

# Aditivní výroba prostorových prutových struktur z termoplastu

**Ing. Petr Křivohlavý**

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

Školitel specialista: Ing. David Škaroupka, Ph. D.

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ  
Fakulta strojního inženýrství  
VUT v Brně

Brno, 17.1.2024



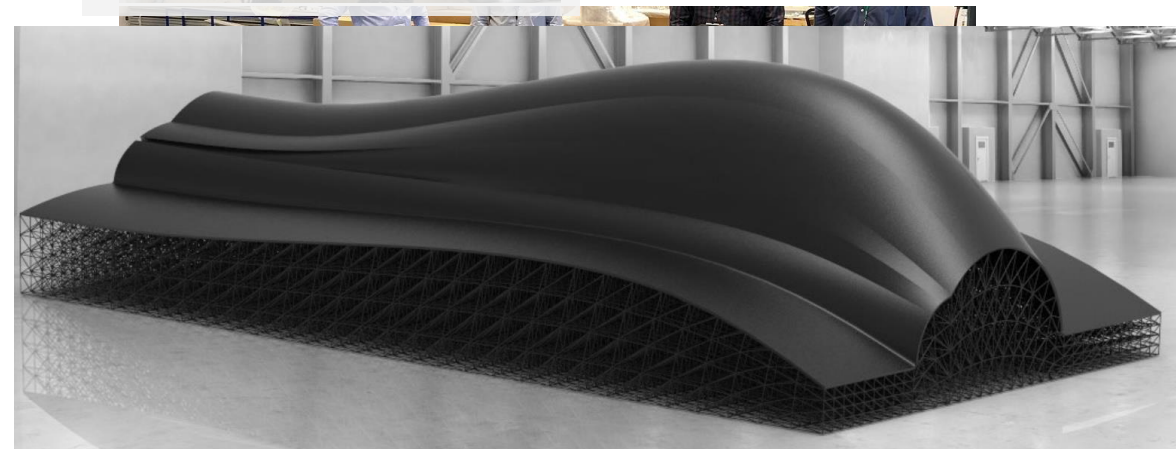
ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

# Motivace pro řešení

- Tvorba lehkých velkorozměrových dílů
- Velkorozměrové formy pro
  - Lité stěny
  - Laminované kompozitní díly
    - Trh 45 mld. \$ z toho 25-30 % otevřené formy
- Využití 3D tisku
  - Zrychlení výrobního procesu
  - Možnost customizace
- Zajištění tuhosti a výplně objemu forem pomocí prutových struktur
  - Úspora materiálu → snížení uhlíkové stopy



Bednění lité stěny  
(branch.technology)

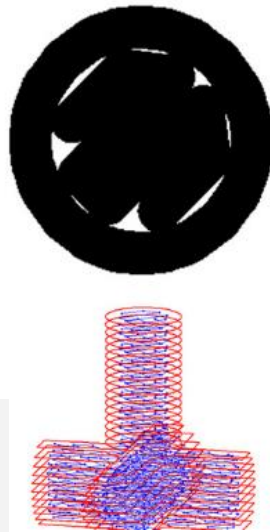


3D tisknutá forma sklolaminátového dílu  
(Airtech)

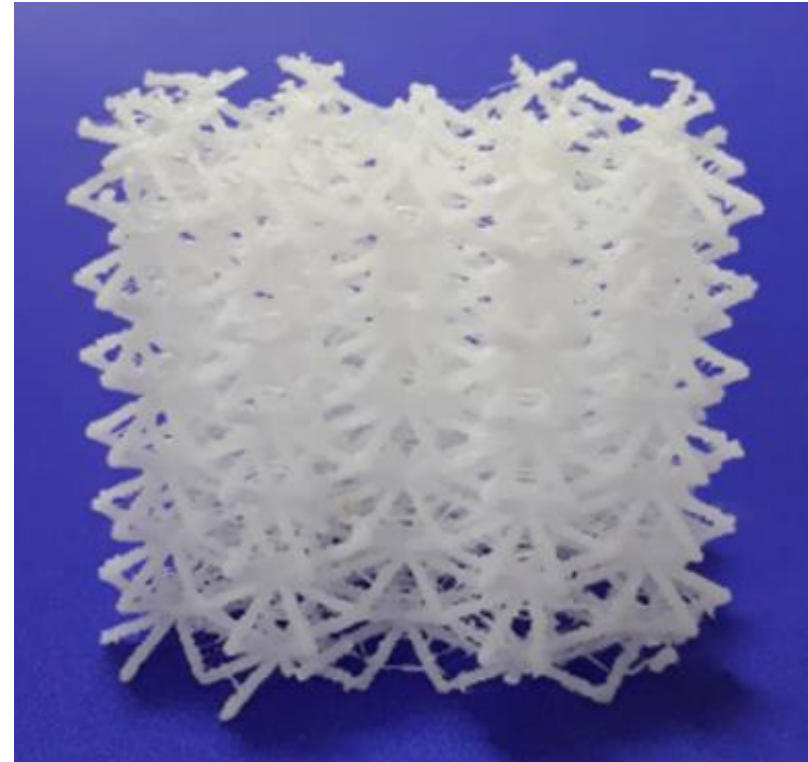
# 3D tisk polymerních prostorových struktur

## Možnost výroby několika technologiemi

- FDM – Fused depositon modeling
- SLA – Stereolitografie
- SLS – Selective laser sintering
- RAF – Robotic aditive fabrication



Trajektorie a průřez  
FDM tištěného prutu  
(Park, 2019)

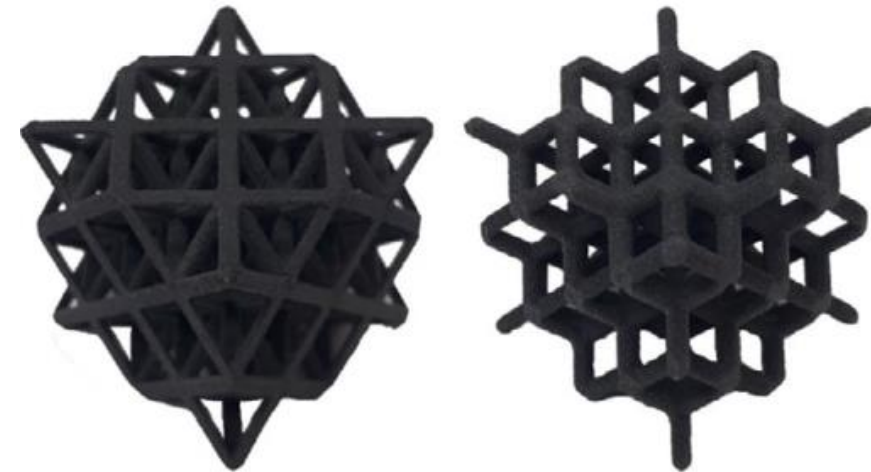
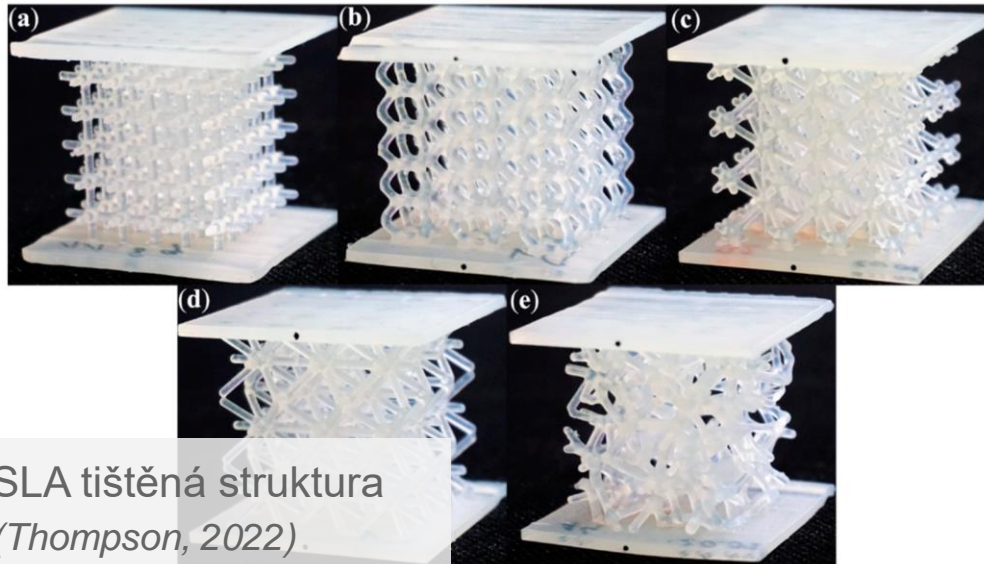


FDM tištěná struktura  
(Silva, 2021)

# 3D tisk polymerních prostorových struktur

## Možnost výroby několika technologiemi

- FDM – Fused depositon modeling
- **SLA – Stereolitografie**
- **SLS – Selective laser sintering**
- RAF – Robotic aditive fabrication

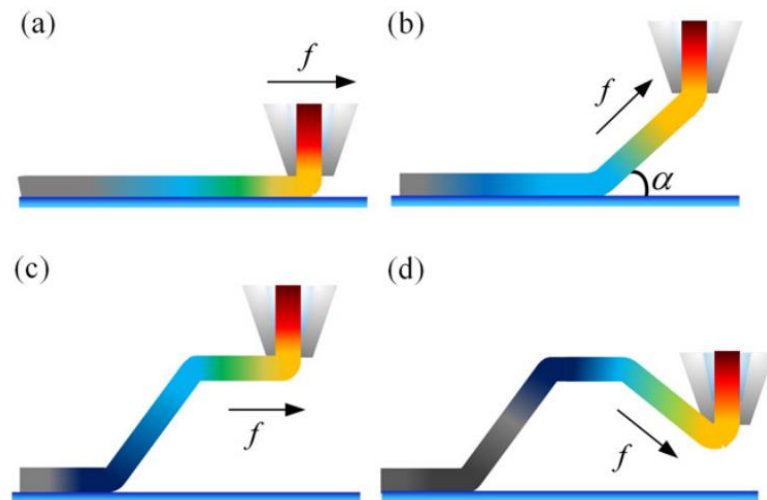


SLS tištěná struktura  
(Kladovasilakis, 2021)

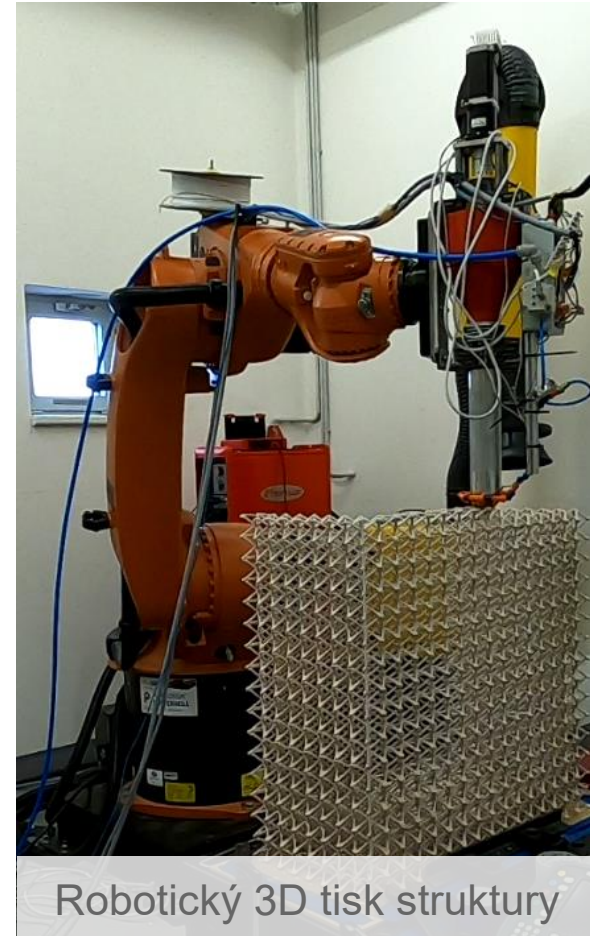
# 3D tisk polymerních prostorových struktur

## Možnost výroby několika technologiemi

- FDM – Fused depositon modeling
- SLA – Stereolitografie
- SLS – Selective laser sintering
- **RAF – Robotic aditive fabrication**

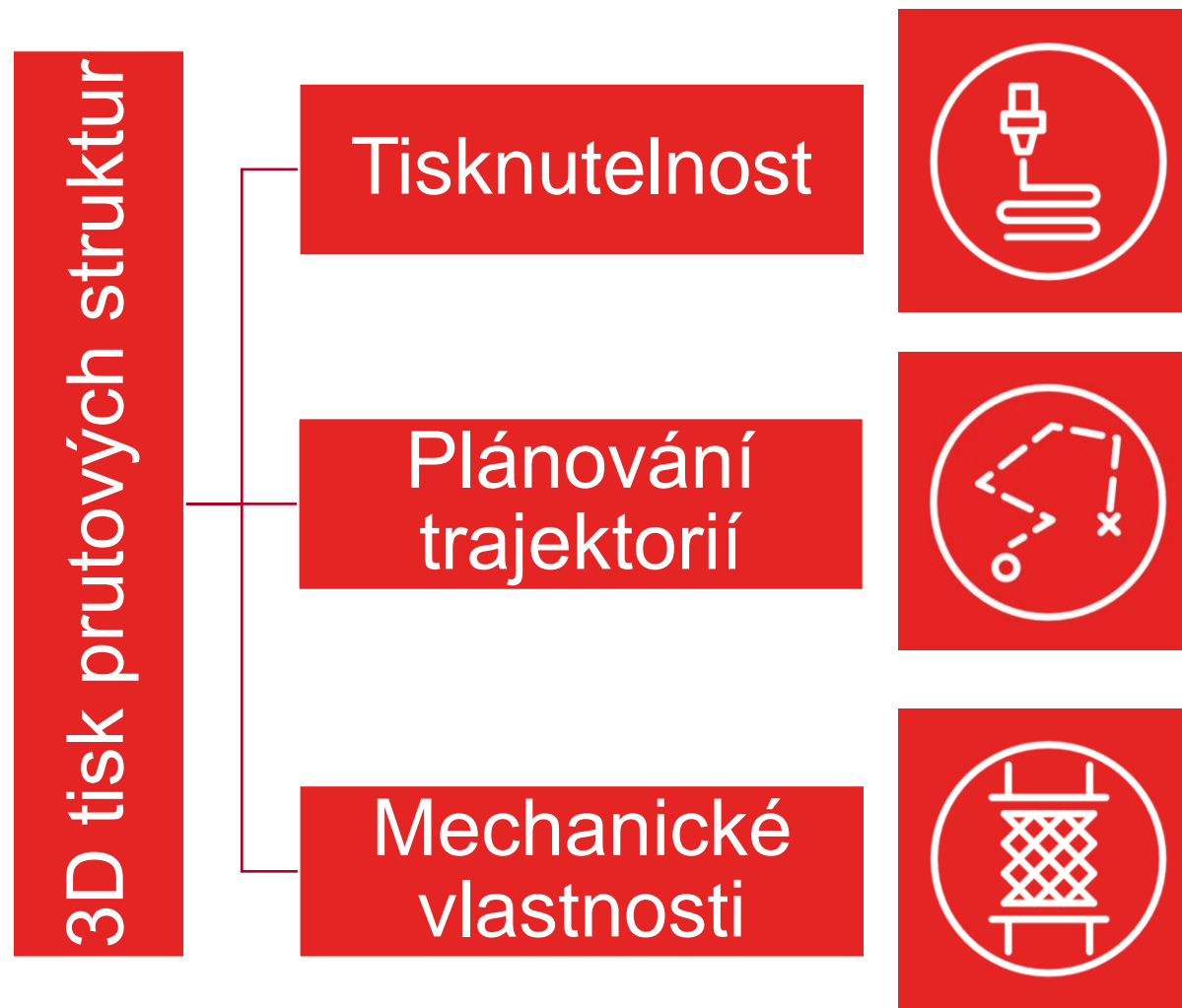


Prostorový tisk prutu  
(Liu, 2017)



Robotický 3D tisk struktury

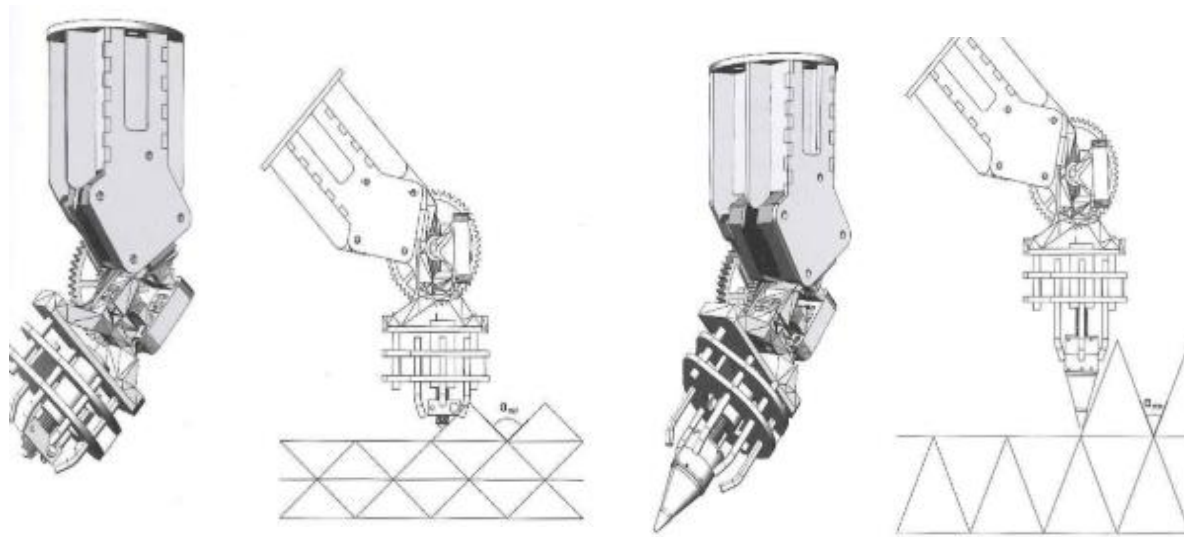
# Shrnutí současného stavu poznání



# Současný stav poznání – tisknutelnost



- Geometrie struktury
- Geometrie tiskové hlavy
- Bezpodporový 3D tisk
- Orientace tisku
- Přemostění
- Provázání vláken

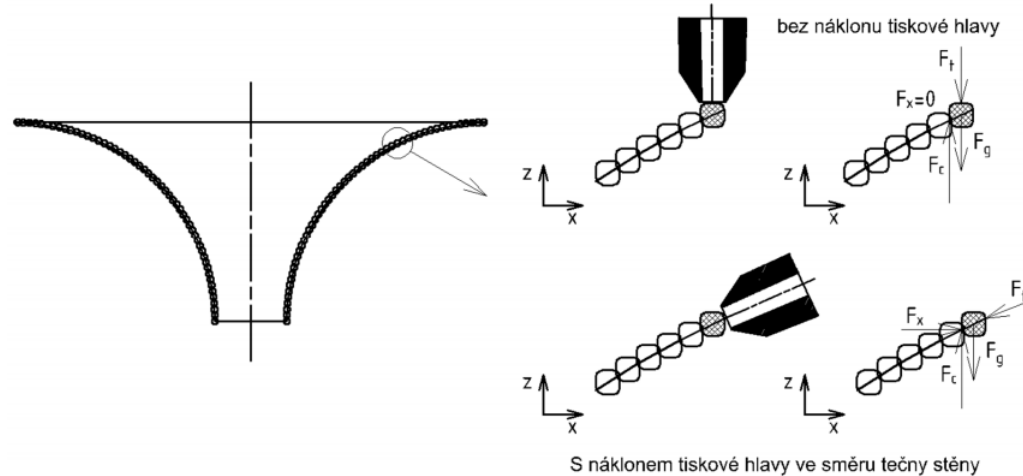


Problematika geometrie struktury a geometrie tiskové hlavy  
(Hack, 2016)

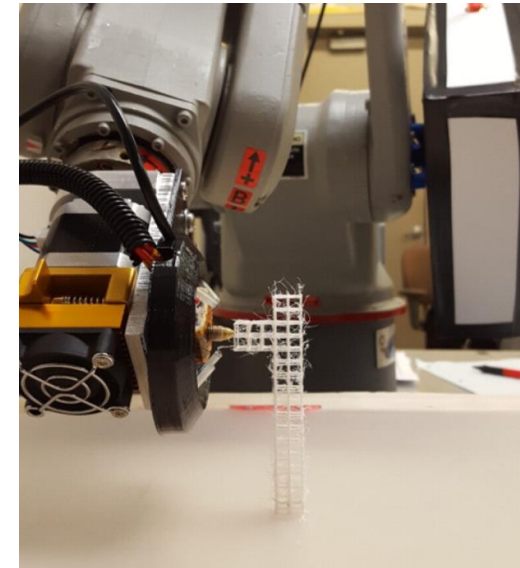
# Současný stav poznání – tisknutelnost



- Geometrie struktury
- Geometrie tiskové hlavy
- **Bezpodporový 3D tisk**
- Orientace tisku
- Přemostění
- Provázání vláken



Vliv natočení tiskové hlavy  
(Krejčířík, 2018)



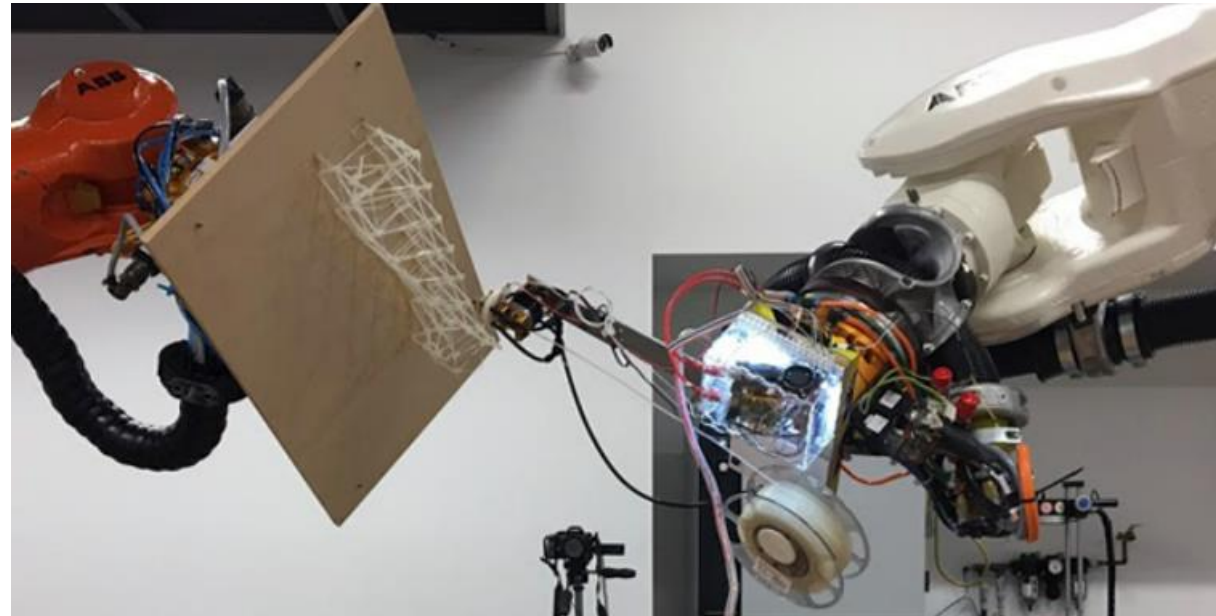
Tisk prutu souose  
(Ishak, 2019)



# Současný stav poznání – tisknutelnost



- Geometrie struktury
- Geometrie tiskové hlavy
- Bezpodporový 3D tisk
- **Orientace tisku**
- Přemostění
- Provázání vláken

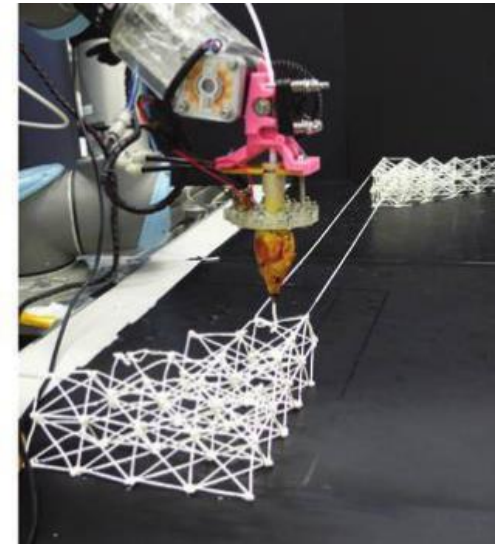
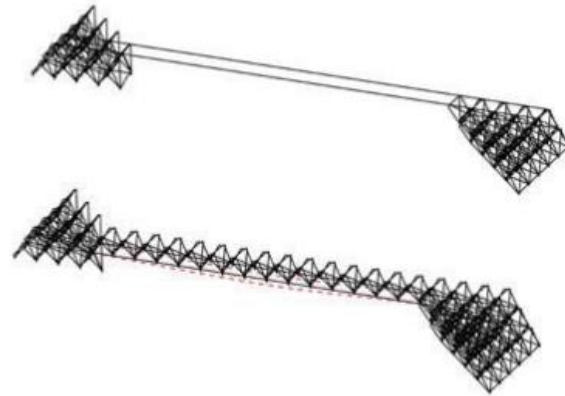


Zkoumání vlivu orientace výtisku  
(Guevara, 2019)

# Současný stav poznání – tisknutelnost



- Geometrie struktury
- Geometrie tiskové hlavy
- Bezpodporový 3D tisk
- Orientace tisku
- **Přemostění**
- Provázání vláken

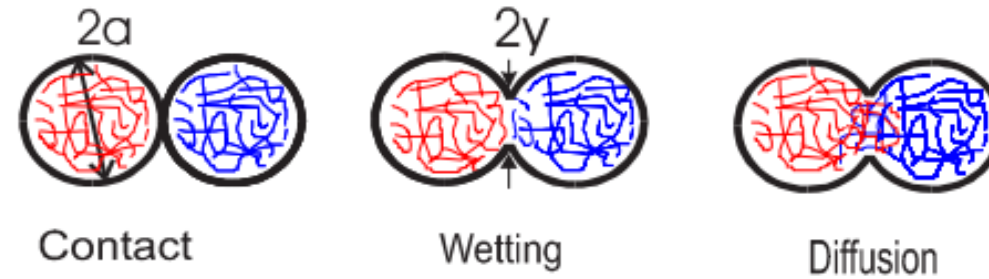


700 mm dlouhé přemostění  
(Helm, 2017)

# Současný stav poznání – tisknutelnost



- Geometrie struktury
- Geometrie tiskové hlavy
- Bezpodporový 3D tisk
- Orientace tisku
- Přemostění
- **Provázání vláken**

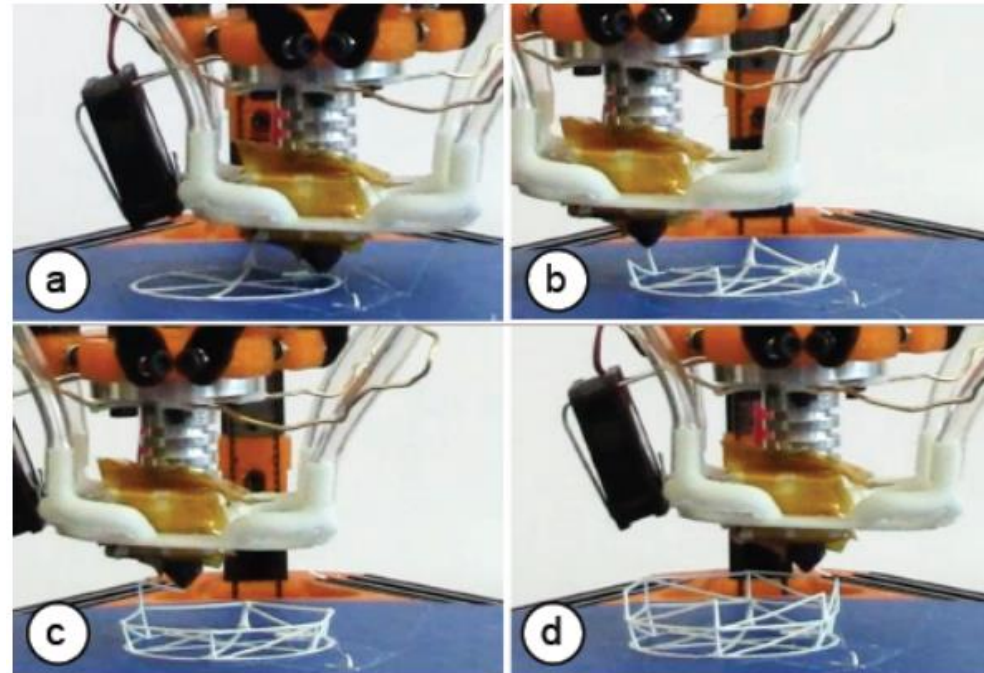


Režimy napojení vláken  
(Sun, 2003)

# Současný stav poznání – plánování trajektorií

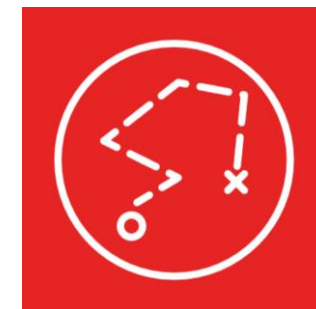


- **Kolize s již vytištěnou strukturou**
- Lichoběžníky X Trojúhelníky
- Úpravy trajektorie v uzlu
- Modifikace trajektorie
- Nepravidelné struktury

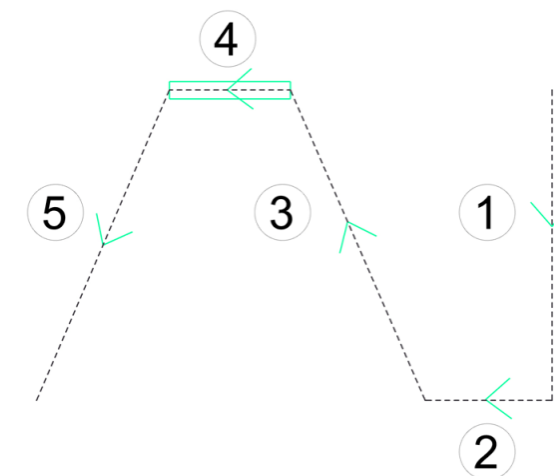
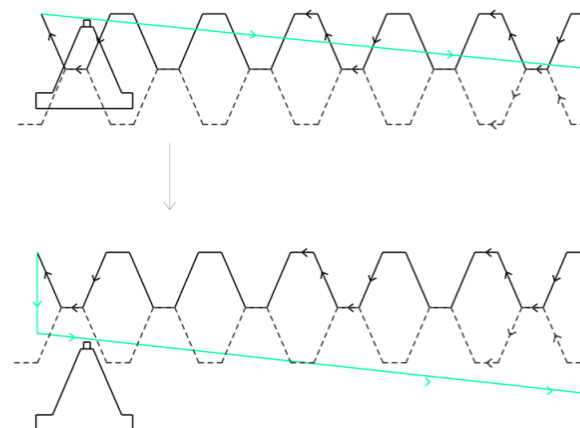
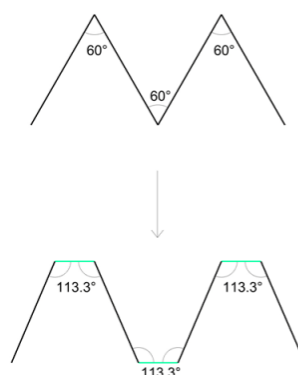


Tisk jednoduché geometrie pro vyhnutí se kolizi  
(Mueller, 2015)

# Současný stav poznání – plánování trajektorií



- Kolize s již vytištěnou strukturou
- **Lichoběžníky X Trojúhelníky**
- Úpravy trajektorie v uzlu
- Modifikace trajektorie
- Nepravidelné struktury

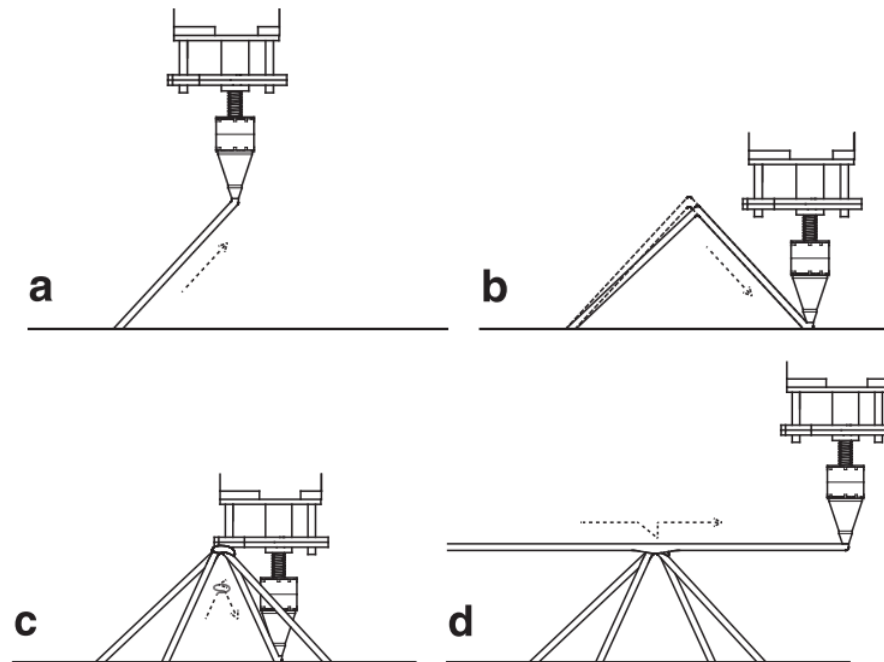


Využití lichoběžníků proti trojúhelníkům  
(Guevara, 2019)

# Současný stav poznání – plánování trajektorií



- Kolize s již vytištěnou strukturou
- Lichoběžníky X Trojúhelníky
- **Úpravy trajektorie v uzlu**
- Modifikace trajektorie
- Nepravidelné struktury

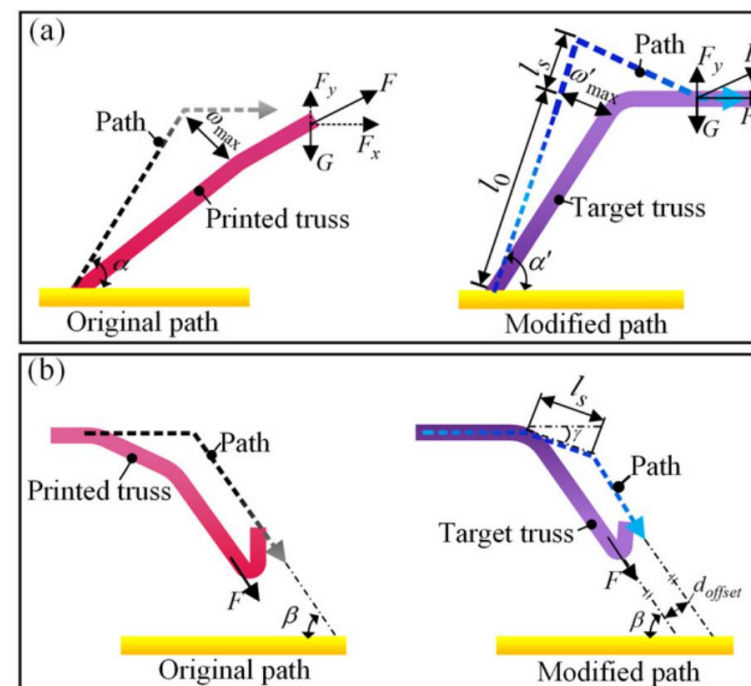


Úprava trajektorie pro lepší napojení v uzlu  
(Helm, 2017)

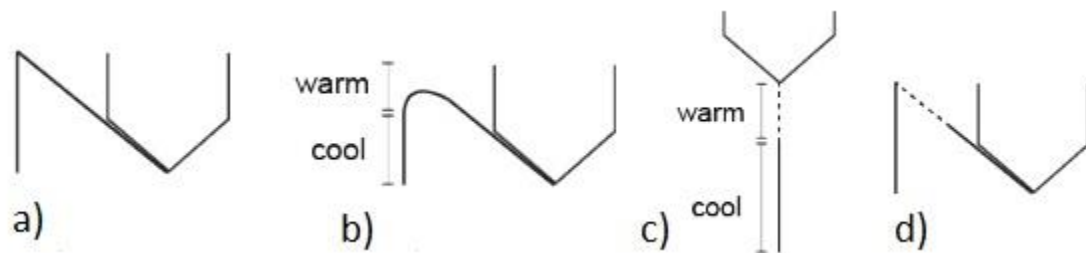
# Současný stav poznání – plánování trajektorií



- Kolize s již vytištěnou strukturou
- Lichoběžníky X Trojúhelníky
- Úpravy trajektorie v uzlu
- **Modifikace trajektorie**
- Nepravidelné struktury



Modifikace trajektorie pro zvýšení přesnosti (Liu, 2017)

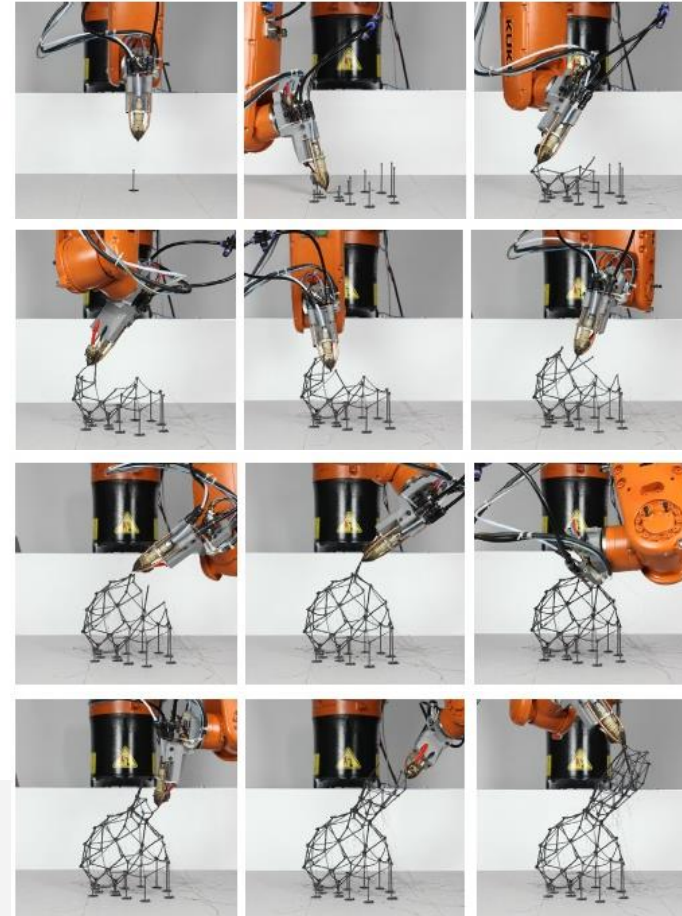


Modifikace trajektorie pro dosažení ostrého rohu (Mueller, 2015)

# Současný stav poznání – plánování trajektorií



- Kolize s již vytištěnou strukturou
- Lichoběžníky X Trojúhelníky
- Úpravy trajektorie v uzlu
- Modifikace trajektorie
- **Nepravidelné struktury**



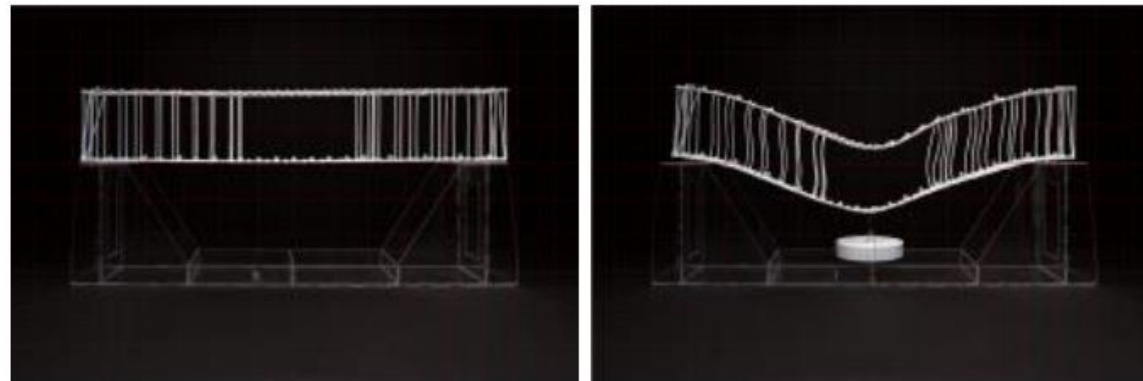
Komplikované algoritmy pro nepravidelné struktury  
(Huang, 2017)



# Současný stav poznání – mechanické vlastnosti



- Testování
  - Ohybové testy
  - Tlakové testy
- Topologie buněk

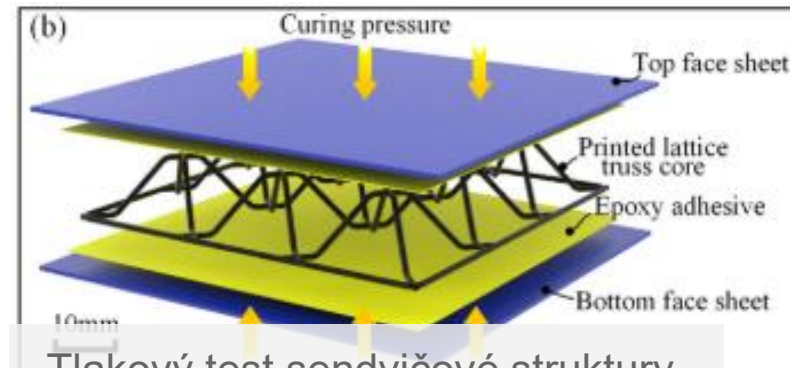


Ohybové testy  
(Hack, 2015)

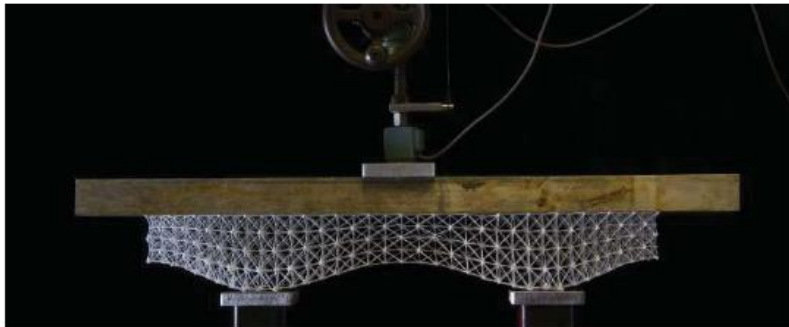
# Současný stav poznání – mechanické vlastnosti



- **Testování**
  - Ohybové testy
  - **Tlakové testy**
- Topologie buněk



Tlakový test sendvičové struktury  
(Liu, 2017)



Testovaný objekt  
(Kim, 2019)

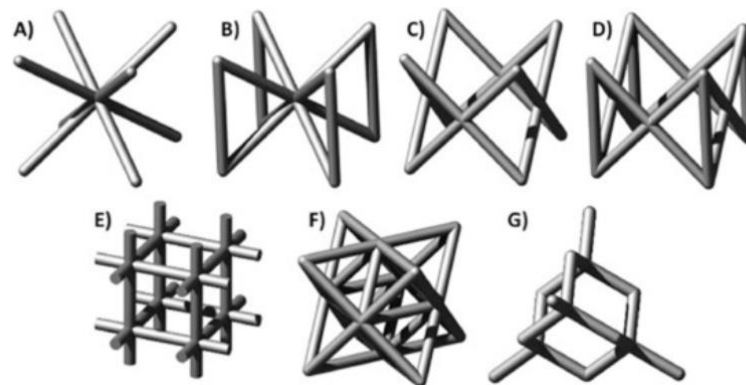


Testovací těleso  
(Syam, 2019)

# Současný stav poznání – mechanické vlastnosti



- Testování
- Topologie buněk
  - Geometrie buňky
  - Relativní hustota



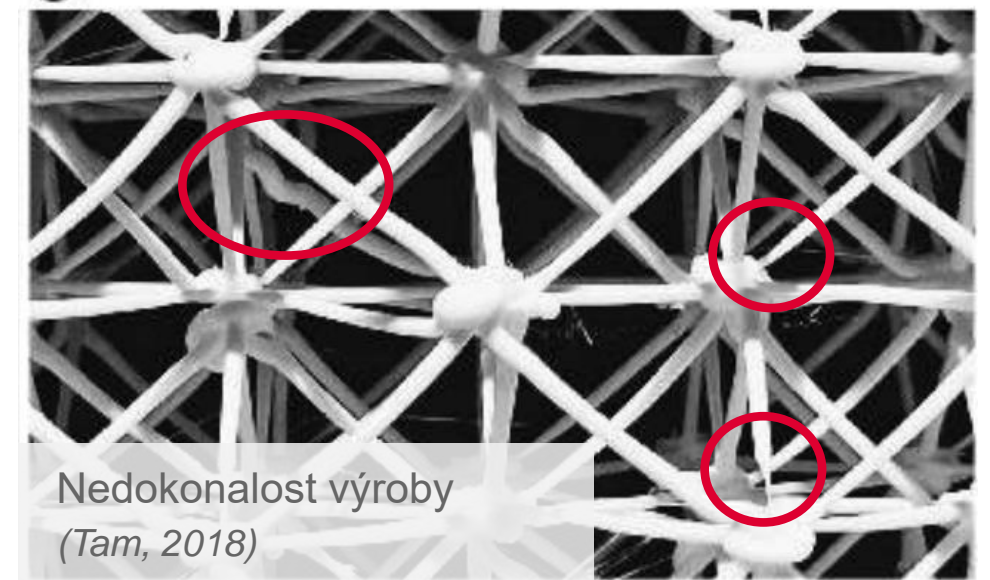
Geometrie buňky  
(Maconachie, 2019)

	Relative density		
	10%	20%	30%
(a) Octet			
	TS=1.183mm	TS=1.738mm	TS=2.202mm
(b) Rhombic dodecahedron			
	TS=1.313mm	TS=1.932mm	TS=2.453mm
(c) Kelvin			
	TS=1.687mm	TS=2.494mm	TS=3.183mm
(d) Weaire-Phelan			
	TS=1.089mm	TS=1.603mm	TS=2.036mm

Topologie buněk  
(Kladovasilakis, 2021)

# Bílá místa

- Neznámé závislosti procesních parametrů a jejich vliv na:
  - Přesnost výroby
  - Rychlost procesu výroby
  - Mechanické vlastnosti
- Neznáme mechanické vlastnosti prostorově tištěných prutů
  - Vliv orientace výsledného dílu na mechanické vlastnosti
- Vliv nekruhového průřezu trysky



# Vymezení cílů disertační práce

## Hlavní cíl disertační práce

- Zjištění vlivů a vazeb procesních parametrů na tisk polymerních prutových struktur, především jejich vliv na přesnost a mechanické vlastnosti vytištěných prutových struktur

## Přínos disertační práce

- Výroba lehkých, přesných a snadno recyklovatelných forem pro kompozitní díly
- Rozšíření poznatků umožňující přesnější a rychlejší výrobu prutových struktur se známými mechanickými vlastnostmi
- Zdokonalení technologie může vést ke zvýšení jejího potenciálu a rozšíření aplikačních možností

# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

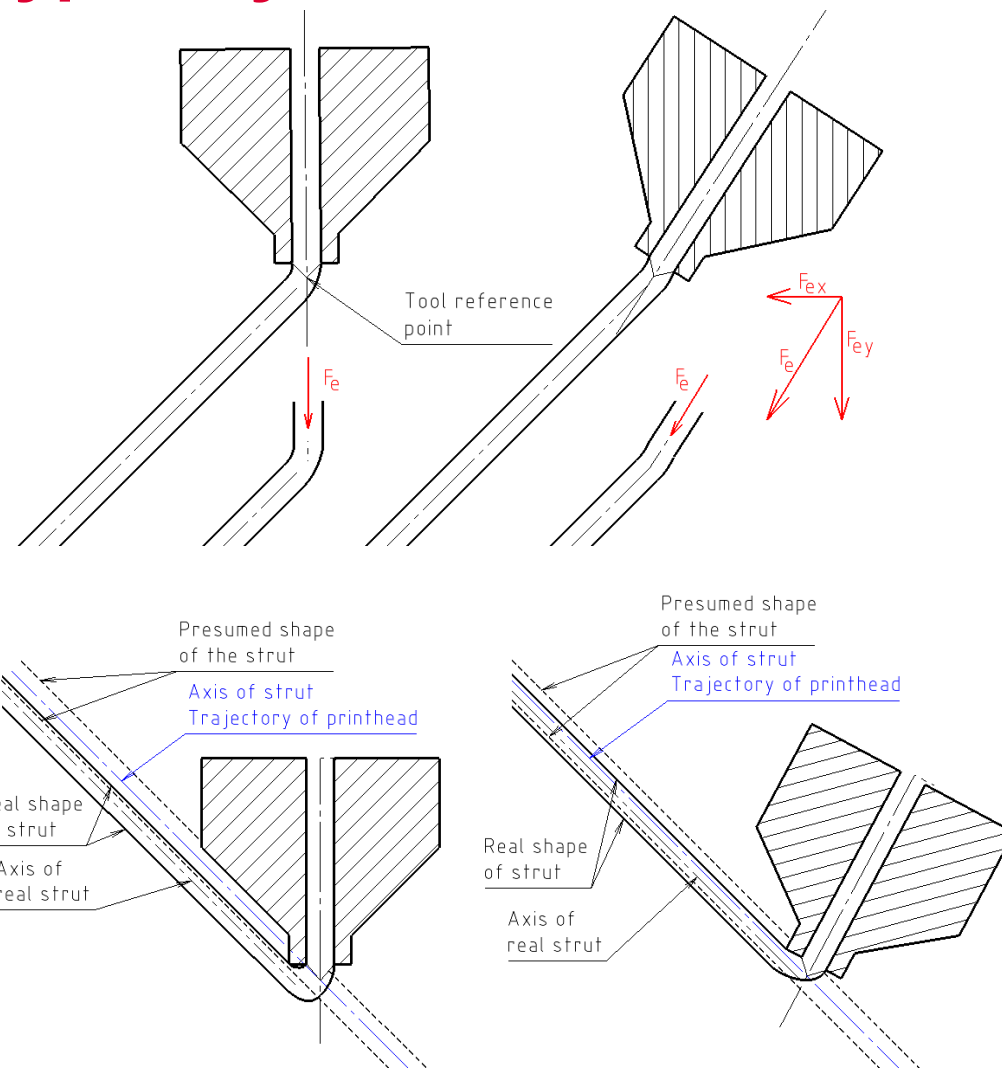
Výzkum/vývoj 70/30

## R&D otázka 1

Jaký vliv mají jednotlivé procesní parametry na přesnost tisku prostorových prutových struktur a jaké jsou mezi nimi vztahy?

## Pracovní hypotéza 1

Nejvýraznější vliv na tisk polymerních prutových struktur má vhodné nastavení chlazení nánosu a vhodné napolohování tiskové hlavy vůči nánosu.



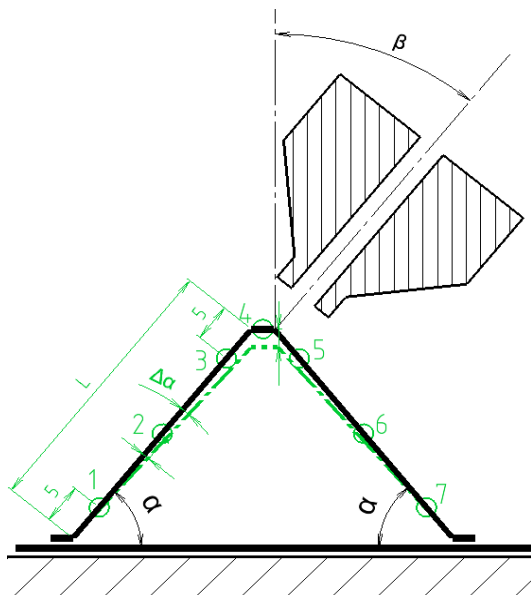
# Materiál a metody

Návrh testovací  
struktury

Design of  
Experiments

Výroba a  
digitalizace vzorků

Statistický model  
vlivu parametrů



## Zkoumané parametry

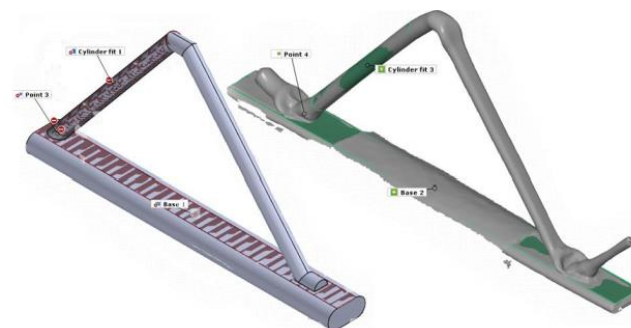
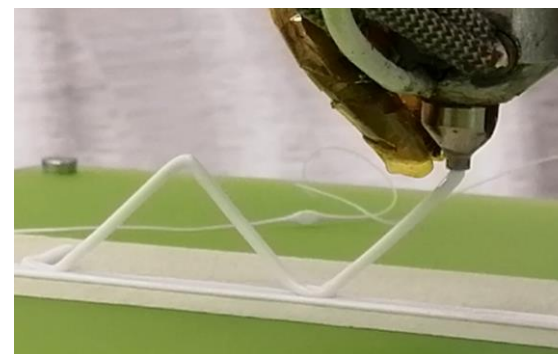
Rychlost tisku

Úhel prutu od podložky

Délka prutu

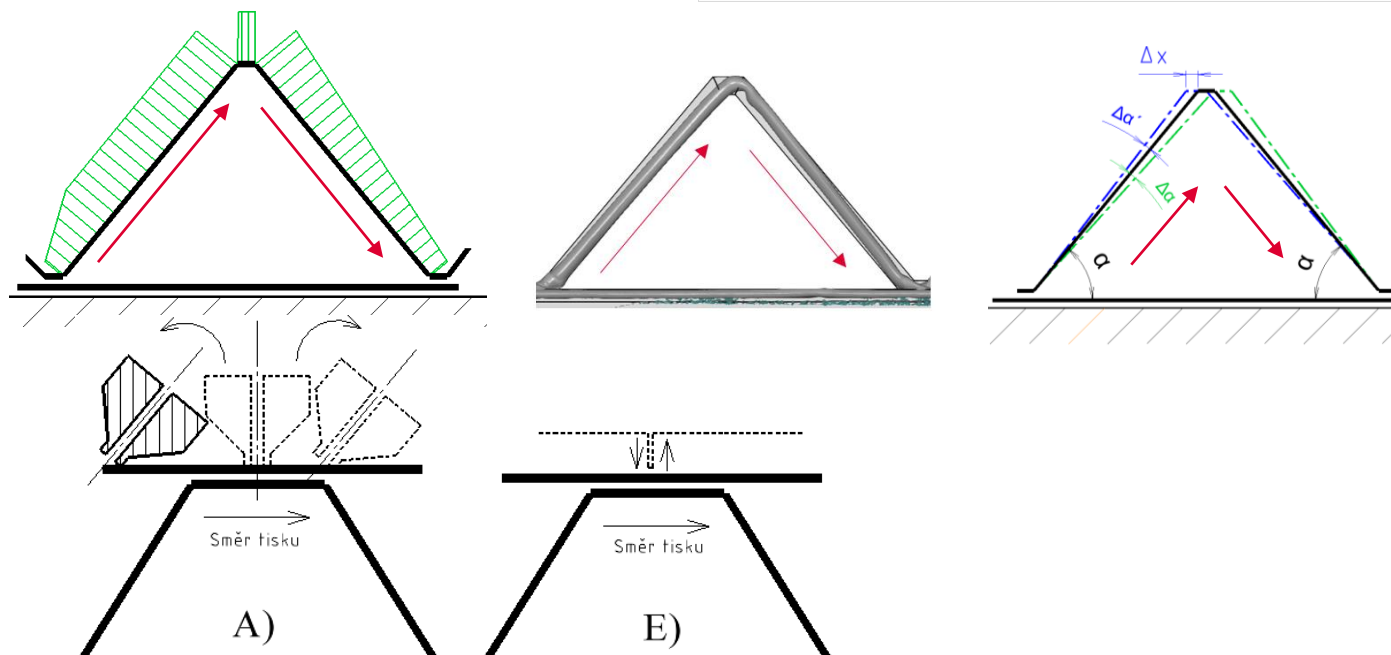
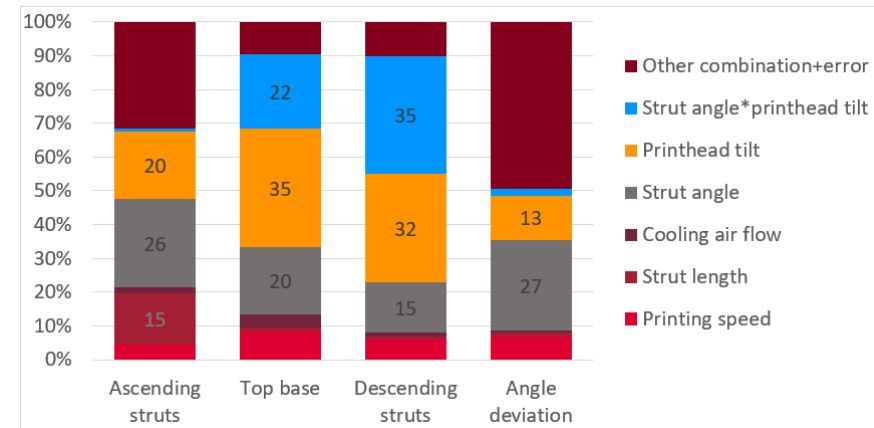
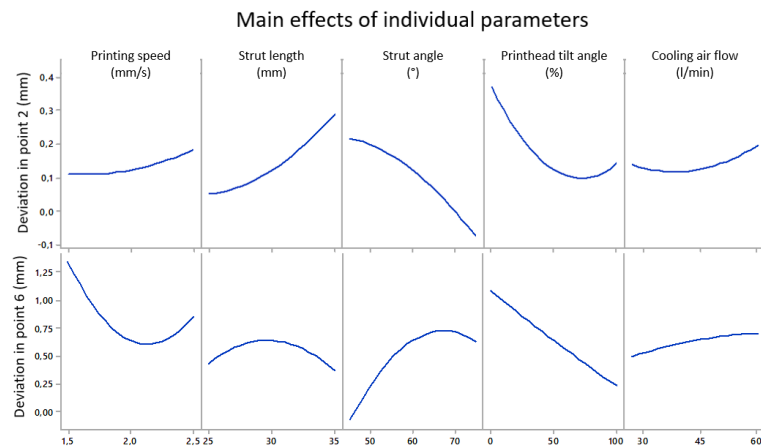
Průtok chladicího vzduchu

Úhel natočení tiskové hlavy



# Výsledky

- Statistický model vlivu jednotlivých parametrů a jejich vzájemných vztahů
- Nejvýznamnější vliv natočení tiskové hlavy
- Optimalizace procesních parametrů na základě modelu
- Modifikace trajektorie na základě modelu
- Optimalizace procesu v uzlech pro zdokonalení spojení
- Dosažení přesnosti do 0,5 mm
- Zajištění vystavitelnosti





# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

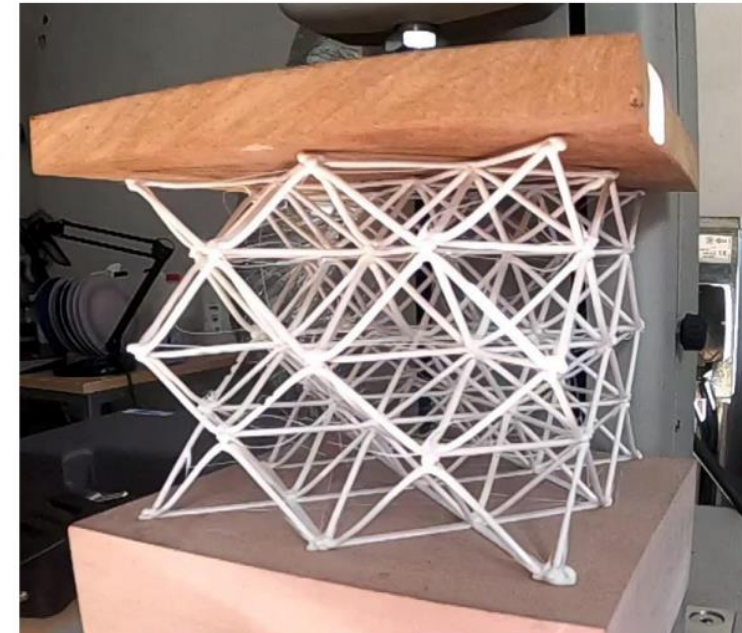
Výzkum/vývoj 60/40

## R&D otázka 2

Jaký vliv má technologie prostorového tisku na mechanické vlastnosti polymerních prutových struktur?

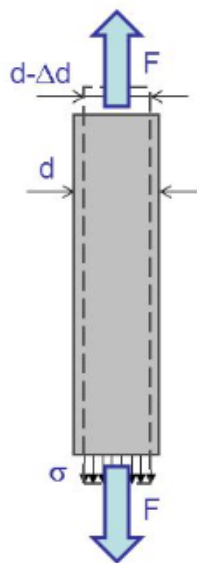
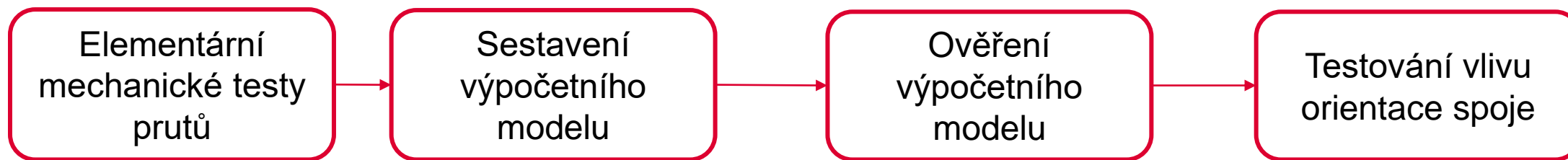
## Pracovní hypotéza 2

Zvolená technologie zvýší únosnost struktur díky postupu a orientaci tisku, kdy jediná nesouvislost mezi jednotlivými nánosy bude v uzlech. Mechanické vlastnosti zde budou závislé na orientaci zatížení.



Tlaková zkouška  
(Vašátko, 2022)

# Materiál a metody



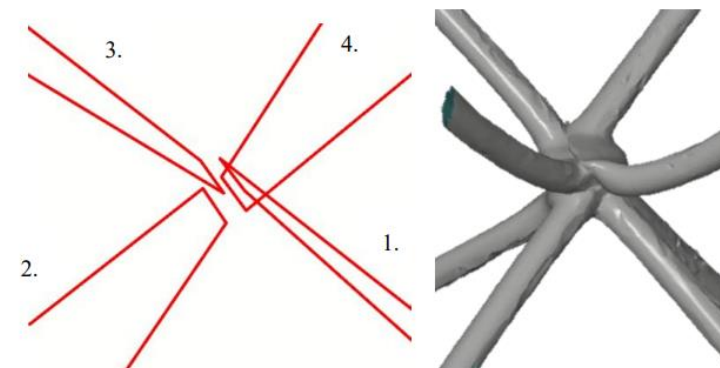
Volba vhodné geometrie buňky



Geometrie buňky  
(Maconachie, 2019)

Mechanické testy

Výroba vzorků



# Vědecké otázky a pracovní hypotézy

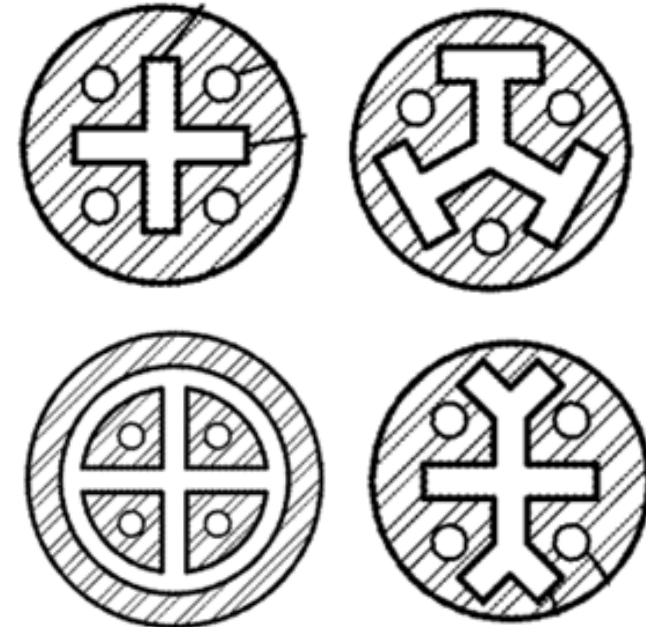
Výzkum/vývoj 50/50

## R&D otázka 3

Jaký je vliv nekruhového průřezu trysky na proces prostorového 3D tisku prutových struktur?

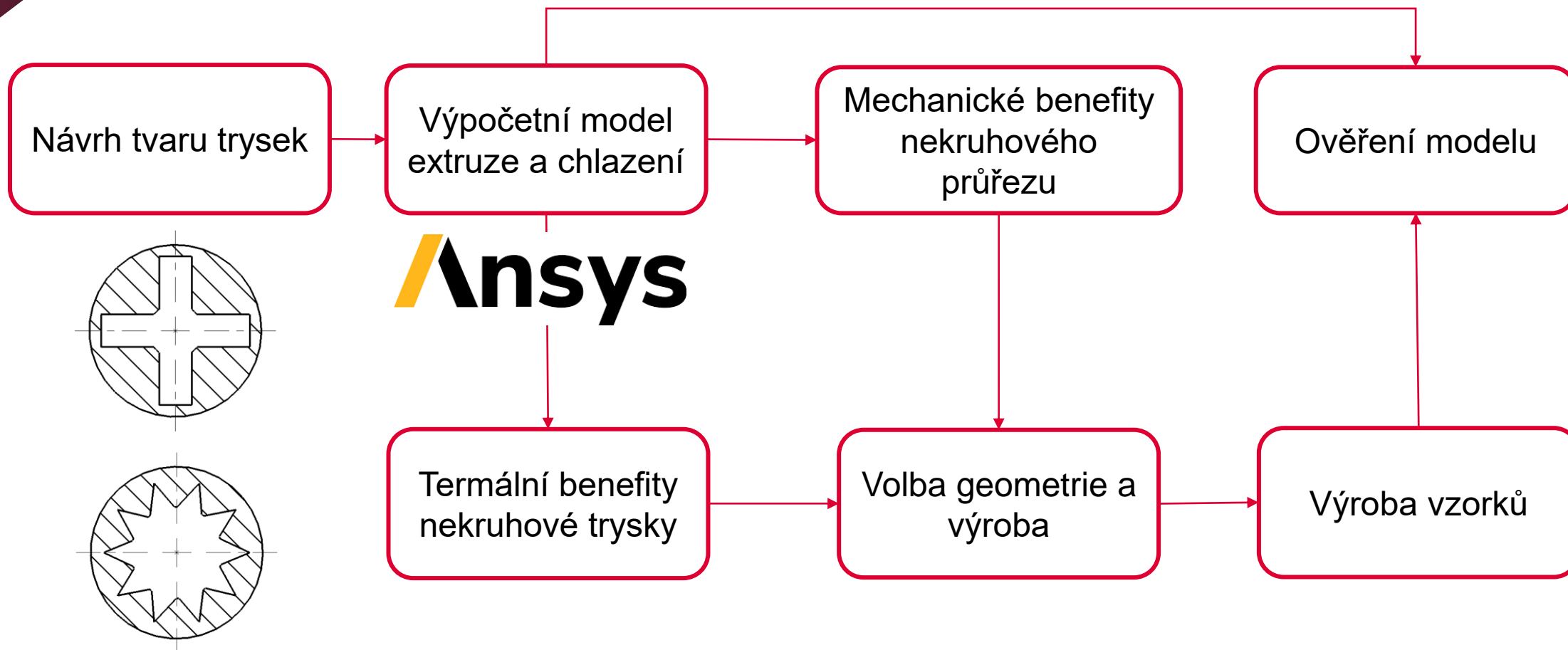
## Pracovní hypotéza 3

Tisk tryskou nekruhového průřezu zvýší chlazení tištěných prutů, bude tak možné zvýšit produktivitu výroby. Zároveň díky změně průřezu dojde ke zvýšení mechanických vlastností struktury.



Trysky nekruhových průřezů  
(Boyd, 2017)

# Materiál a metody



# DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

**Petr Křivohlavý**

Petr.Krivohlavý@vutbr.cz



ÚSTAV  
KONSTRUOVÁNÍ

[www.ustavkonstruovani.cz](http://www.ustavkonstruovani.cz)