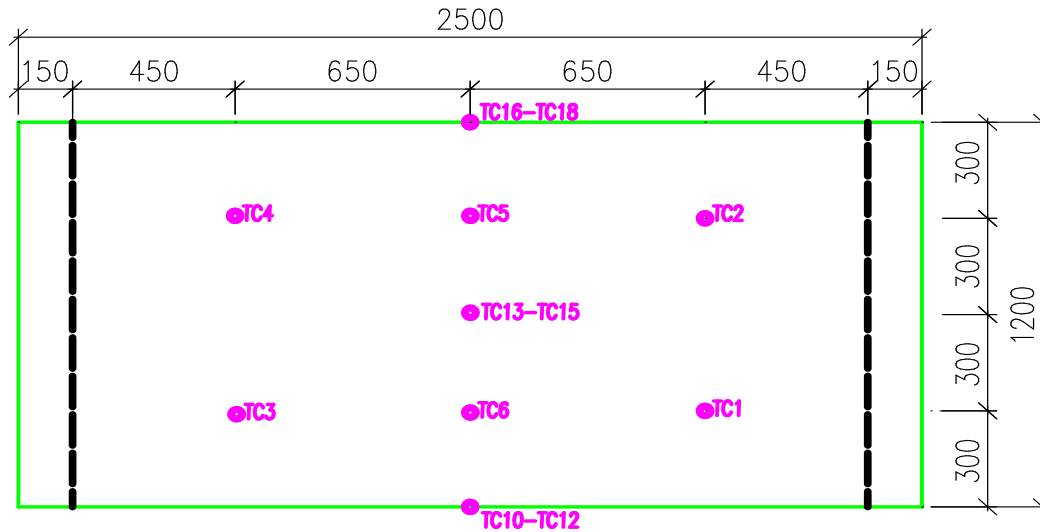


- Mannings HTC 70kVA
- Keramické dečky

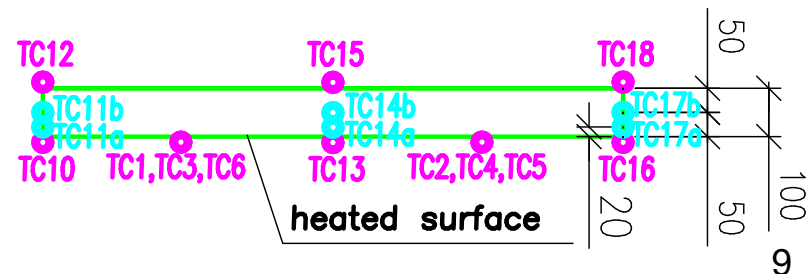
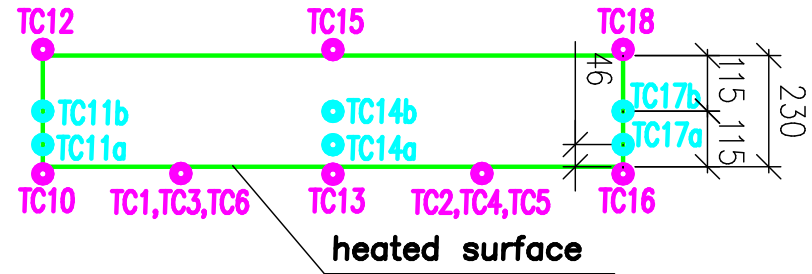


Rozmístění hřebíků a keramických deček

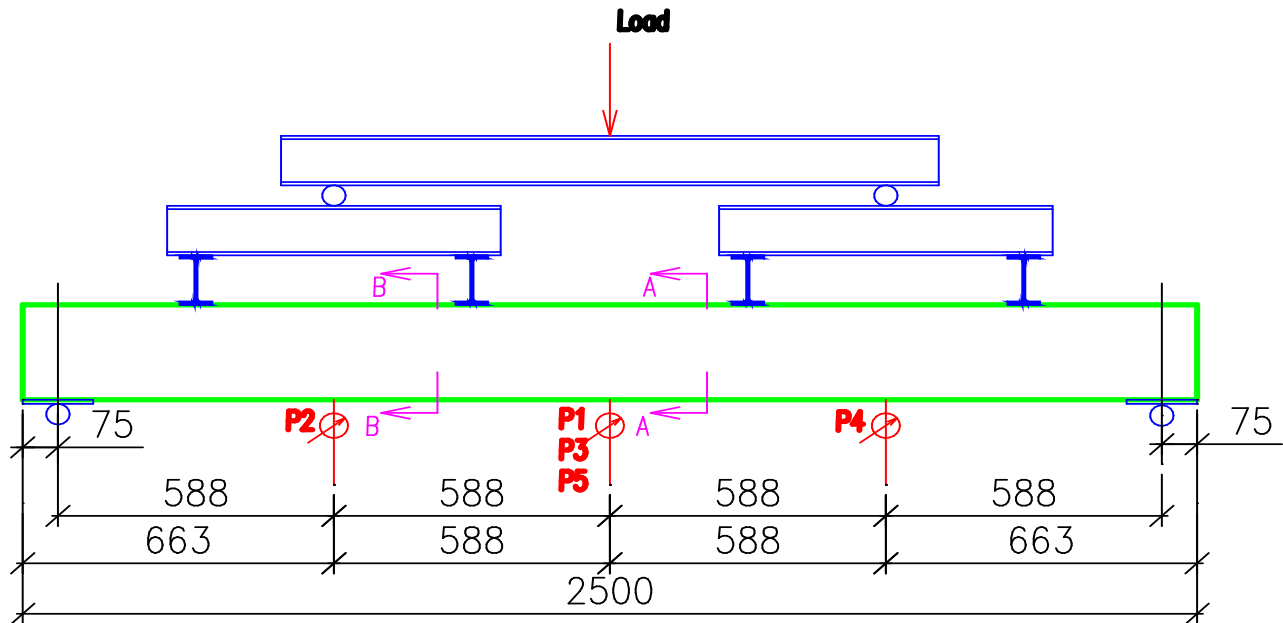
Měření teploty



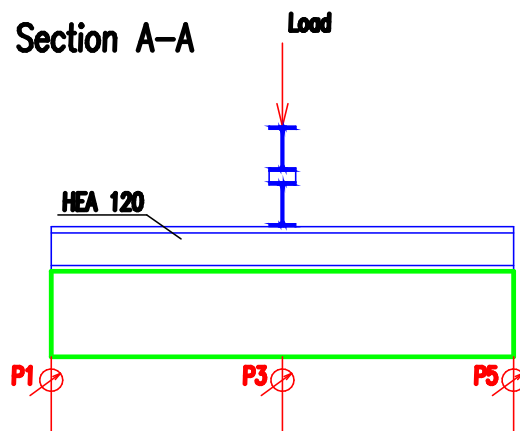
- Vnitřní plech
- Vnější plech
- Jádro panelu



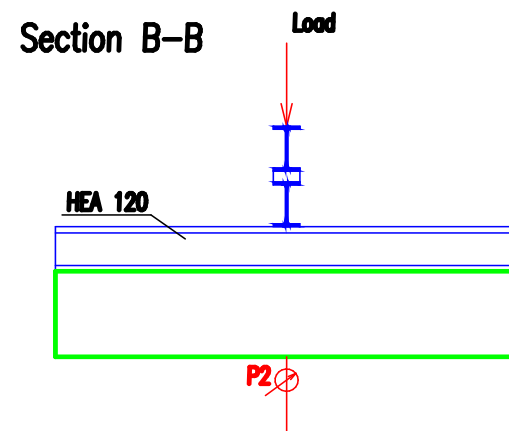
Měření deformace



Section A-A

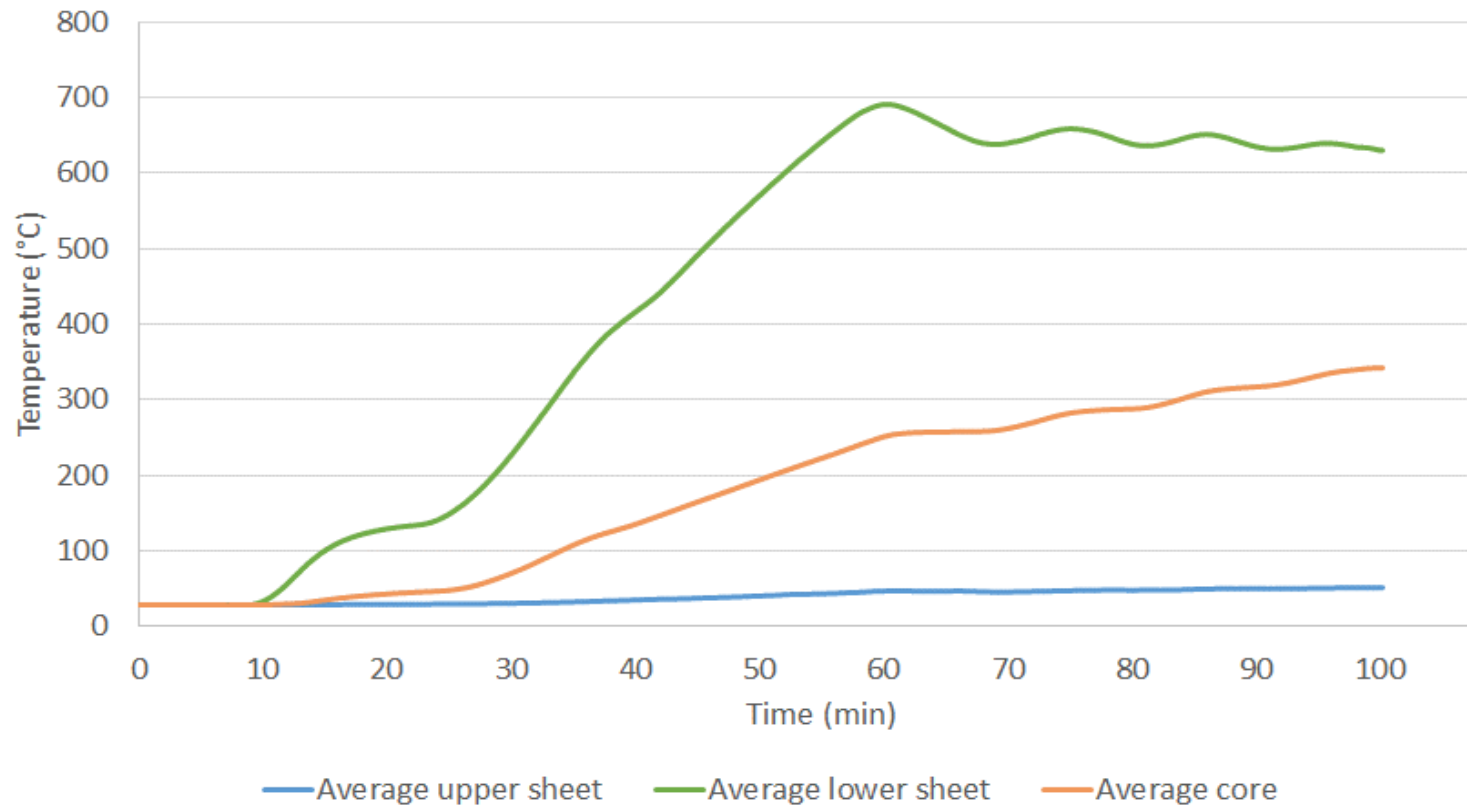


Section B-B



Panel s jádrem z minerální vaty

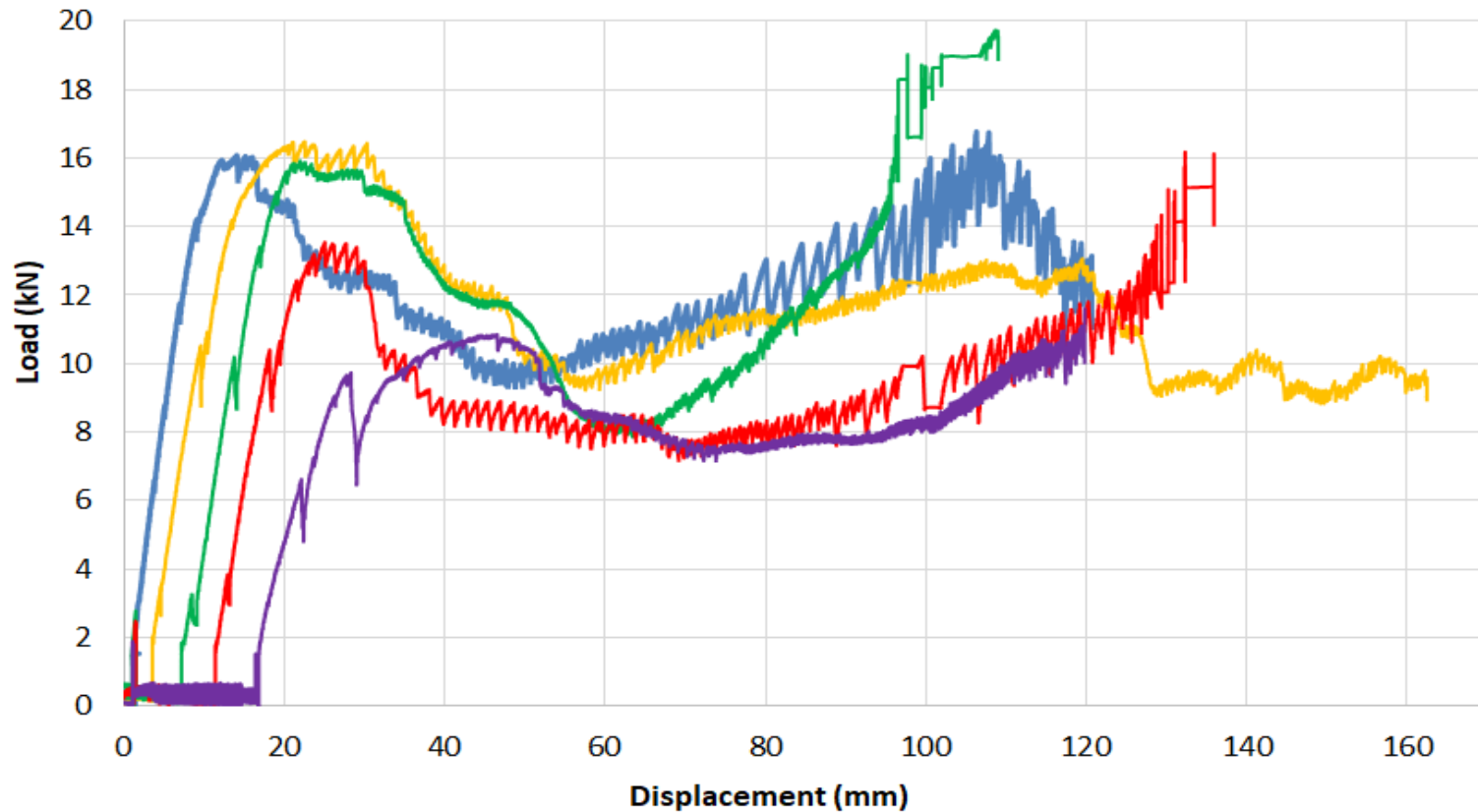
- Teplota



- Panel tloušťky 230 mm při 600°C

Panel s jádrem z minerální vaty

- Závislost deformace na síle



— 20°C — 200°C — 300°C — 450°C — 600°C

- Panel tloušťky 230 mm, délka 2,5 m

Tvary porušení pro minerální vatu

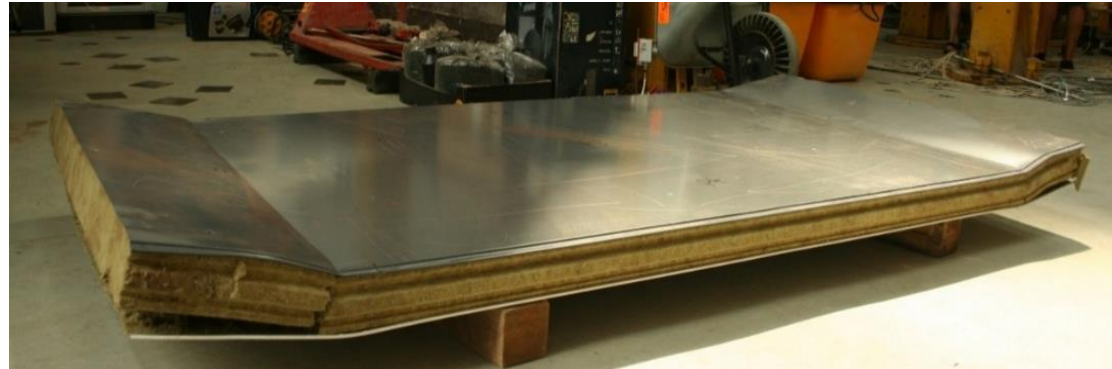


- Panel tl.230 mm, délky 2,5 m, při 20°C



- Panel tl.230 mm, délky 2,5 m, při 600°C

Tvary porušení pro minerální vatu



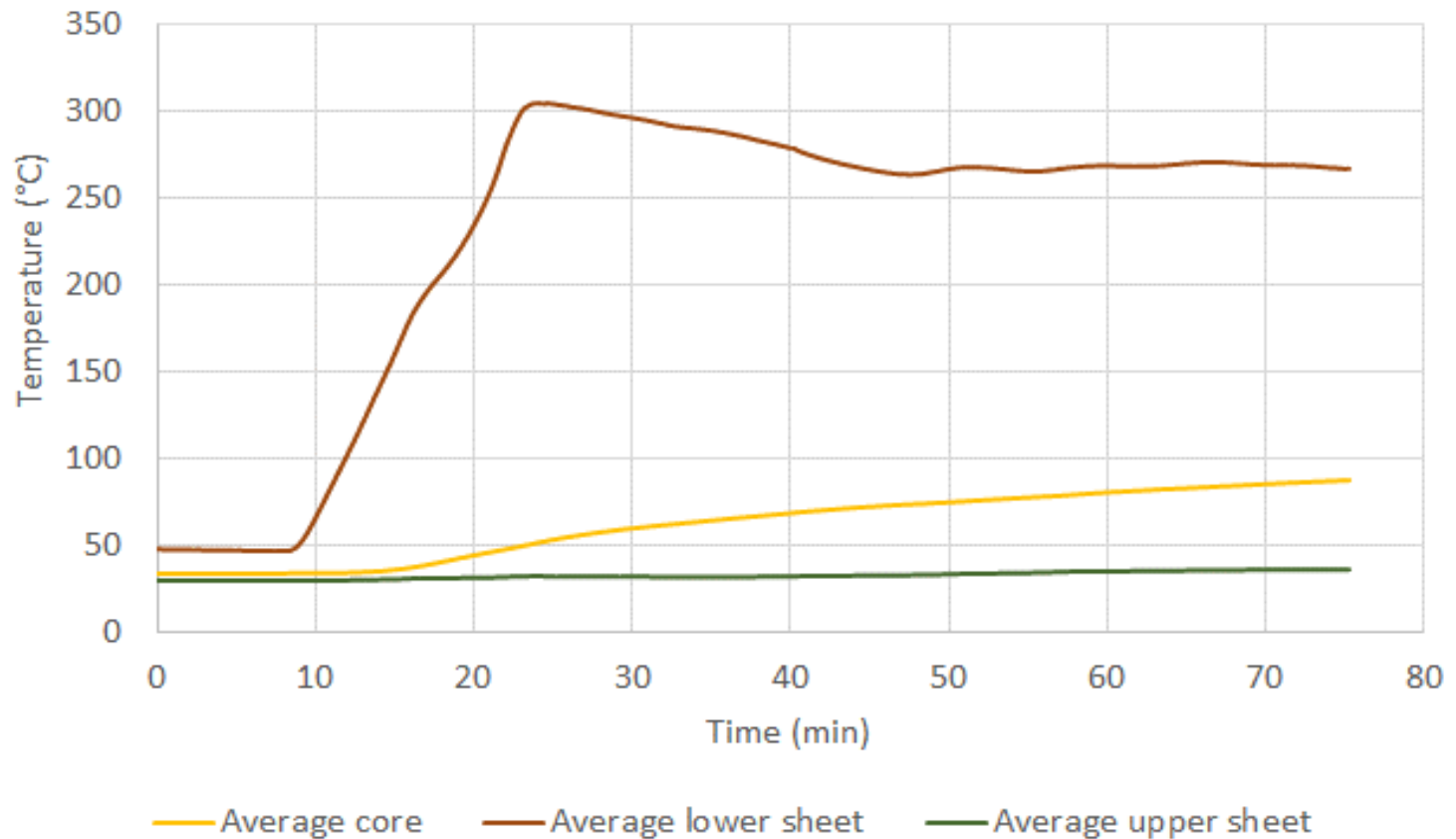
- Panel tl.100 mm, délky 2,5 m, při 20°C



- Panel tl.100 mm, délky 2,5 m, při 600°C

Panel s jádrem z PIR

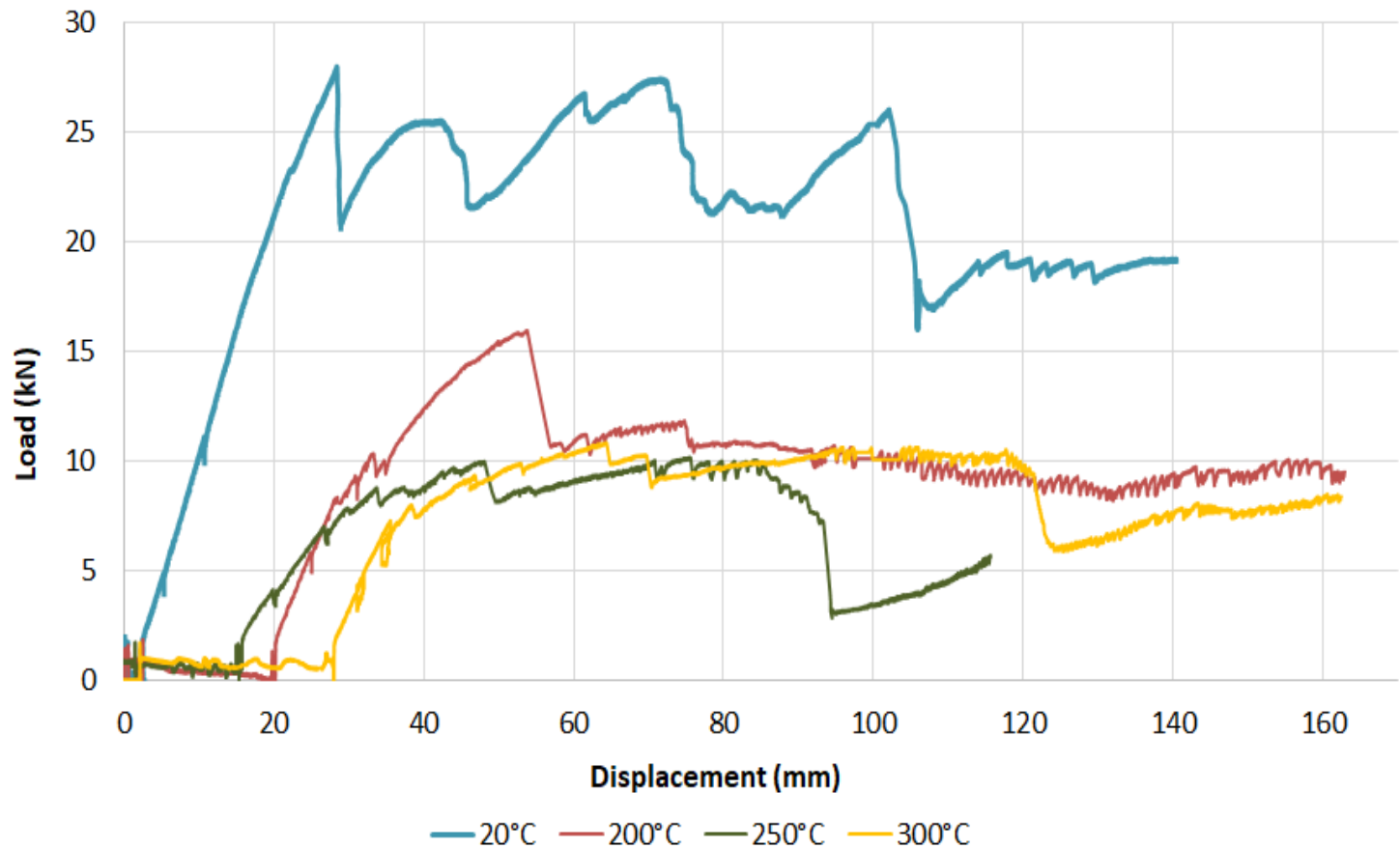
- Teplota



- Panel tloušťky 100 mm při 300°C

Panel s jádrem z PIR

- Závislost deformace na síle



- Panel tloušťky 100 mm, délky 2,5 m

Tvary porušení pro PIR



- Panel tl.100 mm, délky 2,5 m, při 20°C



- Panel tl.100 mm, délky 2,5 m, při 300°C

Výsledky zkoušek

Test configuration			Resistance F_{max} (kN)		Deflection w_{Fmax} (mm)		Bending stiffness k (kN/mm)	
Panel	Panel thickness (mm)	Temperature (°C)	1200x2500 (mm)	1200x4000 (mm)	1200x2500 (mm)	1200x4000 (mm)	1200x2500 (mm)	1200x4000 (mm)
MV	100	20	10,7		11,89		0,90	
		300	6,4		14,65		0,44	
		450	4,5		14,17		0,32	
		600	2,5		10,48		0,24	
	230	20	16,1		12,71		1,27	
		200	16,5		16,97		0,97	
		300	15,9	9,5	13,07	16,40	1,22	0,58
		450	13,5		16,02		0,84	
	600	10,6		24,01		0,44		
Panel	Panel thickness (mm)	Temperature (°C)	1000x2500 (mm)	1000x4000 (mm)	1000x2500 (mm)	1000x4000 (mm)	1000x2500 (mm)	1000x4000 (mm)
PIR	100	20	28,0		25,99		1,08	
		200	15,9		33,62		0,47	
		250	10,0		32,38		0,31	
		300	10,8		35,72		0,30	
	160	20	42,6		25,89		1,65	
		150	26,4		21,63		1,22	
		200	24,2		27,33		0,89	
		300		11,3		73,76		0,15

Numerický model

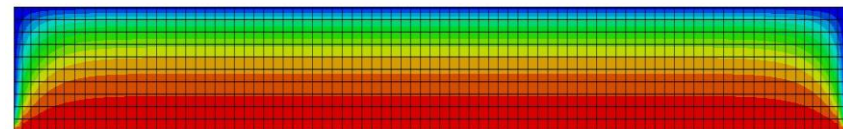
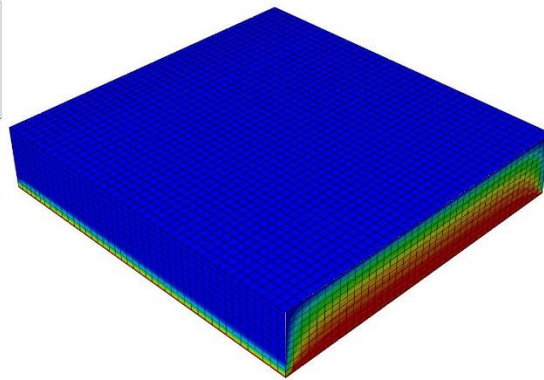
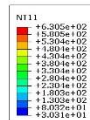
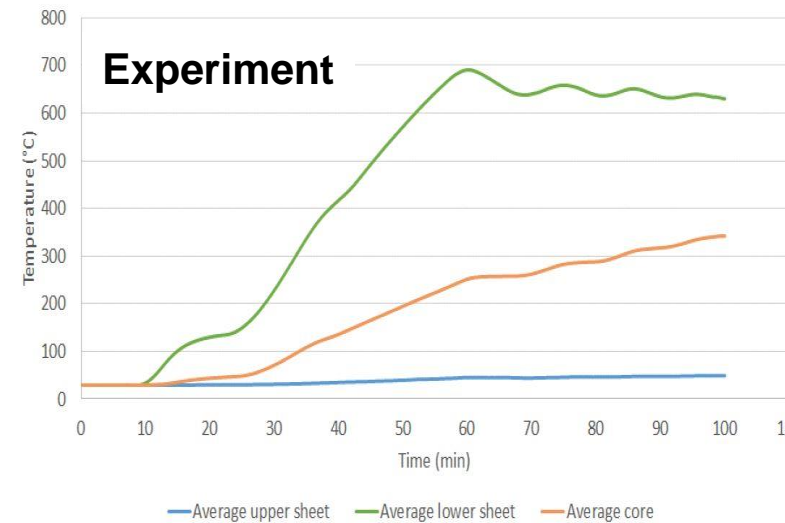
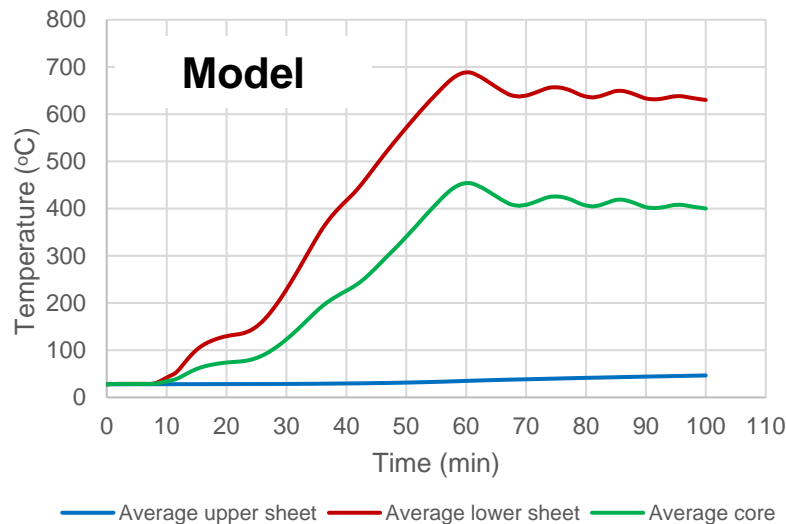
- Abaqus
- Teplotní analýza
- Analýza mechanického chování



Brandenburgische
Technische Universität
Cottbus - Senftenberg

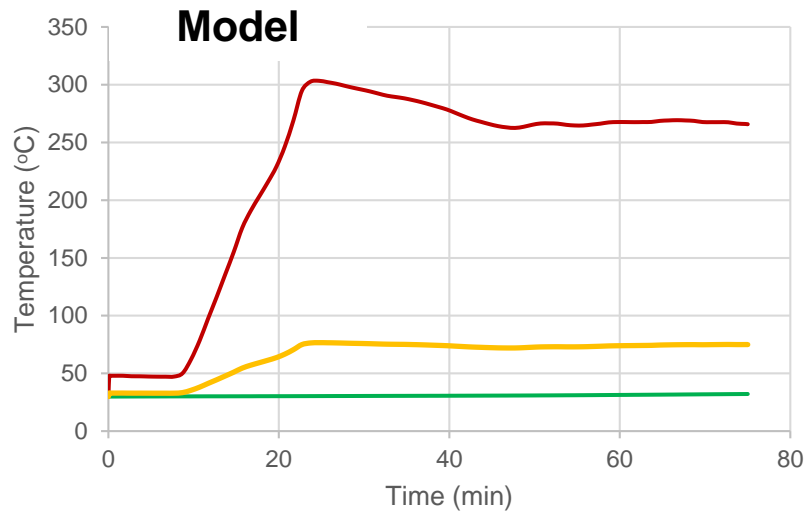
Teplotní analýza

- Panel s minerální vatou tl. 230 mm při 600°C

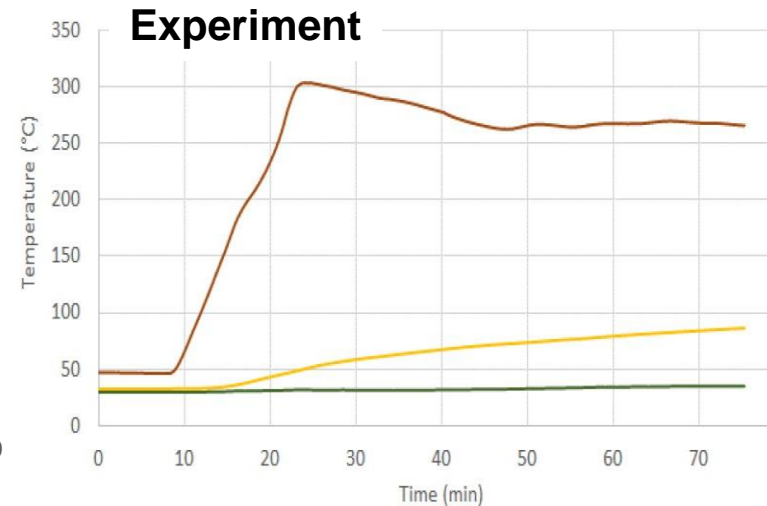


Teplotní analýza

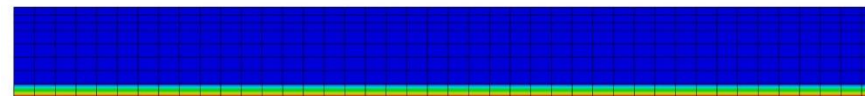
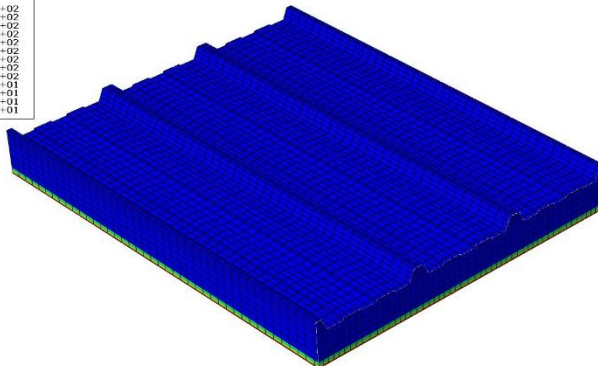
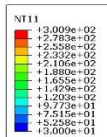
- Panel s PIR tl. 100 mm při 300°C



— Average upper sheet — Average lower sheet — Average core

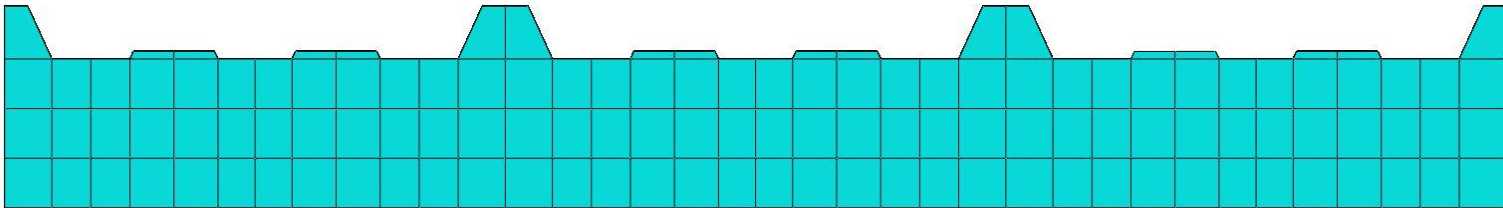
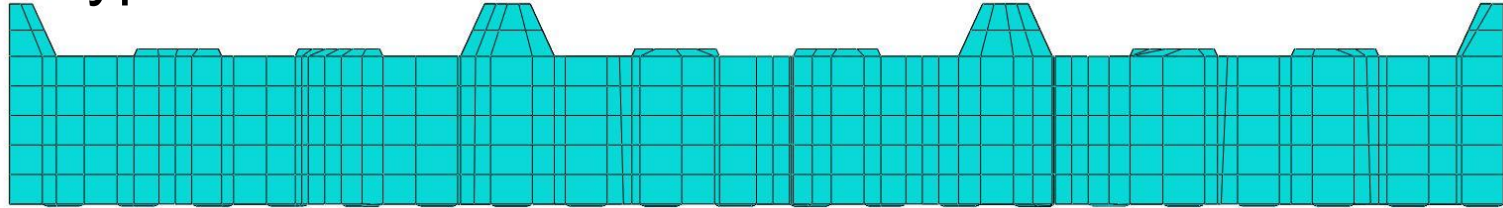


— Average core — Average lower sheet — Average upper sheet



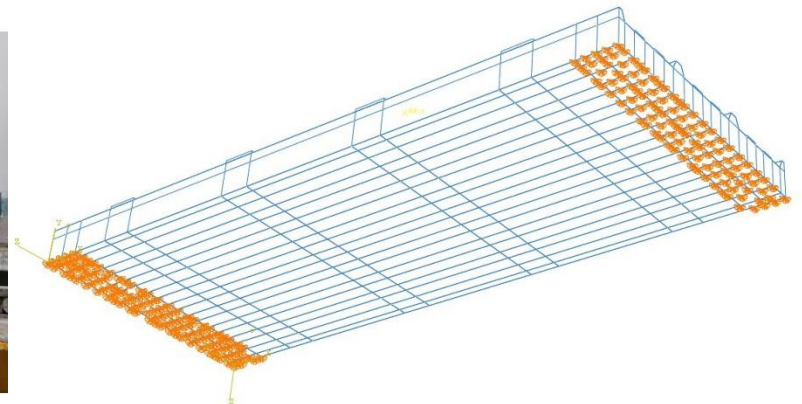
Mechanická analýza

- Výpočetní síť



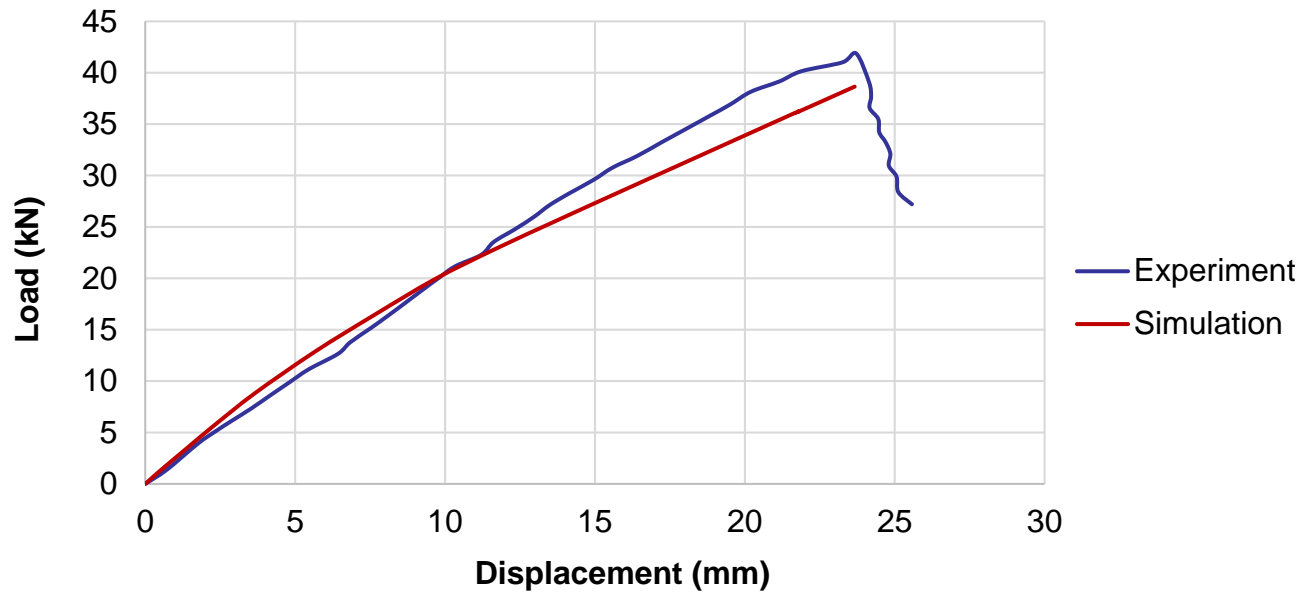
- Zjednodušení – použití rovného spodního plechu

- Uložení



Mechanická analýza

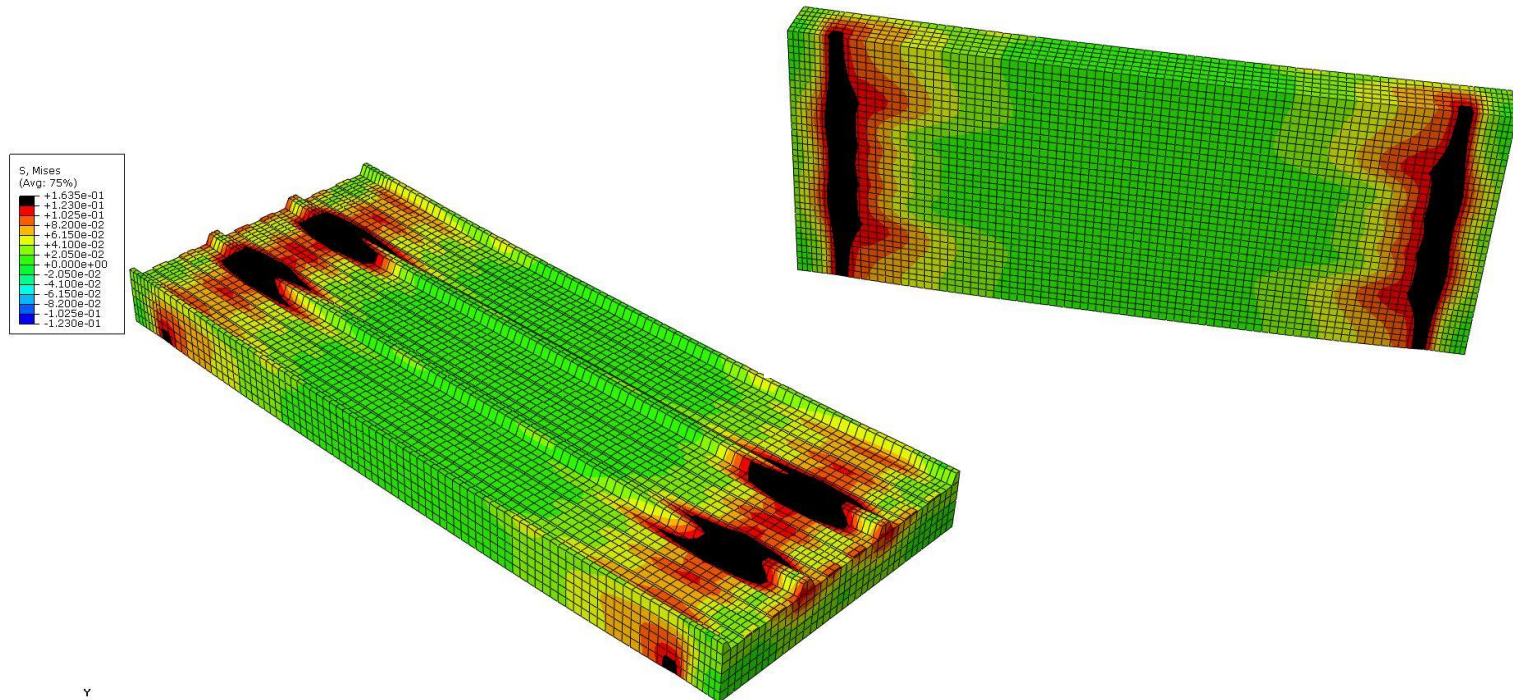
- Panel s PIR tl. 160 mm při 20°C



- Ortotropní materiál

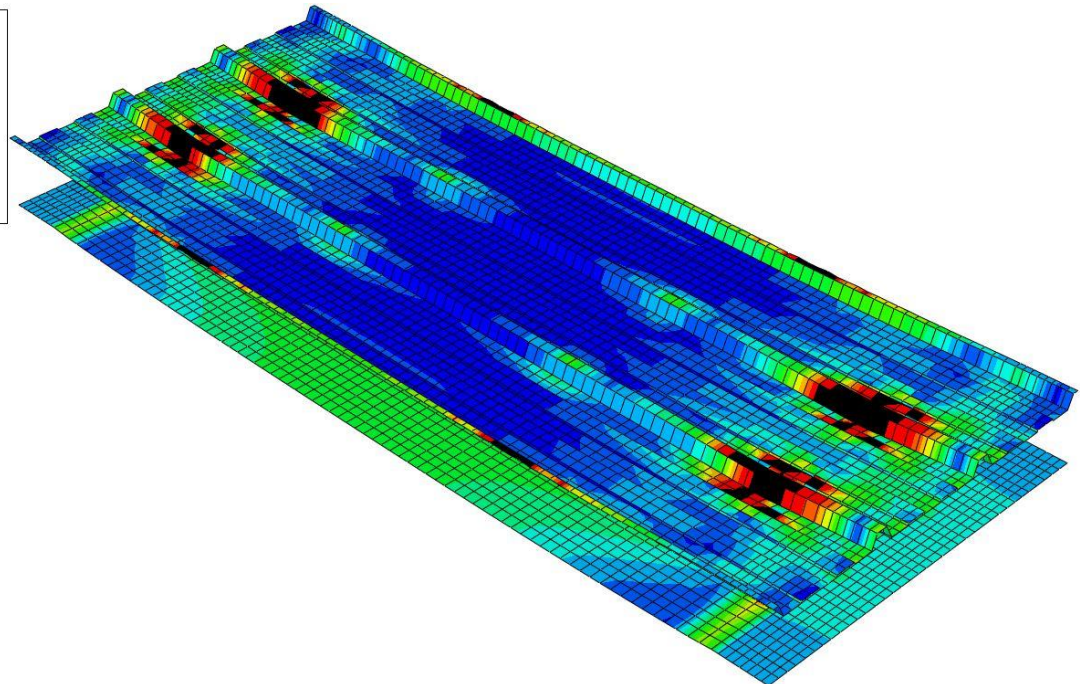
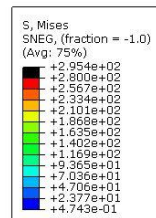
Mechanická analýza

- Panel s PIR tl. 160 mm při 20°C
- Napětí Von Mises pro jádro
- Mez kluzu materiálu jádra: 0,123 MPa



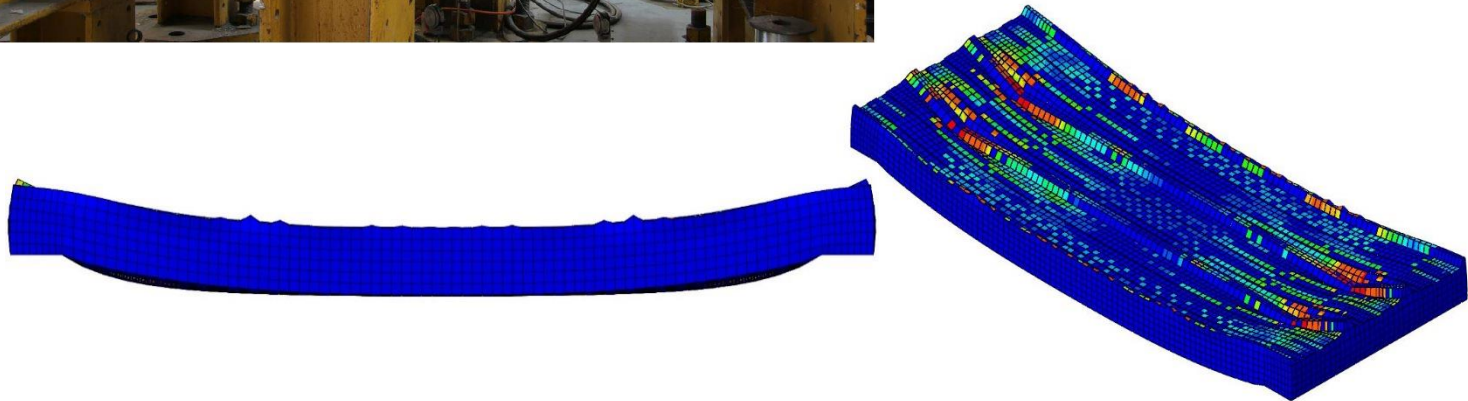
Mechanická analýza

- Panel s PIR tl. 160 mm při 20°C
- Napětí Von Mises pro plášť
- Mez kluzu ocelového plechu: 280 MPa



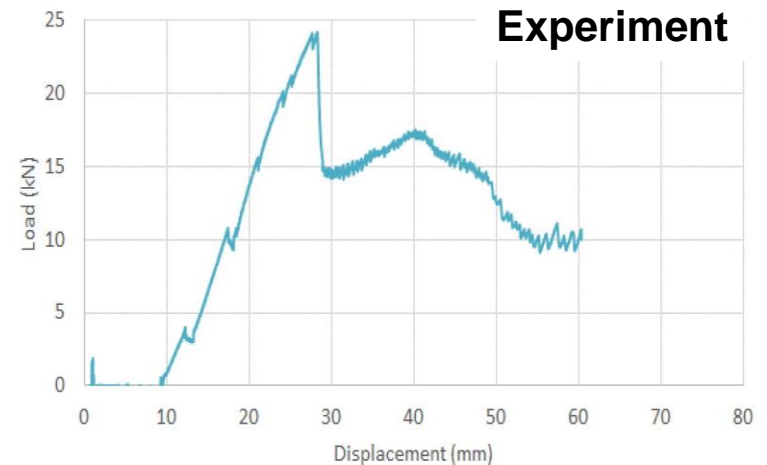
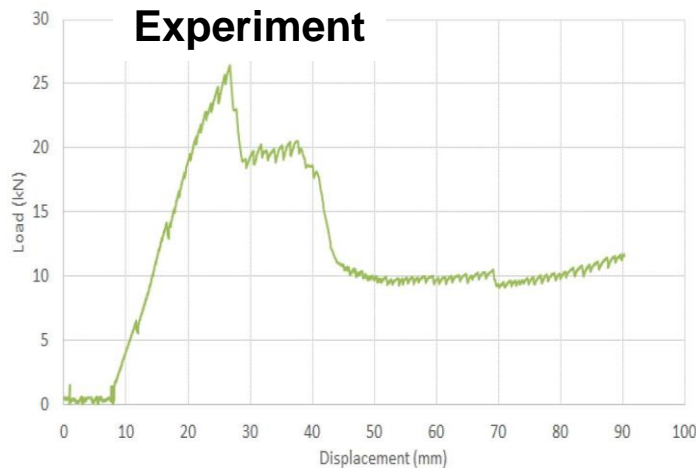
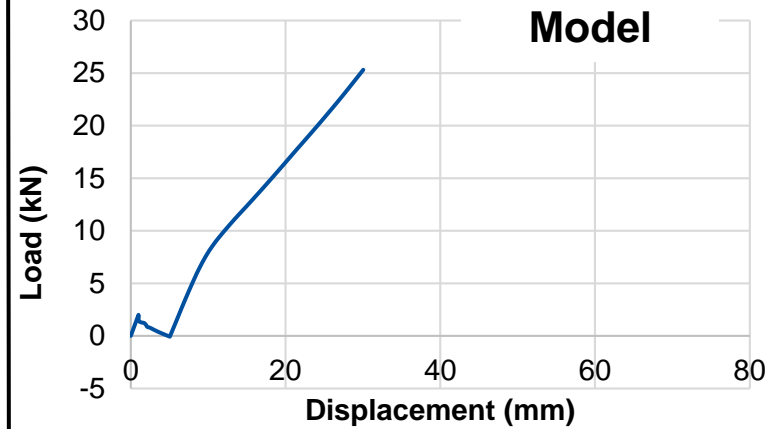
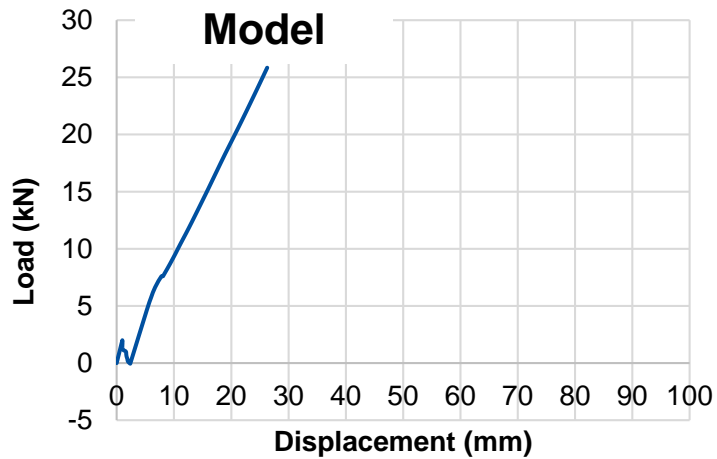
Mechanická analýza

- Panel s PIR tl. 160 mm při 20°C
- Porovnání deformovaného tvaru



Mechanická analýza

- Panel s PIR tl. 160 mm při 150°C a 200°C



Analytický model

- Ohybová tuhost sendvičového panelu s profilovanou a rovnou stranou (PIR jádro)

$$S = \frac{384B_s}{5L^3(1+3.2k)(1-\beta)}$$

kde

$$\beta = \frac{B_{F1}}{B_{F1} + \frac{B_s}{1+3.2k}}$$

$$k = \frac{3B_s}{L^2G_C bD}$$

$$B_s = e^2 \frac{E_{F1}A_{F1} \cdot E_{F2}A_{F2}}{E_{F1}A_{F1} + E_{F2}A_{F2}}$$



Tabulka E.10.2 normy EN 14509:2013

Analytický model

Vysvětlivky:

- Modul pružnosti neohřívaného a ohřívaného plechu

$$E_{F1} = E$$

$$E_{F2} = Ek_{E,\theta} \quad (\text{redukce modulu pružnosti pomocí součinitele dle EN 1993-1-2})$$

- Modul pružnosti jádra

$$G_C$$

- Průřezové plochy vnějšího a vnitřního plechu

$$A_{F1} = b_1 t_{cor,F1} \quad (b_1 \text{ je délka střednice průřezu vnějšího plechu})$$

$$A_{F2} = b t_{cor,F2}$$

$$t_{cor,F1} = t_{F1} - 0.04 \text{ mm} \quad \dots \text{ pro vnější plech}$$

$$t_{cor,F2} = t_{F2} - 0.04 \text{ mm} \quad \dots \text{ pro vnitřní plech}$$

Analytický model

Vysvětlivky:

- Ohybová tuhost vnějšího plechu

$$B_{F1} = E_{F1} I_{F1}$$

kde I_{F1} je moment setrvačnosti vnějšího plechu k vlastní ose

Analytický model

- Ohybová tuhost sendvičového panelu s profilovanými stranami (minerální vata)

$$S = \frac{384B_s}{5L^3(1+3.2k)}$$

kde

$$k = \frac{3B_s}{L^2G_cA_c} = \frac{3B_s}{L^2G_cbD}$$

$$B_s = e^2 \frac{E_{F1}A_{F1} \cdot E_{F2}A_{F2}}{E_{F1}A_{F1} + E_{F2}A_{F2}}$$



Tabulka E.10.2 normy EN 14509:2013

Validace analytického modelu

- Redukce modulu pružnosti pomocí $k_{E,\theta}$ není dostatečná
- Tuhost při zvýšené teplotě je násobkem tuhosti za běžné teploty s redukčním součinitelem pro mez úměrnosti

$$k_{\theta} = k_{20} \cdot k_{p,\theta}$$

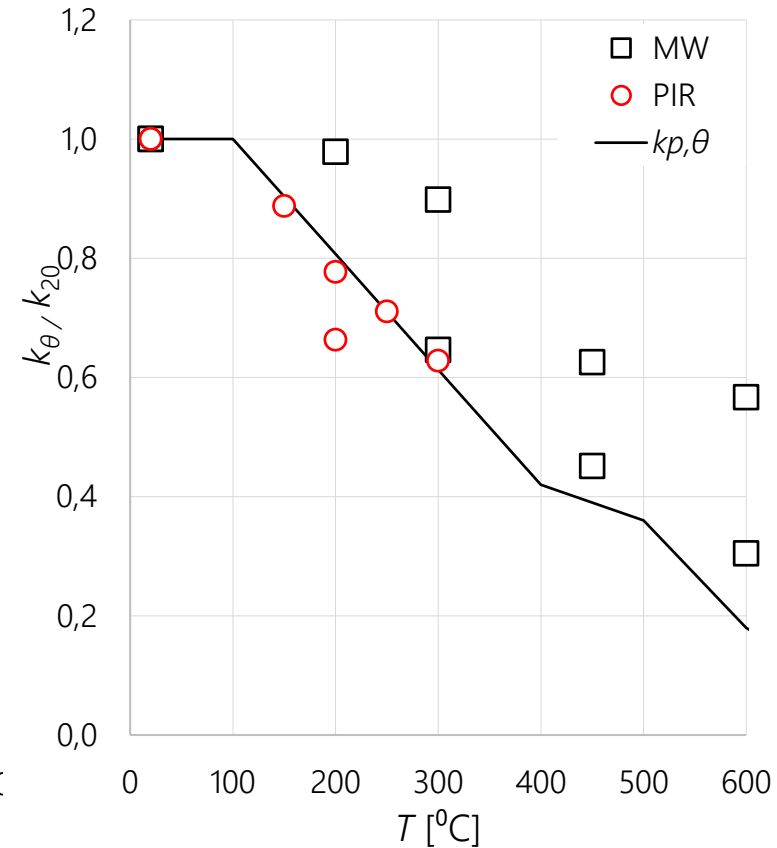
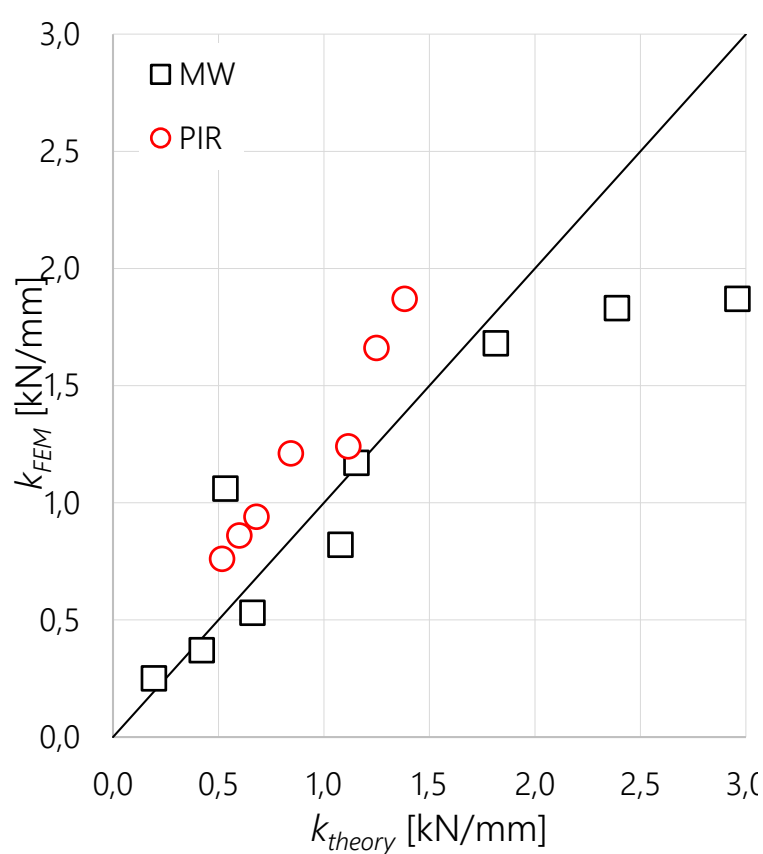
Validace analytického modelu

○ Porovnání tuhosti s MKP modelem

Case	T [°C]	D [mm]	Core	B [mm]	L [mm]	k_{theory} [kN/mm]	k_{FEM} [kN/mm]	k_{theory} / k_{FEM}
MW100-20	20	100	MW	1200	2350	1.08	0.82	1.32
MW100-300	300	100	MW	1200	2350	0.66	0.53	1.25
MW100-450	450	100	MW	1200	2350	0.42	0.37	1.14
MW100-600	600	100	MW	1200	2350	0.19	0.25	0.78
MW230-20	20	230	MW	1200	2350	2.96	1.87	1.58
MW230-200	200	230	MW	1200	2350	2.39	1.83	1.31
MW230-300-1	300	230	MW	1200	2350	1.81	1.68	1.08
MW230-300-2	300	230	MW	1200	3850	0.89	–	–
MW230-450	450	230	MW	1200	2350	1.15	1.17	0.99
MW230-600	600	230	MW	1200	2350	0.53	1.06	0.50
Average								1.10
PIR100-20	20	100	PIR	1000	2350	0.84	1.21	0.70
PIR100-200	200	100	PIR	1000	2350	0.68	0.94	0.72
PIR100-250	250	100	PIR	1000	2350	0.60	0.86	0.70
PIR100-300	300	100	PIR	1000	2350	0.52	0.76	0.68
PIR160-20	20	160	PIR	1000	2350	1.38	1.87	0.74
PIR160-150	150	160	PIR	1000	2350	1.25	1.66	0.75
PIR160-200	200	160	PIR	1000	2350	1.12	1.24	0.90
PIR160-300	300	160	PIR	1000	3850	0.39	–	–
Average								0.74

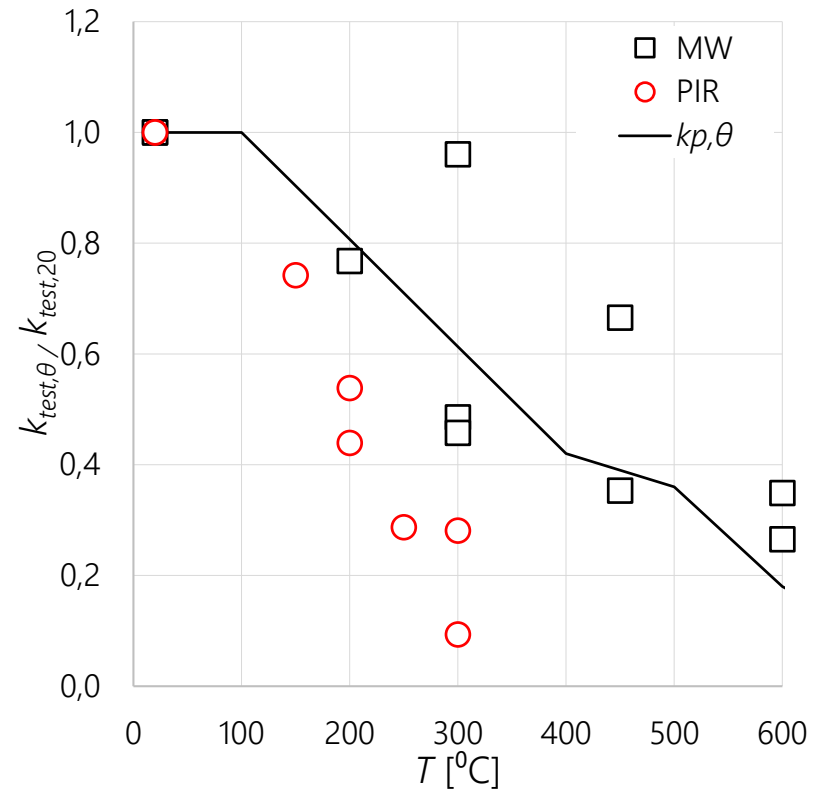
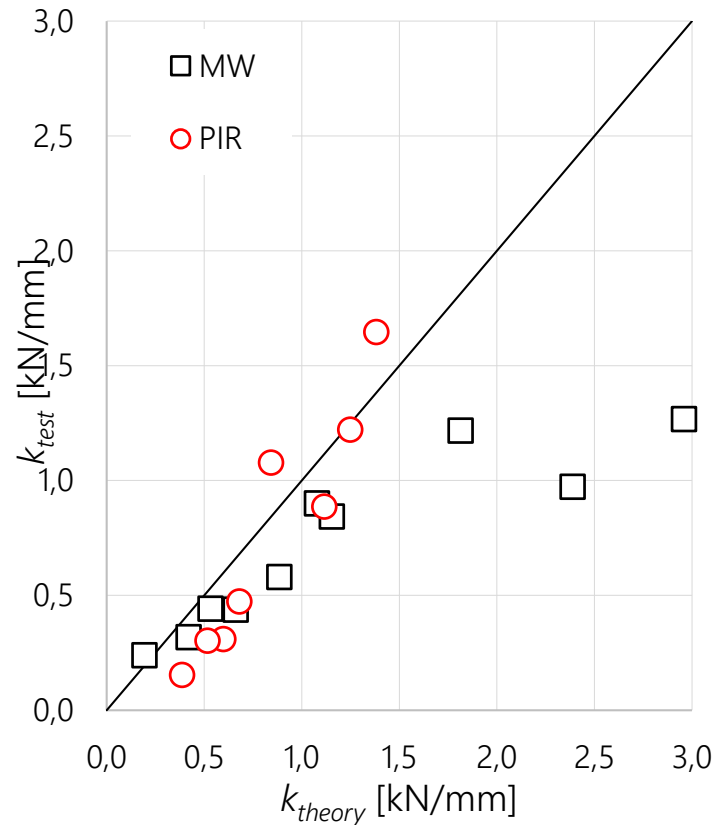
Validace analytického modelu

- Porovnání tuhostí s MKP modelem graficky



Validace analytického modelu

- Porovnání tuhosti s experimenty graficky

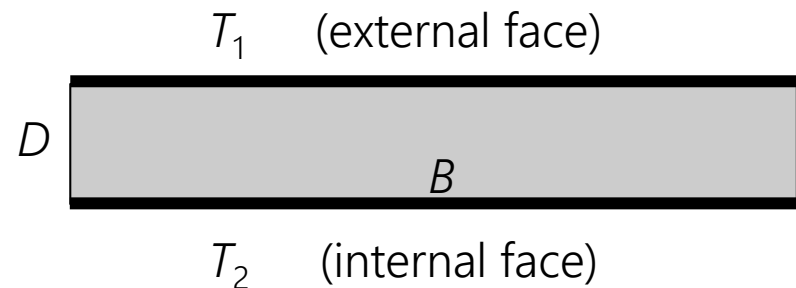


Analytický model

- Deformace od teploty

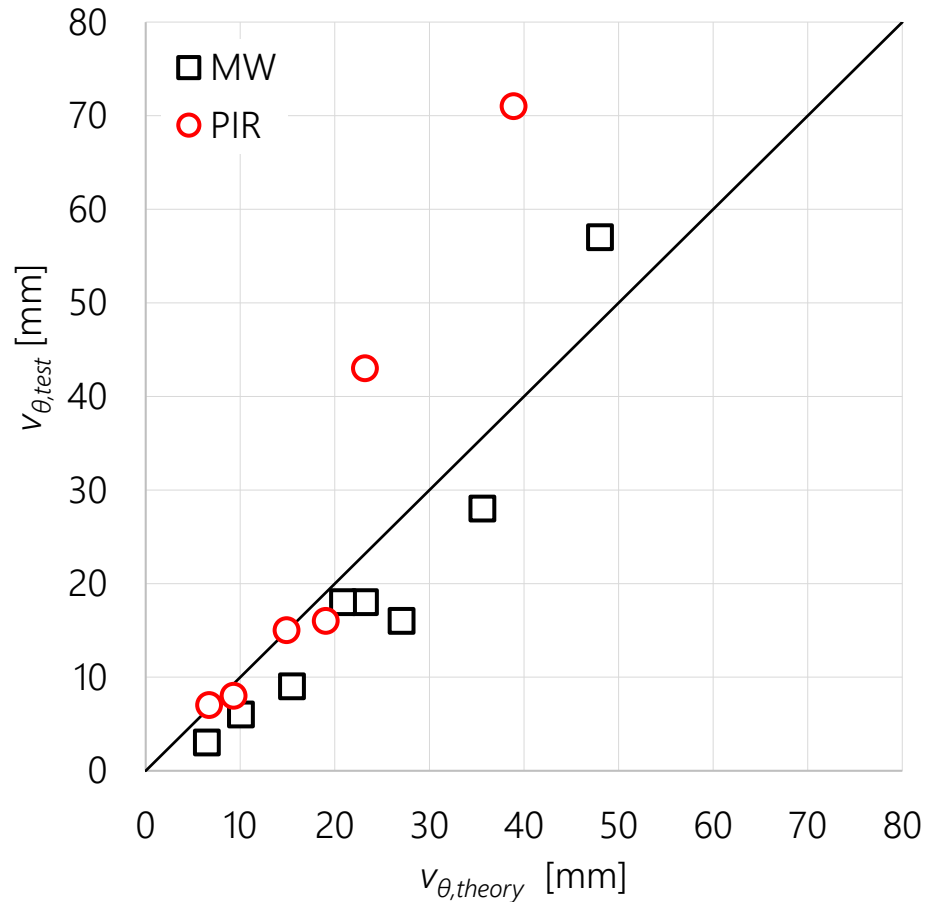
$$v_{\theta} = \frac{\theta L^2}{8}$$

$$\theta = \frac{\alpha_2 T_2 - \alpha_1 T_1}{D} = \frac{\alpha (T_2 - T_1)}{D}$$



Validace analytického modelu

- Deformace od teploty graficky



Shrnutí

- 18 zkoušek sendvičových panelů v ohybu
- MKP modely
- Analytický model pro výpočet ohybové tuhosti

doporučeno

$$k_{\theta} = k_{20} \cdot k_{p,\theta}$$



ČVUT
ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE



STABFI

Děkuji za pozornost

Kamila Cábová

kamila.cabova@fsv.cvut.cz

