

Autor: Ing. Zdeněk Pošvář<sup>1a</sup>  
Školitel: prof. Ing. Milan Růžička, CSc.<sup>2b</sup>

## Cíle disertační práce

### Hlavní cíl:

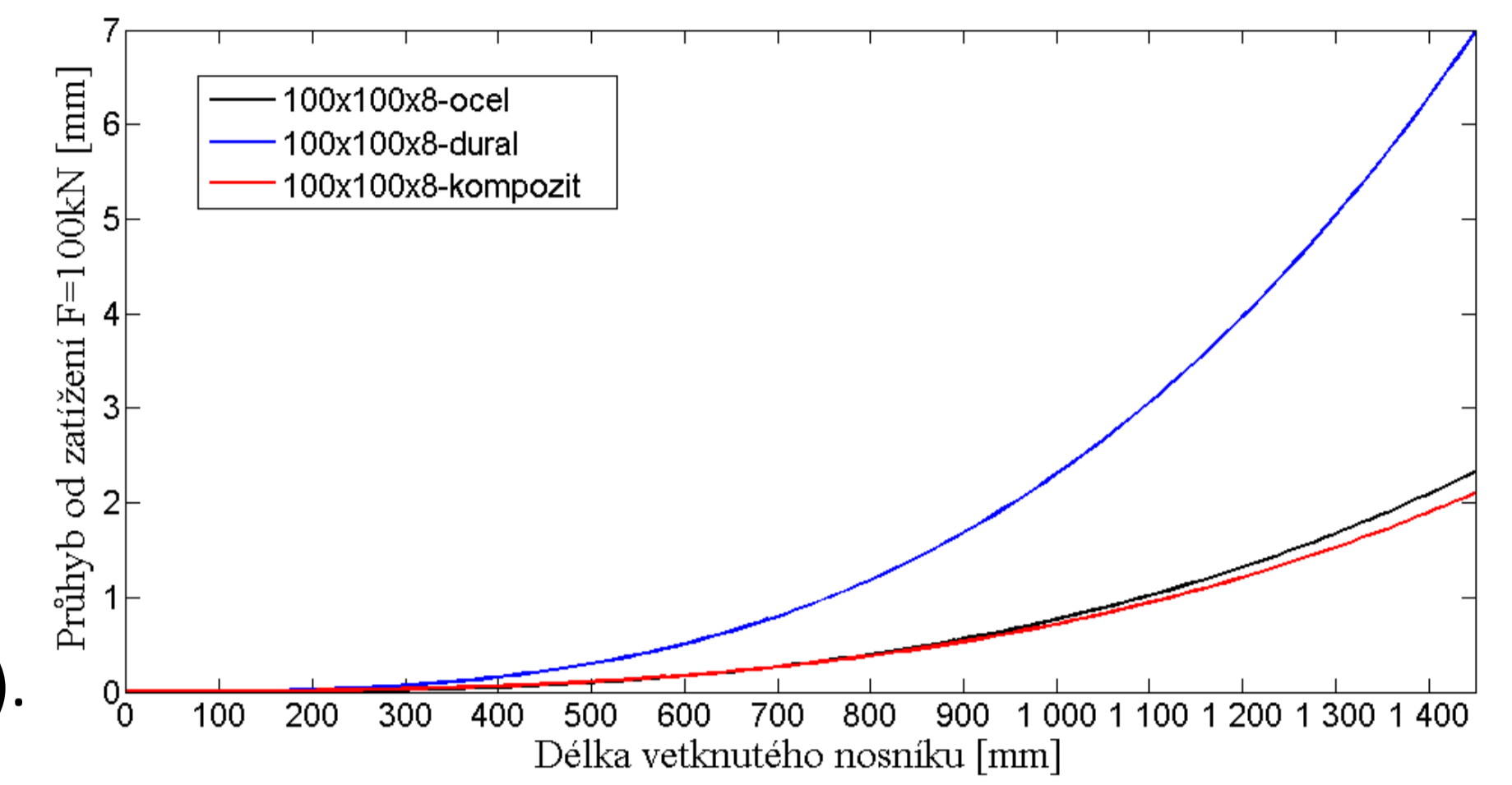
„Komplexní metodika návrhu hybridních kompozitních struktur nosníkových profilů použitelná v technické praxi při zrychleném návrhu profilu dle požadovaných vlastností řešení“.

### Díličí cíle:

- „Navrhnout analytickou explicitní metodu přímého určení korigované smykové tuhosti hybridních kompozitních profilů“.
- „Návrh technické realizace optimalizační smyčky profilu „na míru“ s využitím analytických metod určení ohybové a smykové tuhosti hybridních kompozitních profilů“.
- „Experimentální verifikace analytické explicitní metody přímého určení korigované smykové tuhosti hybridních kompozitních profilů“.

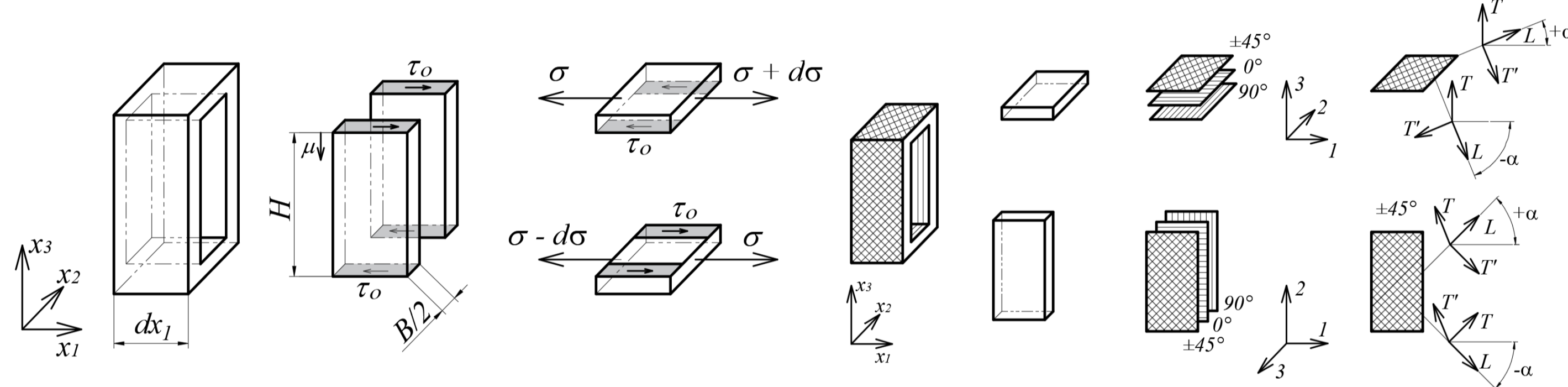
## Izotropní vs. kompozitní materiál

- Oblast využití výpočtových modelů bez vlivu smyku je u kompozitních materiálů podstatně menší oproti izotropním materiálům.
- Pro profil 100x100mm lze vliv smyku zanedbat (rozdíl Timošenko vs. Bernoulli <5%) až od délky 1,2m pro vetknutý nosník (vs. 0,4m pro izotropní).
- Pro izotropní materiál lze vliv smyku zanedbat již od 5-ti násobku vnějšího rozměru, kdežto pro kompozitní to lze až od 10-ti násobku.
- Měrné hmotnosti profilů: ocel 23kg/m, dural 8,2kg/m a kompozit 5kg/m.
- Ze srovnání tuhostí a měrných hmotností jsou výhody kompozitního řešení zřejmé (tuhé jako ocel, lehčí než dural).



## Přímý výpočet korigované smykové tuhosti kompozitního profilu

- Vazba geometrických a materiálových parametrů profilu značně komplikuje exaktní vyjádření opravného koeficientu smykové tuhosti => hlavní motivace k hledání přímého výpočtu korigované smykové tuhosti  $T_{A\ direct}$



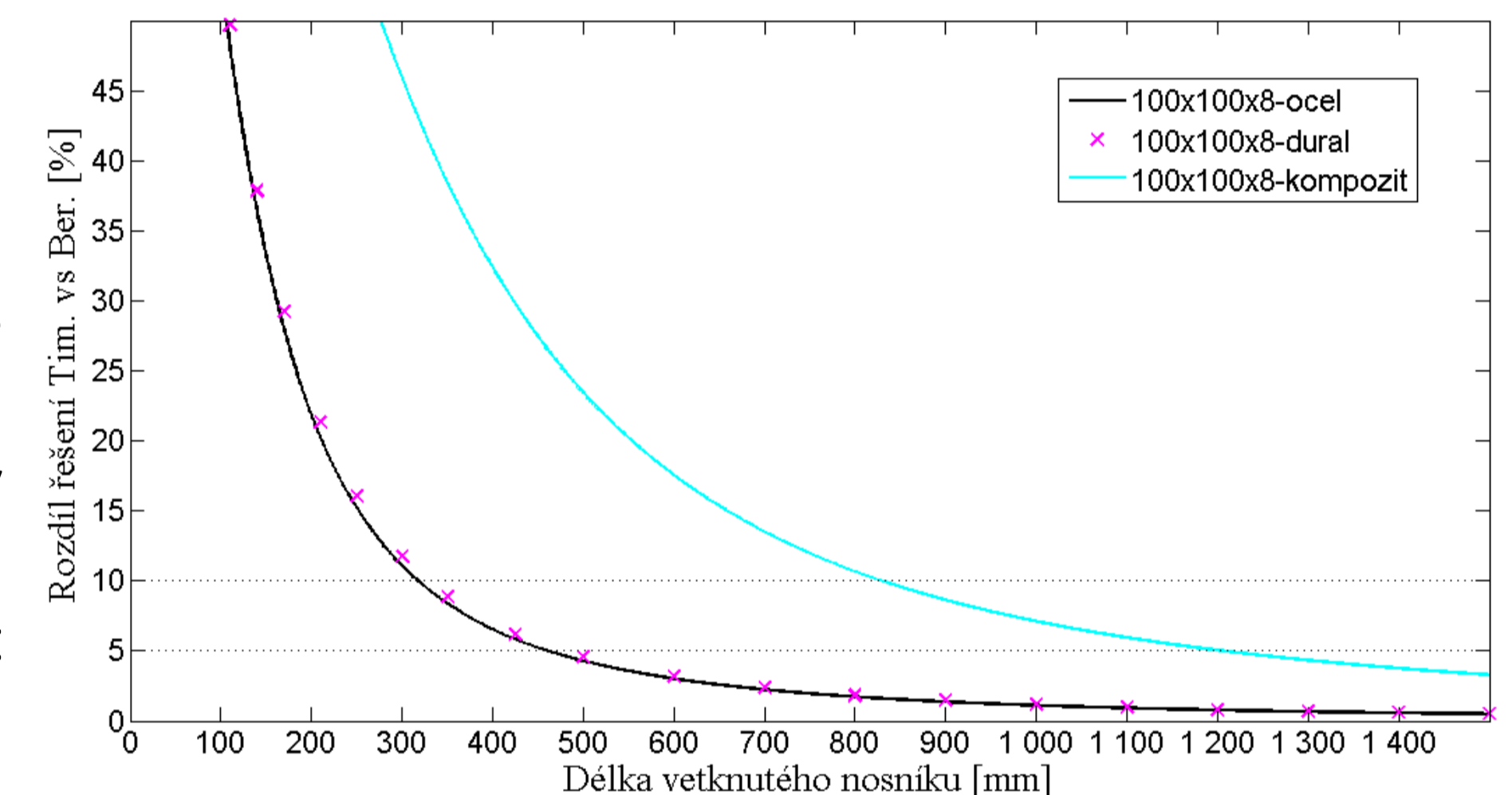
- Energetický přístup je založen na ekvivalenci práce (deformační energie) kumulované v objemu  $V$  od posouvající síly  $Q$  realizované na smykové deformaci vůči deformační energii od smykového napětí realizované na smykovém přetvoření.

$$\tau(\mu) = \frac{Q_3}{T_{D\ suma}} \cdot E_i \cdot \frac{H - \mu}{2} \cdot \mu + \tau_0 \quad \frac{1}{2} \int_{(L)} \frac{Q^2}{T_{A\ direct}} dx = \frac{1}{2} \int_{(V)} \frac{\tau^2}{G} dV$$

- Smykový modul pružnosti v pásnici je 8-krát menší než ve stojně ( $G_{12}=24\text{GPa}$ ,  $G_{13}=3\text{GPa}$ ) + předpoklad zanedbatelných smykových napětí v pásnici => vliv smykové deformační energie v pásnici je zanedbatelný.

$$F_{osová} = \int_{(A_I)} \sigma_i dA = \sum_i \sigma_{mi} \cdot A_i = \sum_i \frac{M_o}{T_{D\ suma}} \cdot E_i \cdot A_i \cdot x_{m3}$$

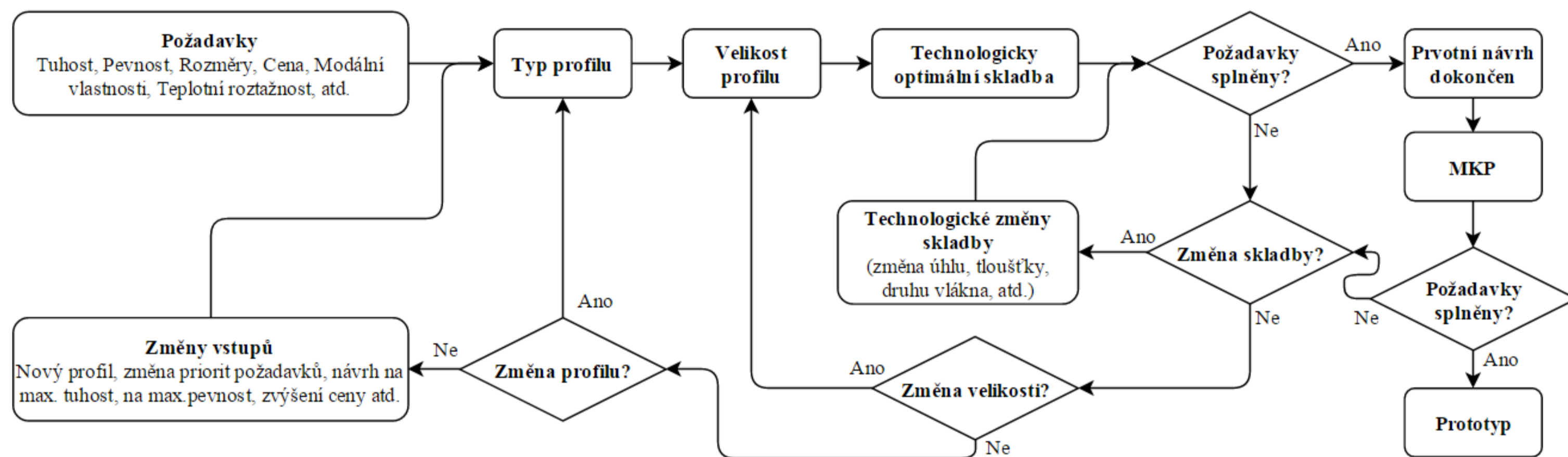
- Nenulová okrajová podmínka  $\tau_0$  se určí pomocí Integrace normálového napětí  $\sigma$  přes celou oblast pásnice, čímž získáme výslednou vnitřní normálovou sílu  $F_{osová}$  přenášenou pásnicí.



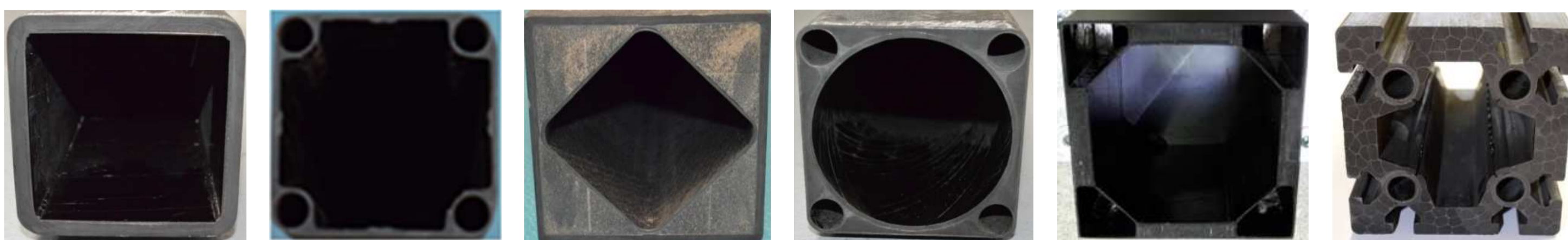
- Materiálové a geometrické parametry jsou vzájemně propojeny a přímo zahrnuty do řešení již ve fázi odvození.
- Ekvivalentní ohybová tuhost  $T_{D\ suma}$  je identická pro profil i pro náhradní model.

## Návrh a výběr vhodného kompozitního profilu

- Rychlý výběr profilu a jeho optimalizace na bázi MKP řešiče je časově i finančně náročná, proto praxe vyžaduje analytické modely vlastností kompozitních profilů.
- V prvním kroku pomocí vícekritériální analýzy variant algoritmus vybere vhodný profil dle priorit „Požadavků“ z databáze fundamentálních profilů (výběrová část) a následně iterační smyčka určí optimální velikost a skladbu profilu (výpočtová část).

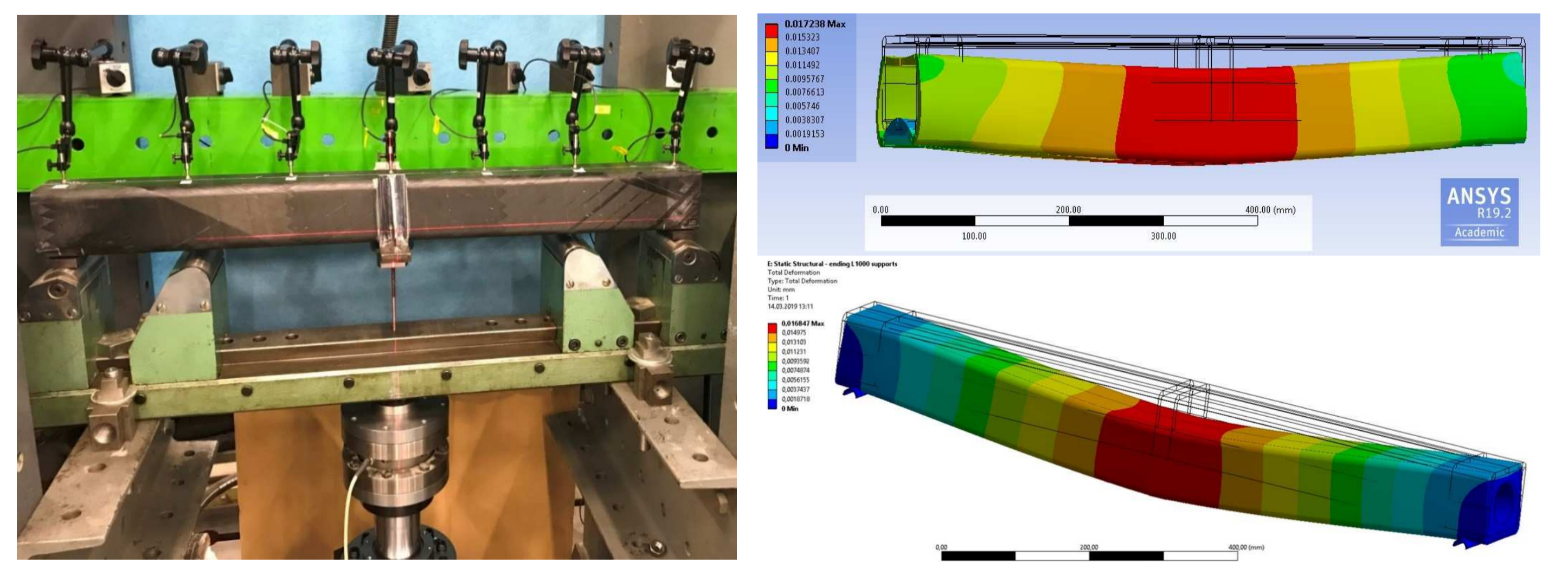


- Databáze fundamentálních profilů obsahuje vstupní data analytických modelů pro základní typy nosníků (geometrii, skladbu) a tím výrazně zrychluje první iterace.
- Zkušební tělesa byla vyrobena firmou Compo Tech Plus s.r.o. metodou navíjení.



## MKP a experimentální ověření predikovaných výsledků

- Vlivem nízké příčné tuhosti laminátu a zanedbatelného vlivu lokálních deformací během experimentu bylo potřeba experiment dvakrát modifikovat (re-distribuce zatížení v oblasti zavedení síly a výtuhami v oblasti podpor)



- Nová metoda výpočtu korigované smykové tuhosti (náhradní model B) predikuje celkovou deformaci s odchylkou 12% oproti experimentu.

Metoda	Průhyb [mm]	Poddajnost [mm/kN]	Δ [%]
Modifikovaný experiment s inserty v oblasti podpor	0,33	2,20e-02	0
MKP s inserty nad podporami	0,25	1,67e-02	-24
Bernoulli	0,22	1,47e-02	-33
Přímý výpočet - náhradní model B	0,29	1,93e-02	-12

## Závěr

- Cíle disertační práce byly splněny.
- Vliv smyku na celkovou deformaci u hybridních kompozitních nosníků je prokazatelně zanedbatelný a je potřeba mu věnovat zvýšenou pozornost.
- Nová metoda výpočtu korigované smykové tuhosti byla odvozena a pro dutý čtvercový profil experimentálně ověřena s velice dobrou shodou 12%.
- Aplikace analytických metod na je naprogramovaná v jazyce Matlab a je součástí elektronické přílohy disertační práce.
- Nová metoda je snadno implementovatelná do analytických výpočtových či optimalizačních nástrojů.
- Na tuto práci je možno navázat v teoretickém i praktickém směru, zejména rozšířením na širší portfolio profilů a následné kvalitativní ověření predikce nové metodiky s experimentem.

Poděkování: Autor by chtěl touto cestou poděkovat Technologické agentuře České republiky za podporu toho výzkumu v rámci grantu TA2-0543 V-12-060.

<sup>1</sup> Compo Tech Plus s.r.o. Sušice, Nová 1316

<sup>2</sup> Fakulta strojní, ČVUT v Praze. Praha 6, Technická 3

<sup>a</sup> Zdenek.Posvar@compotech.com, <sup>b</sup> Milan.Ruzicka@fs.cvut.cz