

MULTISTABILNÍ METAMATERIÁLY PROMĚŇUJÍCÍ TVAR

Pojednání k SDZ

Autor: **Ing. Vítězslav Sobol**

Školitel: doc. Ing. Daniel Koutný, Ph.D.

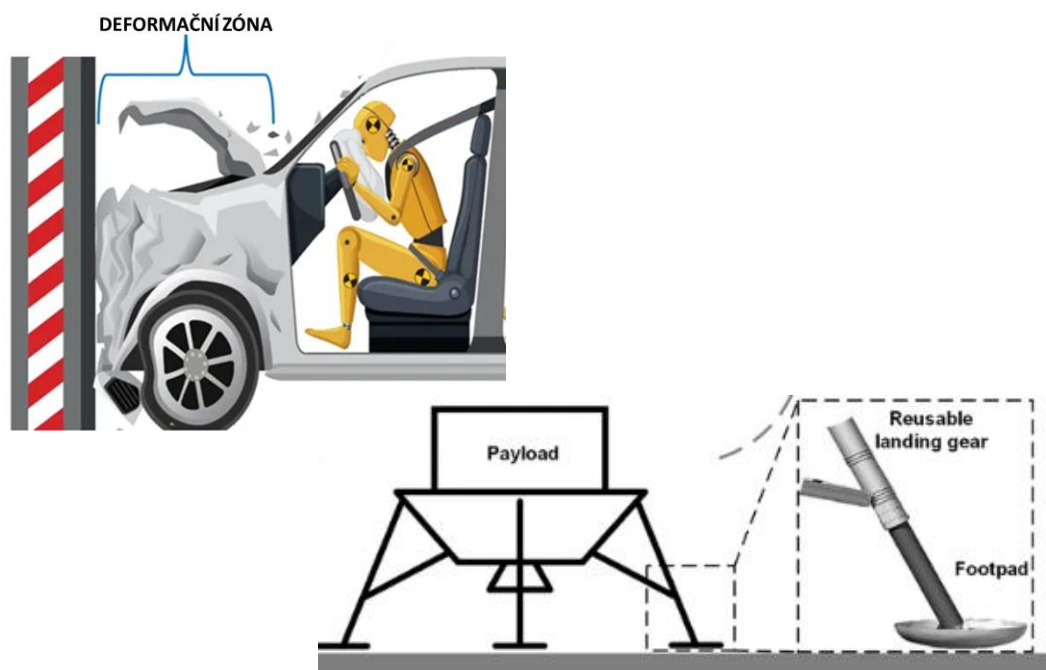
VUT v Brně, FSI
2026



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU

- **Absorbéry nárazu** chrání objekty přeměnou kinetické energie na deformační



Aplikace absorbérů nárazu
(Bliven et al., 2019; Dou et al., 2023)

KONVENČNÍ ABSORBÉRY

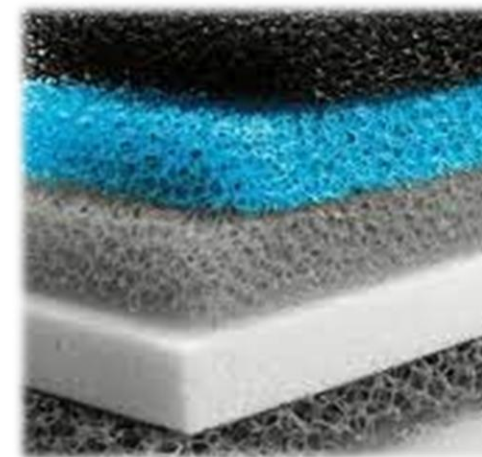
např. **Kovové pěny**

- **Jednorázové** použití
- **Vysoká** absorpce



např. **Polymerní pěny**

- **Opakované** použití
- **Nízká** absorpce



Kovové a polymerové pěny
(duocell.com, foamarket.com)

MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ PROBLÉMU

Kovové pěny

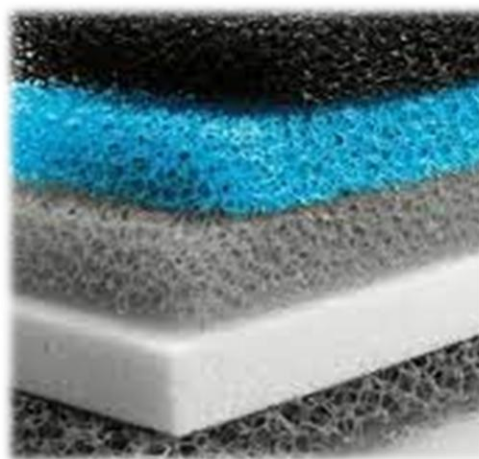
- Jednorázové použití
- Vysoká absorpce



(duocell.com)

Polymerní pěny

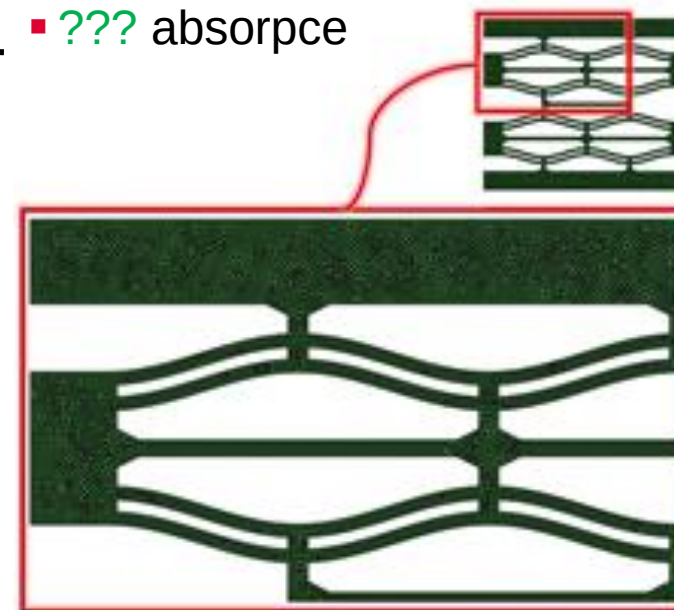
- Opakované použití
- Nízká absorpce



(foamarket.com)

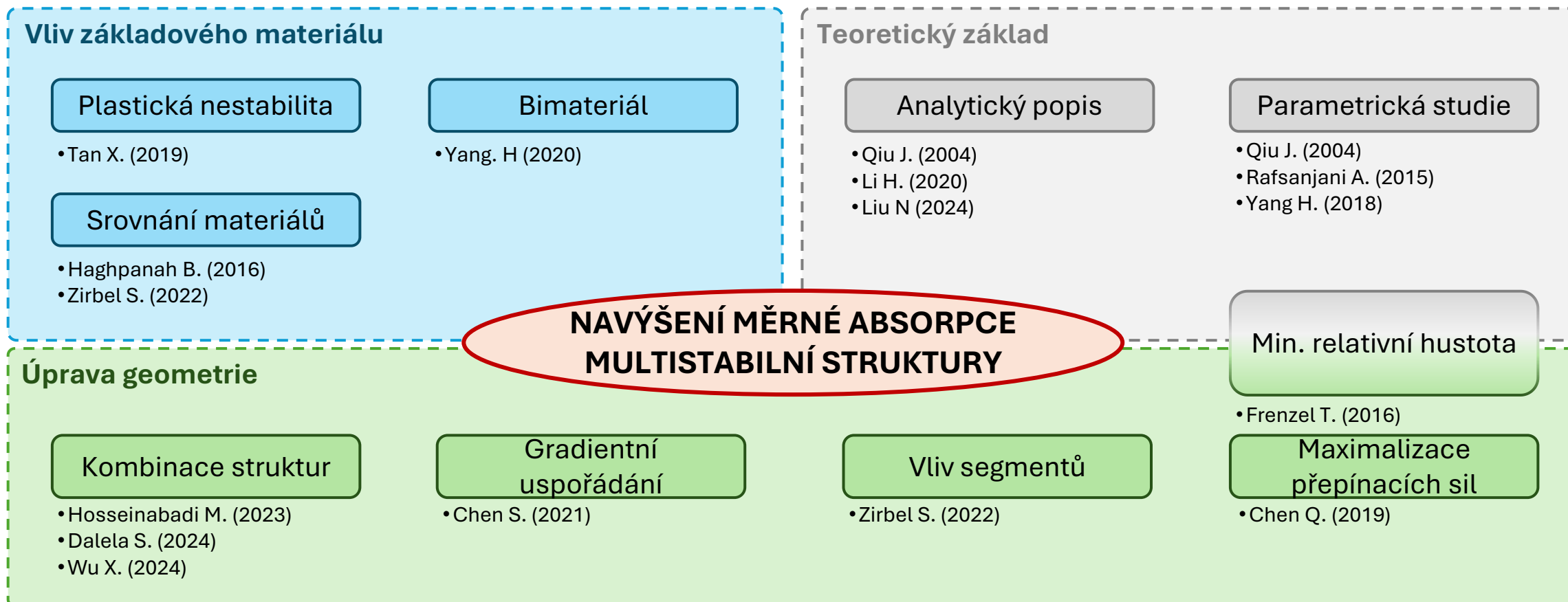
Multistabilní metamateriál

- Opakované použití
- ??? absorpce



(Mehreganian et al., 2021)

PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

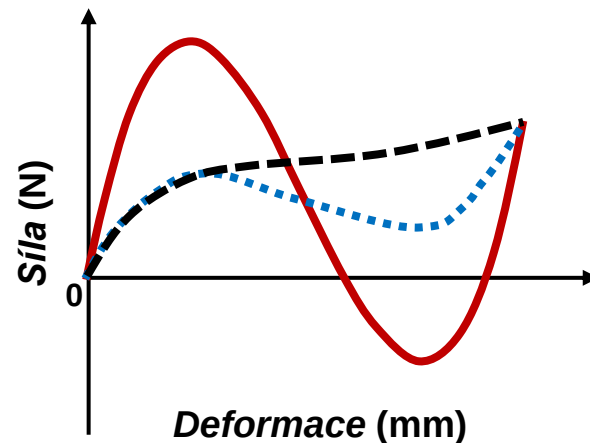
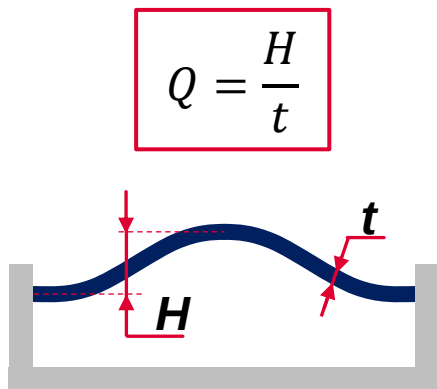


PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Podmínka bistability

(Qiu et al., 2024; Correa et al., 2015)

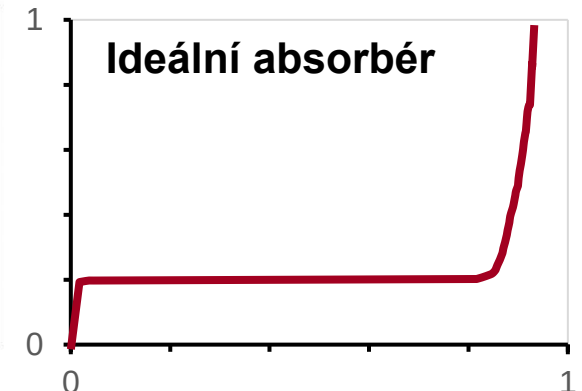
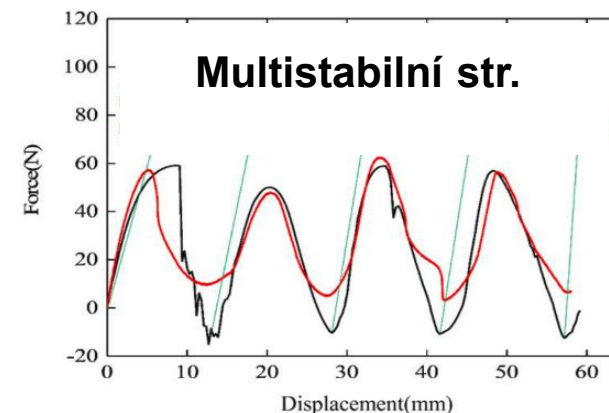
- $Q > 2,31$ → Bistabilní
- $1,23 < Q \leq 2,31$ → Monostabilní s přepnutím
- $Q \leq 1,23$ → Monostabilní



Průběh deformace

(Chen et al., 2021; Li et al., 2006)

- Výkyvy reakční síly multistabilních struktur
- *Plateau charakteristika* ideálního absorbéru



PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Kovové vs. polymerní materiály

(Zirbel et al., 2022; Restrepo et al., 2015; Tan et al., 2019)

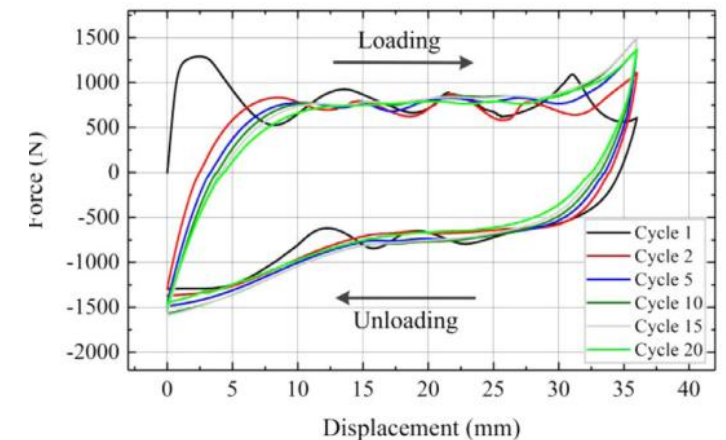
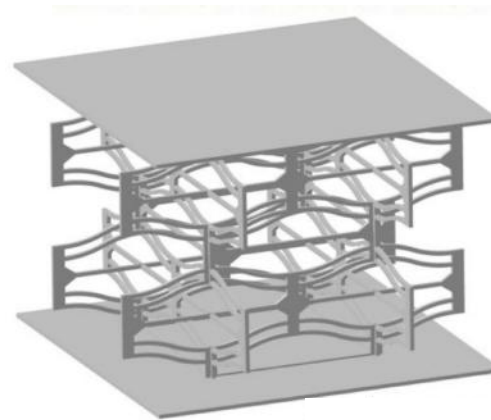
- Elastická deformace → nízká tuhost E (GPa) a vysoká mez kluzu R_e (MPa)
- Vyšší poměr R_e/E → nižší hmotnost, větší deformace → vyšší *měrná absorpce* (J/kg)

Materiál	E (GPa)	R_e (MPa)	$10^3 \cdot R_e/E$
Ti6Al4V	110	830	7,6
SS304L	233	254	1,1
Nylon	1,1	32	29,1
TPU	0,022	1,6	72,7

Plastická deformace

(Tan et al., 2019)

- Disipace energie v plastické oblasti
- Opakovatelnost díky houževnatosti materiálu SS304 (až 20 cyklů)

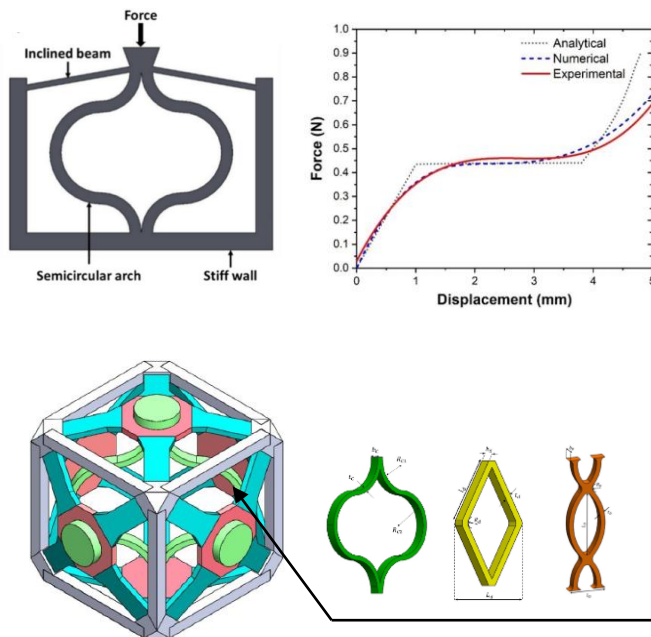


PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Kombinace struktur

(Dalela et al., 2024; Hosseinabadi et al., 2023)

- Navýšení *měrné energie* (J/kg) až o 50 %
- Oblast s konstantní reakční silou

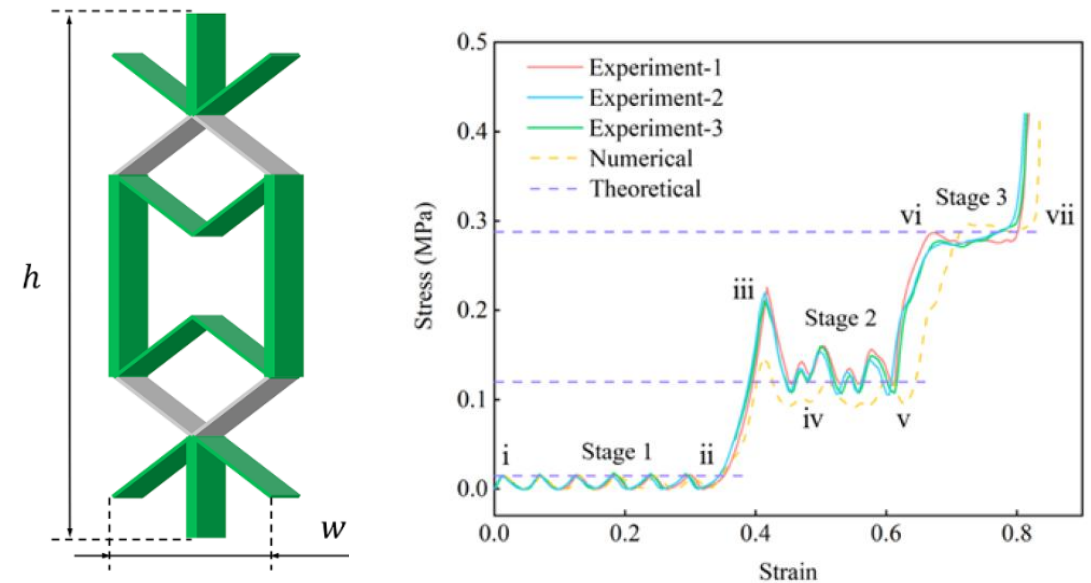


Multistabilní metamateriály proměňující tvar

Hybridní struktura

(Wu et al., 2024)

- Elastická deformace (multistabilní struktura)
- Plastická deformace (auxetická struktura)



7/16

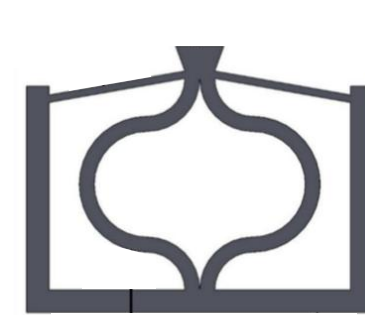
CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Hlavní cíl

- **Navýšení absorpčního výkonu** bistabilní/multistabilní struktury pomocí modifikace geometrie **při zachování bistability.**

Dílčí cíle

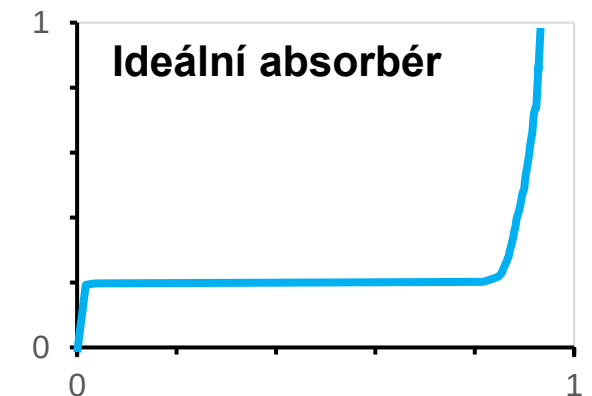
- Výběr vhodného materiálu
- Nalezení přídatné geometrie pro dosažení *plateau charakteristiky* při zachování bistability
- Stanovení podmínek pro řízení překryvu silové odezvy jednotlivých vrstev multistabilní struktury
- Vliv výztuh na absorpční výkon auxetické buňky
- Návrh hybridní multistabilní struktury pro absorpci energie



(Dalela et al., 2024)



(Wu et al., 2024)



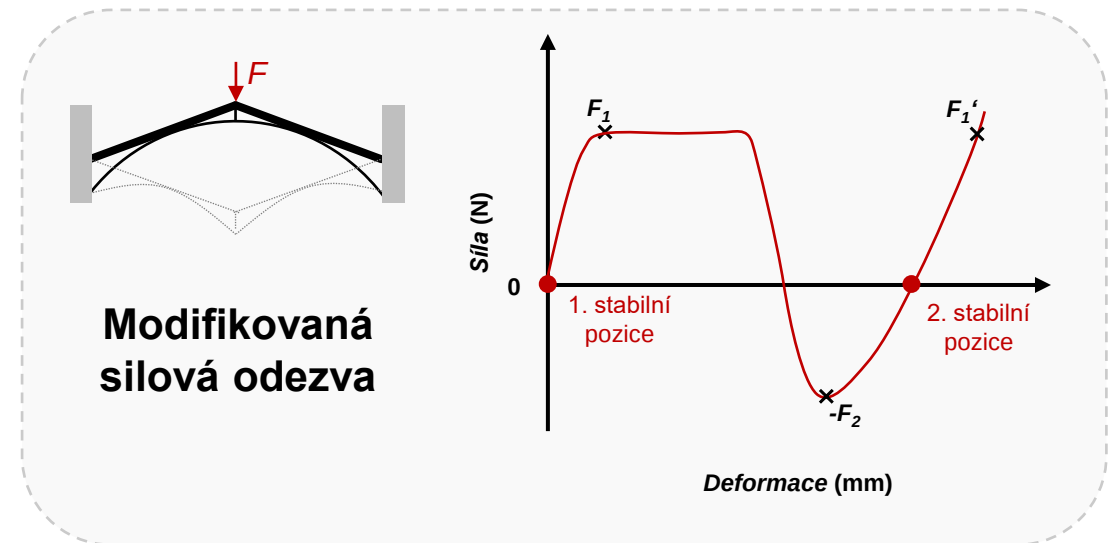
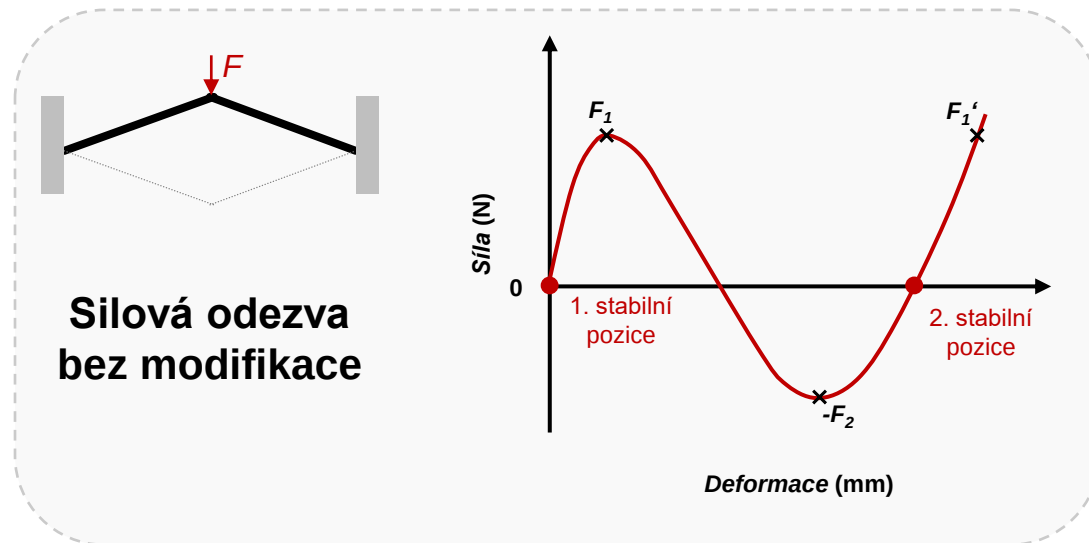
(Li et al., 2006)

VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

VO1: „Jakým způsobem je možné pozměnit průběh reakční síly bistabilní struktury tak, aby obsahoval oblast konstantní síly a zároveň si zachovala bistabilní chování?“

H1a: „Použitím **výztužných** sekundárních **bistabilních** ramen (...).“

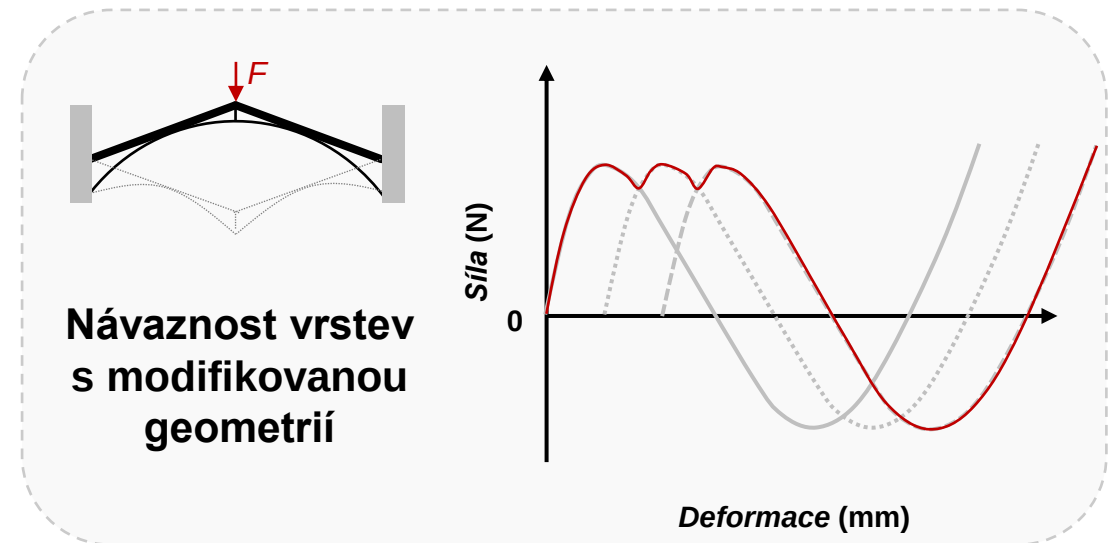
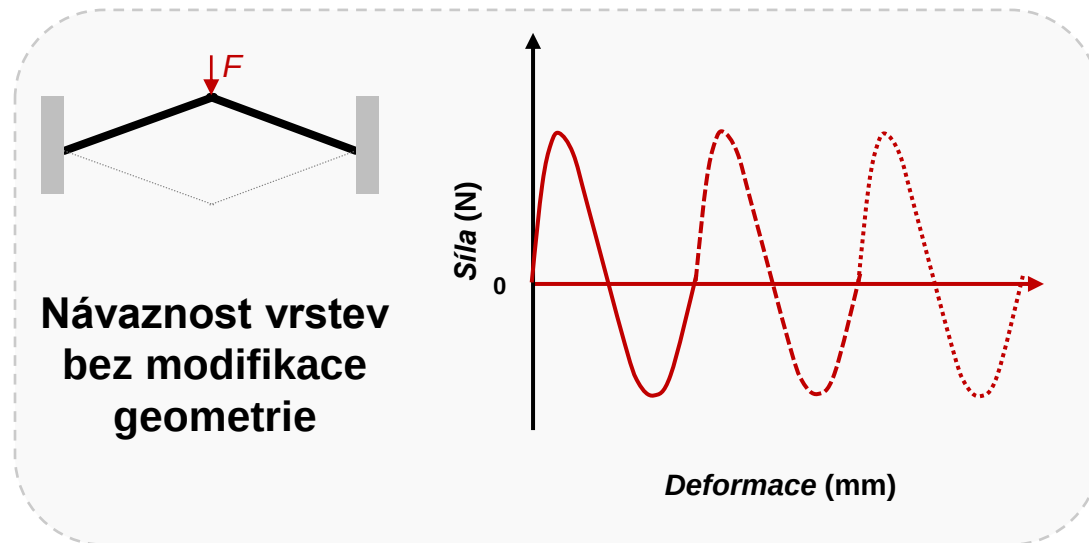
H1b: „Použitím **výztužných** sekundárních **monostabilních** ramen (...).“



VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

VO2: „Jaký faktor ovlivňuje návaznost silové odezvy jednotlivých vrstev multistabilní struktury při tlakovém zatěžování?“

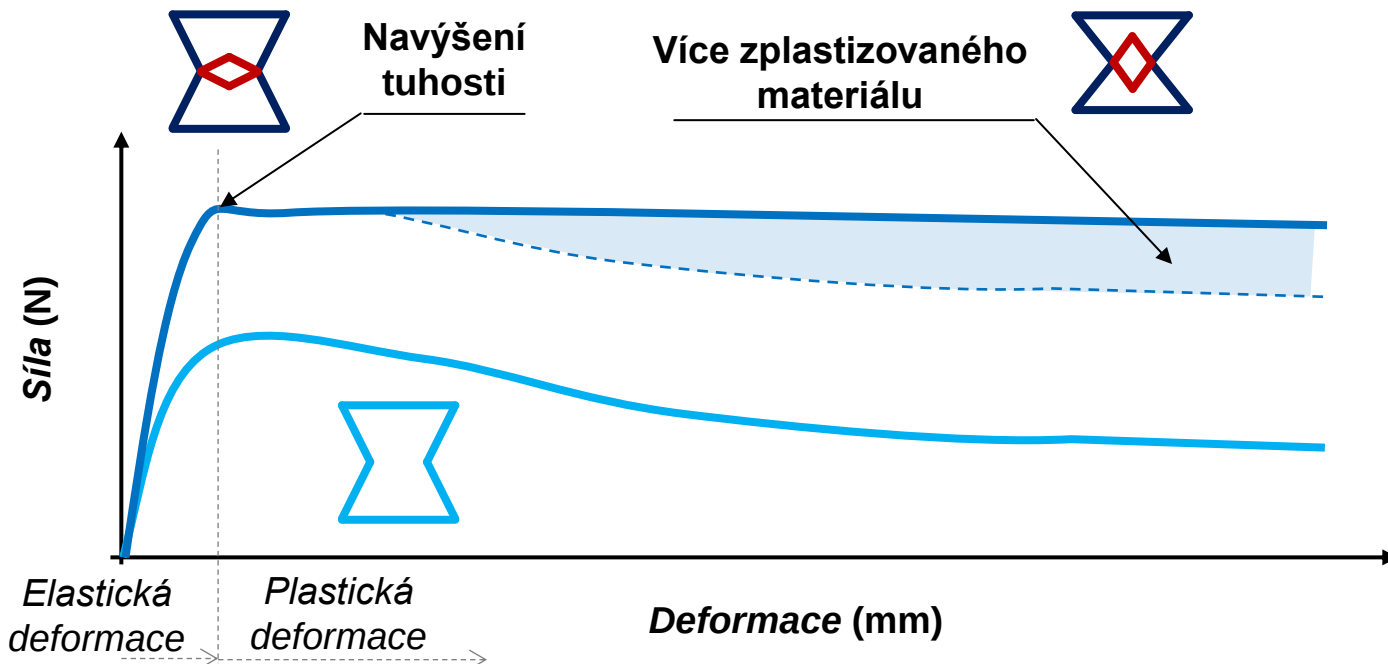
H2: „Návaznost je **nezávislá na rozměrových parametrech (tloušťka, prolomení ramen)**. K překryvu dojde jen v případě **modifikace geometrie (výztuhy, kombinace geometrií)**.“



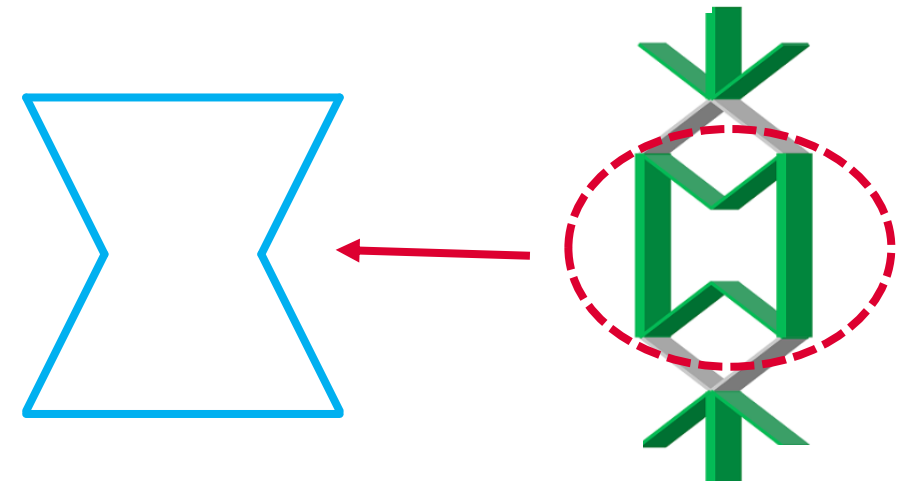
VĚDECKÉ OTÁZKY A PRACOVNÍ HYPOTÉZY

VO3: „Jaká je vhodná pozice výztužných ramen v elementární buňce re-entrant honeycomb struktury pro dosažení co nejvyšší hodnoty SEA a oblasti konstantní reakční síly při tlakovém zatěžování?“

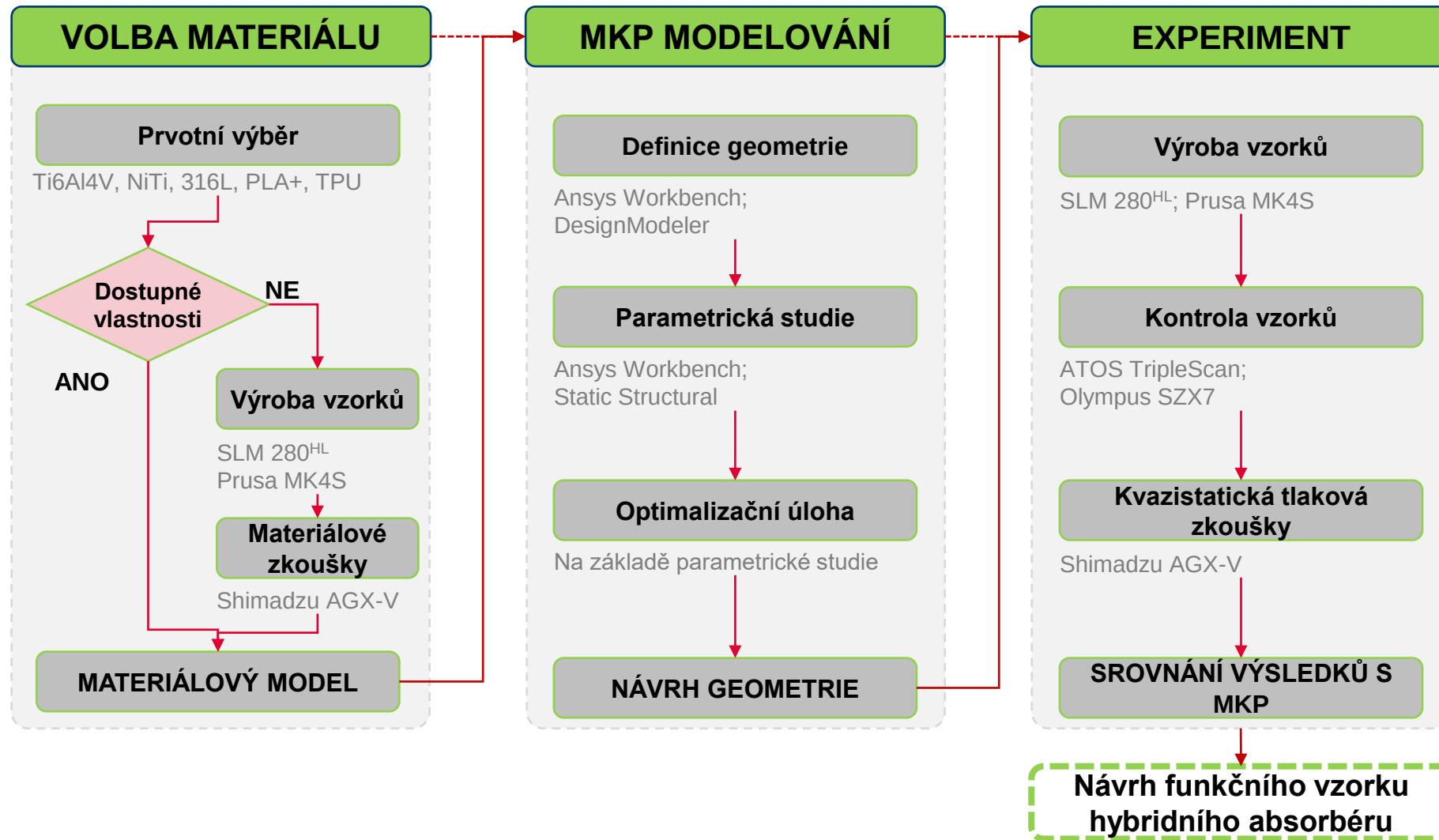
H3: „Výztuhy ve **středu buňky** zabrání prolamování ramen, což **navýší tuhost**. Zároveň navýší **množství zplastizovaného materiálu**.“



Multistabilní metamateriály proměňující tvar



ZPŮSOB ŘEŠENÍ A POUŽITÉ METODY



DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

VO1 – Modifikace bistabilní buňky

- Získaný projekt mezifakultního výzkumu (s FCH)
- Úprava vlastností polymerních materiálů pro vyšší poměr R_e/E
- Výroba a testování upravených materiálů
- Fáze návrhu modifikované geometrie bistabilní buňky (MKP)

NEVEŘEJNÉ

NEVEŘEJNÉ

DOSAŽENÉ VÝSLEDKY

VO3 – Modifikace auxetické struktury

- Projekt BAANG → stáž na TU Wien
- Hlavní závěry
 - Až 3x vyšší tuhost buňky
 - Nejvhodnější umístění výztuh je v blízkosti středu → nejvíce zplastizovaného materiálu
 - Navýšení měrné absorpce struktury o 70 % při snížení fluktuace napětí o 36 %
 - Stabilní deformace i při dynamickém zatížení
- Publikace v *Scientific Reports* (Q1)
- Konference WAAMS26 v Nizozemsku

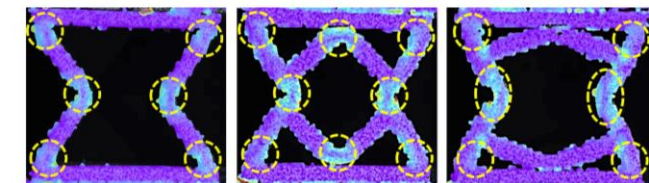
scientific reports

www.nature.com/scientificreports

Check for updates

OPEN Comprehensive study of the influence of reinforcements on the deformation mechanism and energy absorption performance of auxetic structure

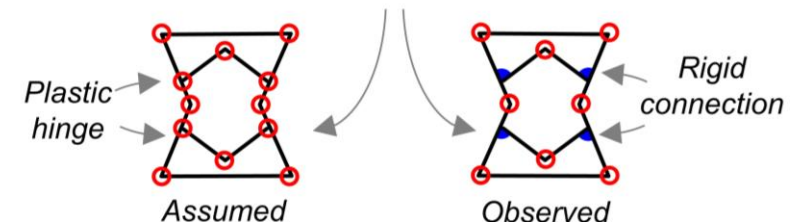
Vítězslav Sobol^{1✉}, Ondřej Červinek¹, Jan Jaroš¹, Melanie Todt², Jakub Hurník¹ & Daniel Koutný¹



No Reinf.

V10

V25



(Sobol et al., 2026)

ZÁVĚR

VO1 – Modifikace bistabilní buňky

- Mezifakultní projekt s FCH
- Stav řešení 50 %
- Plán publikace 09/2027

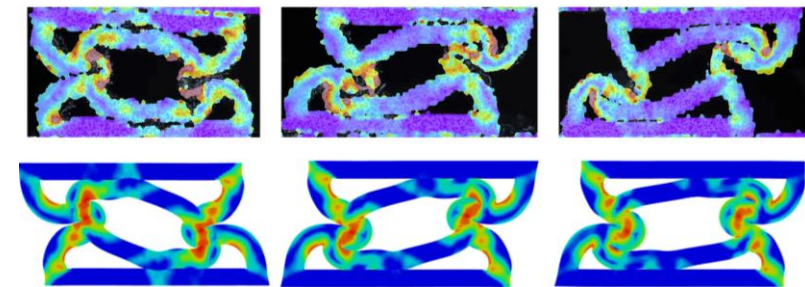
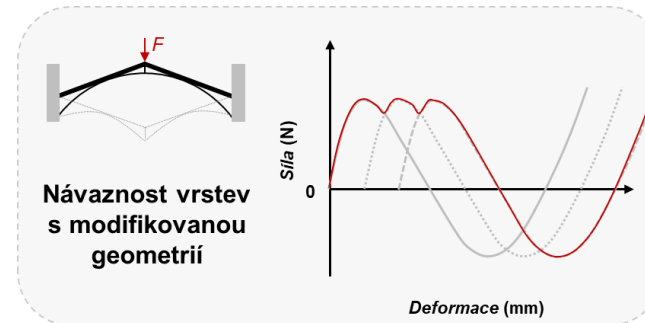
VO2 – Řízení překryvu silové odezvy

- Navazující fáze na VO1
- Stav řešení 0 %

VO3 – Modifikace auxetické struktury

- Spolupráce s TU Wien (BAANG)
- Stav řešení 100 %
- Publikace 05/2026, Q1 (IF = 4,9)

NEVEŘEJNÉ



V10

(Sobol et al., 2026)

V15

V20

DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST!

Ing. Vítězslav Sobol

Vitezslav.Sobol@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ