

VELKOROZMĚROVÝ ROBOTICKÝ 3D TISK DÍLŮ Z CEMENTOVÝCH SMĚSÍ

Arnošt Vespalec, Ing.

Školitel: doc. Ing. David Paloušek Ph.D.

Školitel specialista: Ing. David Škaroupka Ph.D.

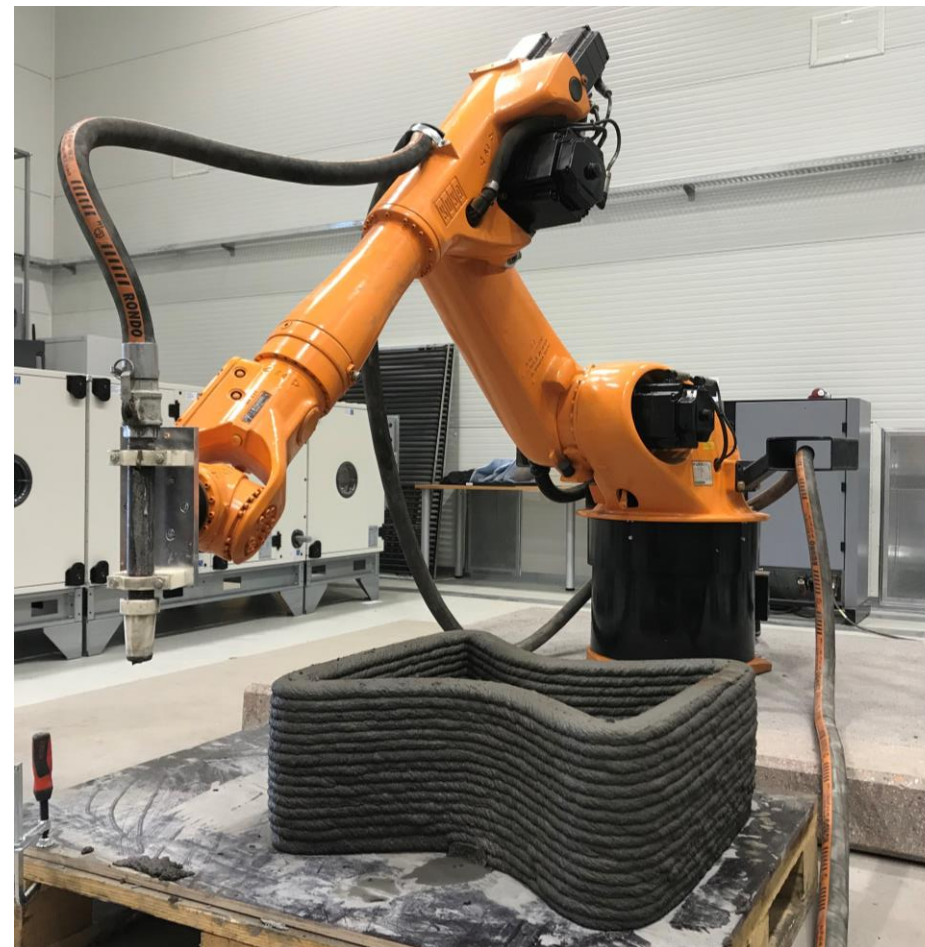
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

BRNO, 12.11.2020



OBSAH

- Motivace pro řešení problému
- Shrnutí a analýza současného stavu poznání
- Vymezení cílů disertační práce
- Způsob řešení a použité metody
- Vědecké otázky a pracovní hypotézy
- Současný stav řešení



Laboratoř AdMas - 3D tisk objektu pasivní tiskovou hlavou spirální trajektorií s lineární korekcí sesedání (*autor*)

Motivace pro řešení problému

BUDOUCNOST

Klimatické změny

- Cement **5 - 10%** globální produkce CO₂ ekv. ~0.85–0.95 t CO₂/t PC (D. Wang a kol. 2019)
- Stavební průmysl **39%** CO₂ emisí (IEA 2019)

Technologické Příležitosti

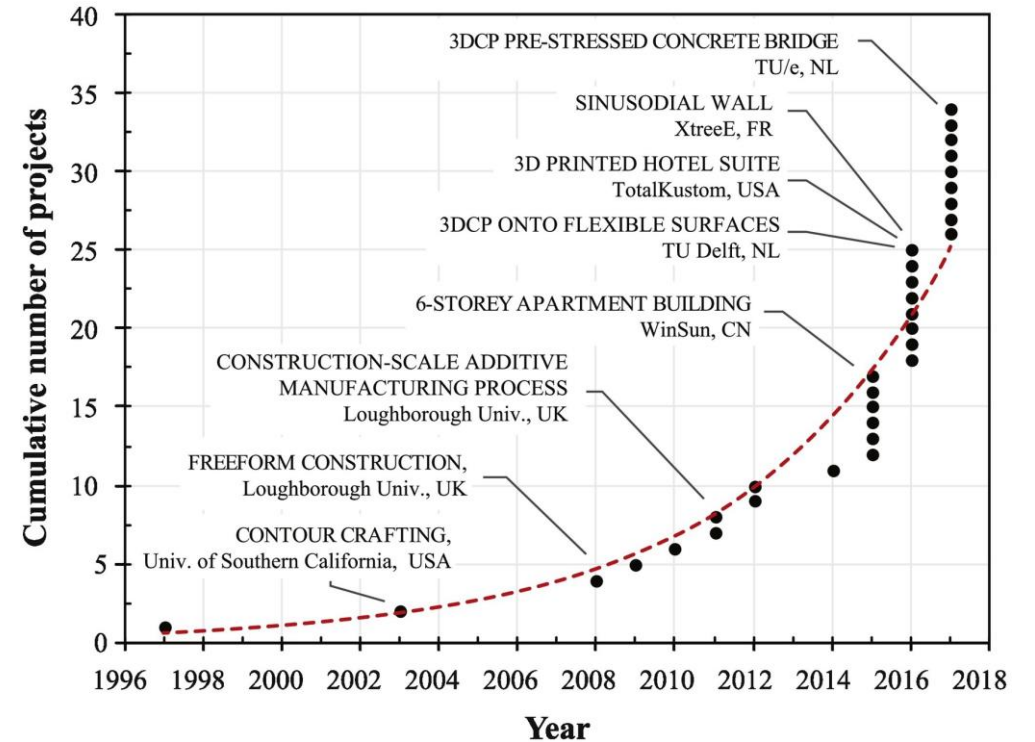
- Odbourání bednění
- Snížení spotřeby materiálu
- **Tisk směsí s větší frakcí kameniva**

Technologické Výzvy

- Transformace stavebnictví
- Forma a podoba dílů / staveb



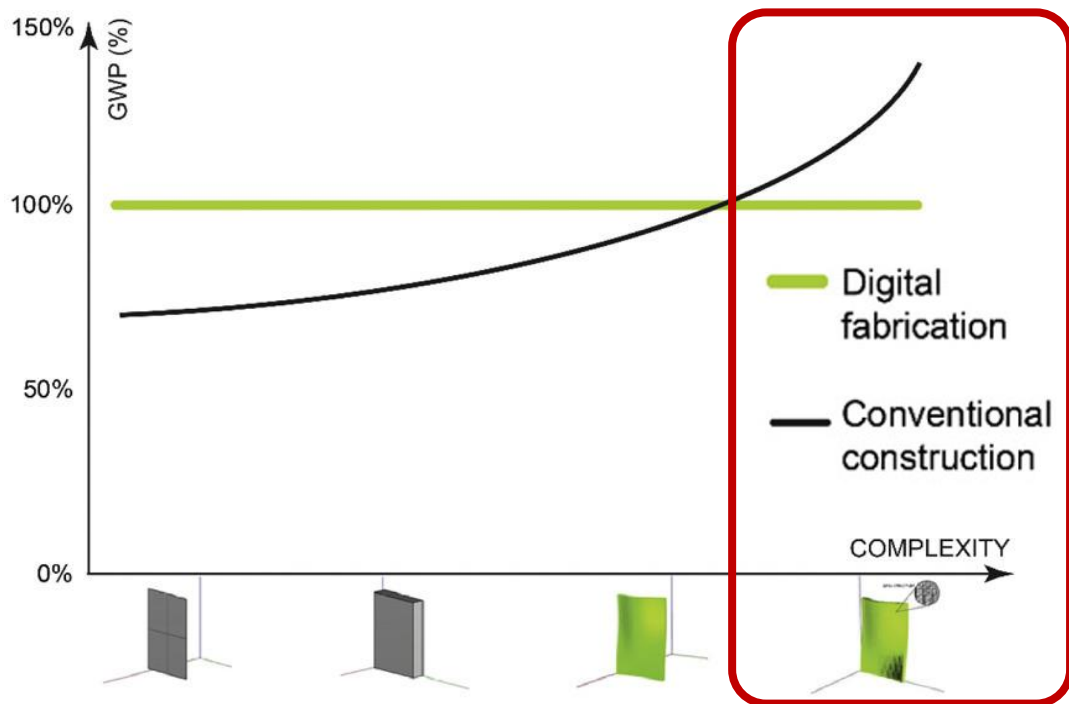
SDZ 2020



Nahoře - Vývoj aditivní výroby ve stavebnictví (Buswell, R. A., a kol. 2018)

V levo – Vizualizace 3D tisku ve stavebnictví (IAAC)

Motivace pro řešení problému



Digitální výroba vs. Konvenční způsob výroby ve spojitosti s dopadem na životní prostředí - GWP (Schutter, G.D. a kol.)

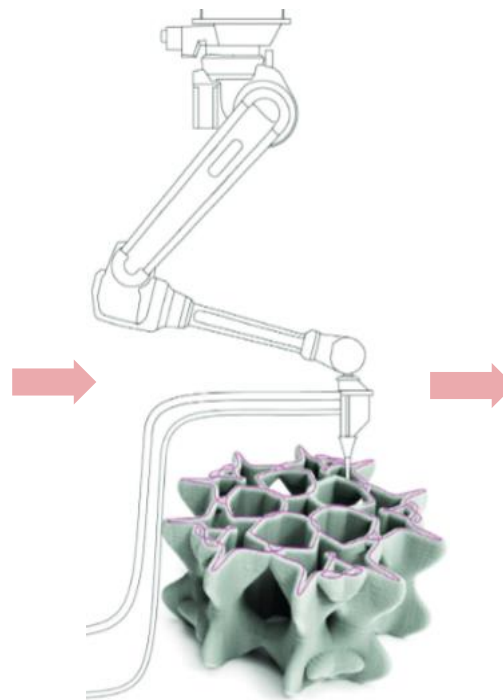
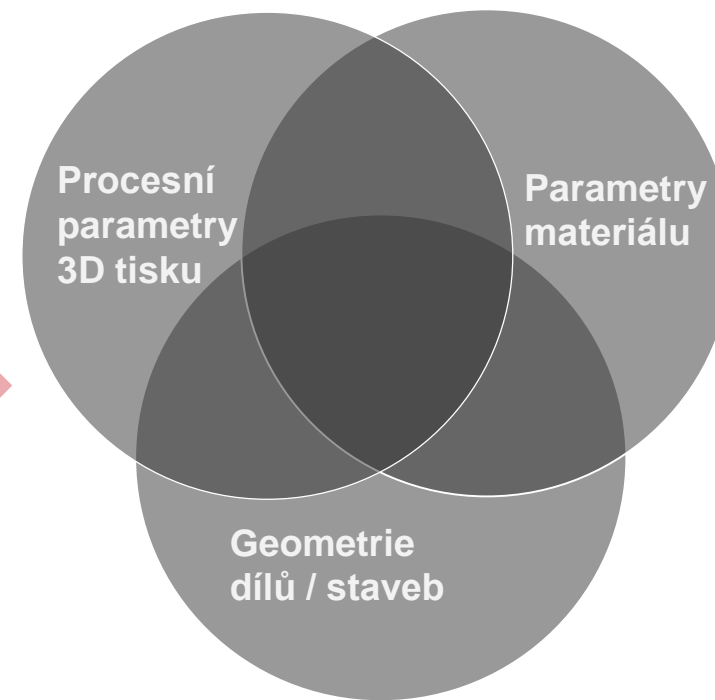
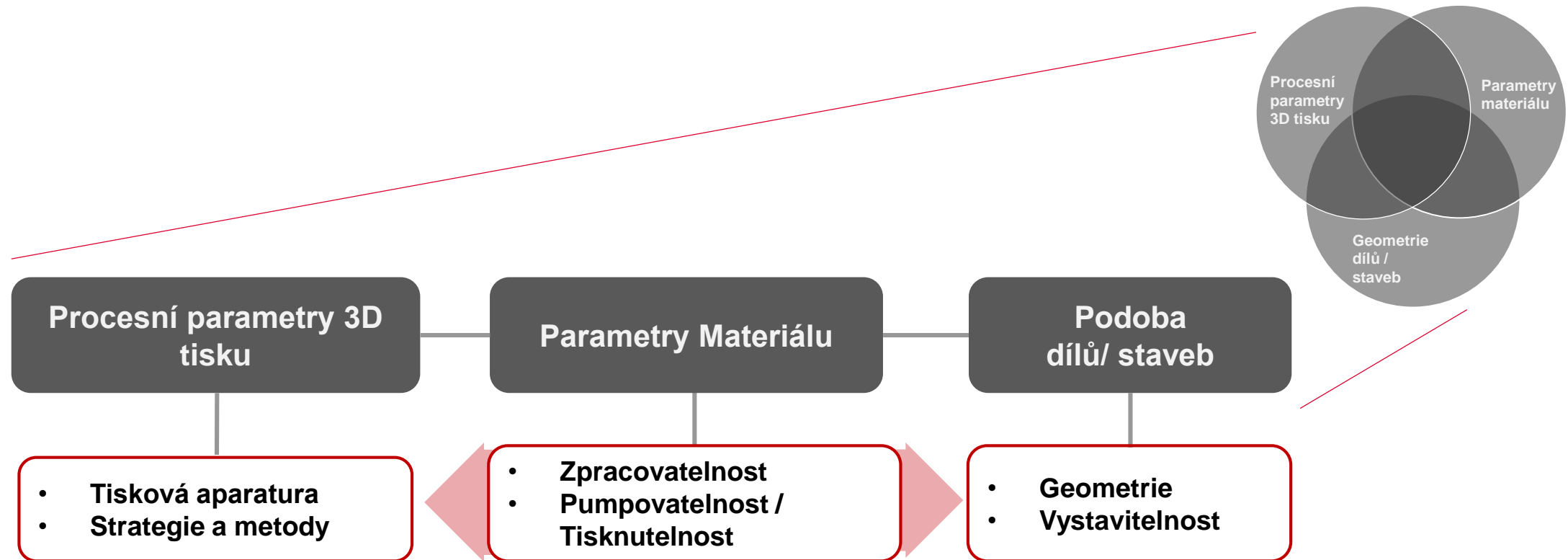


Schéma - 3D tisk struktury sloupu (ACADIA.com)



Shrnutí současného stavu poznání



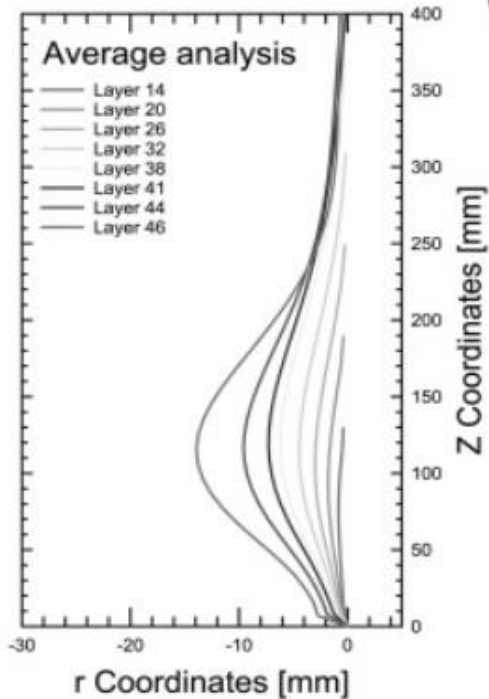
Shrnutí současného stavu poznání

2018

Khoshnevis, B. a kol. (2015)

Wolfs, R.J.M. a kol.

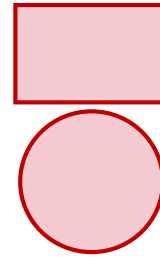
- Zpracovatelnost - Vicatova
- Mohr Coulomb kritérium
- Geometrie válce



2018

Roussel, N.

- Pumpovatelnost
- **Viskozita**
- Vliv průřezu trysky
- Metoda tisku CC
- Minimální poloměr



Printing requirement	Illustration	Input printing process parameters	Rheological requirement
Individual strength-based layer stability		Layer thickness h_0	Initial yield stress higher than $\rho g h_0$ (Cf. Fig. 3)
Collective strength-based layer stability		Total height H	Yield stress in the bottom layer must stay higher than $> \rho g H / \sqrt{3}$ (Cf. Fig. 3)
Individual layer geometry control		Layer thickness h_0	Initial shear elastic modulus higher than $\rho g h_0 / \gamma_{tol}$ where γ_{tol} is the tolerable deformation of the layer

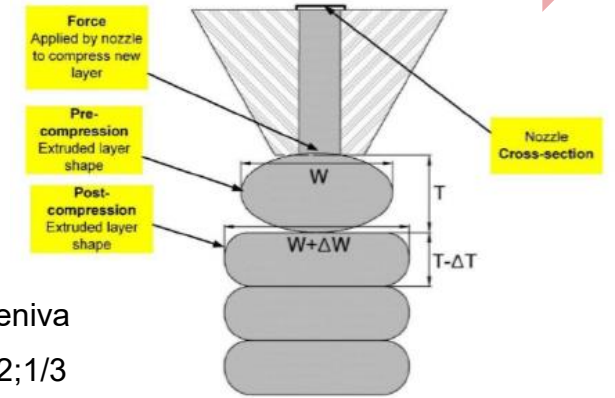
2019

Shakor, P. a kol.

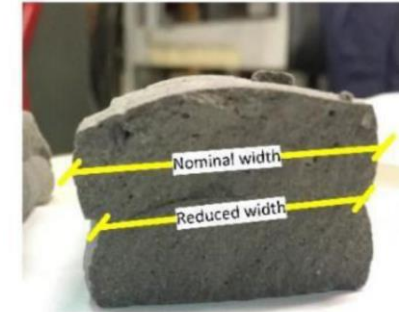
Nerella, B. a kol.

Panda, B. a kol.

- Sesedání
- Deformace tisku
- Větší frakce kameniva
- Rozměr trysky 1/2;1/3
- Možné ucpání



Printed circular shape



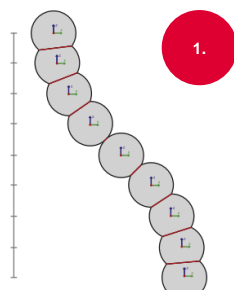
Printed rectangular shape

Shrnutí současného stavu poznání

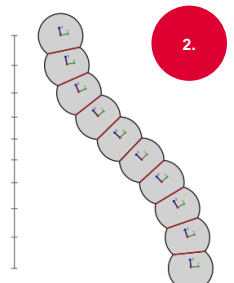
2016

Gosselin, C. a kol.

- Strategie tisku
- Tisková geometrie



Constant layer height



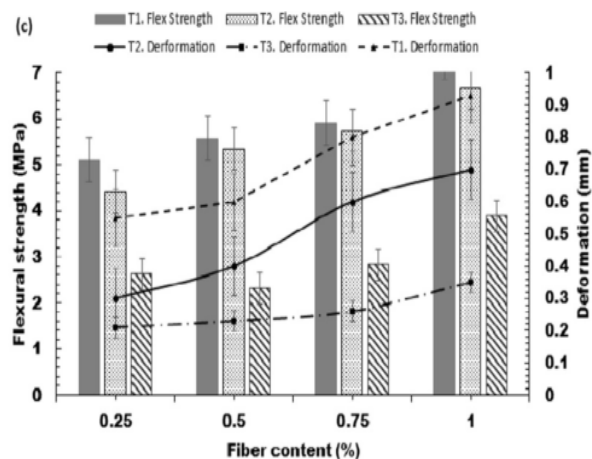
Constant contact surface

2017

Manuel, H. a kol.

Soltan, D.G. a kol.

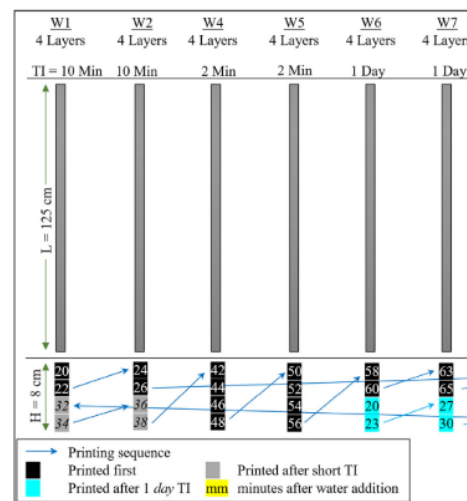
- Vyztužení vlákny
- Stabilita tvaru extruze
- Pumpovatelnost



2019

Nerella, V.N. a kol.

- Provázání vrstev v čase
- Strategie nánosů
- Destruktivní zkoušky

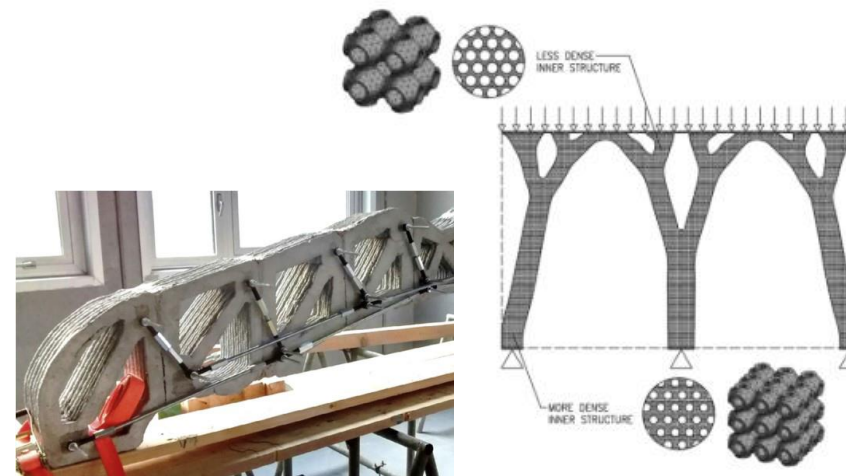


2018

Asprone, D. a kol.

Greene, G. W. a kol.

- Aplikace optimalizovaných dílů ve stavebnictví
- Kombinace tisku s výztuží
- Smysluplnost struktur



2019

Yarimitsu, S. K. a kol.

Podroužek, J. a kol.

G.D. Schutter a kol.

Analýza a zhodnocení poznatků

Bílá místa

- Používání směsí obsahujících větší frakci kameniva pro 3D tisk ve stavebnictví.
- Tisk komplexních a strukturovaných dílů s převislými stěnami.

Procesní parametry 3D tisku

- **Technologie FDM/PEM**
- **Metoda CC (Contour Crafting)**
- **Tečná strategie vrstvení**
- **Extruder pro zpracování větší frakce kameniva**
- **Obdélníková tryska 2:4**



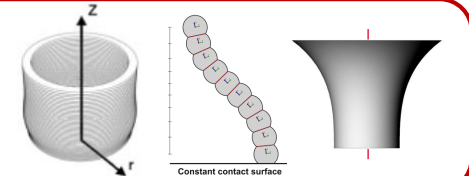
Parametry Materiálu

- **Viskozita**
(Pumpovatelnost)
- **Vicatova zkouška, geometrie nánosů**
(Zpracovatelnost)
- **Destruktivní žkoušky**
(Provázanost vrstev)



Podoba díků/ staveb

- **Válcová tělesa**
- **Stěny/ tělesa s převisem**
(Vystavitelnost)



Vymezení cílů disertační práce

Hlavní cíl DP

- Cílem disertační práce je při použití soudobé technologie výroby 3D tisku cementových materiálů vyvinout strategii a proces 3D tisku komplexních dílů.

Přínos disertační práce

- Rozšíření znalosti 3D tisku cementových materiálů o charakteristiku cementové směsi s větší frakcí kameniva.

Aplikační potenciál

- Odbourání bednění
- Úspora materiálu
- Tisk komplexních struktur s převislými stěnami

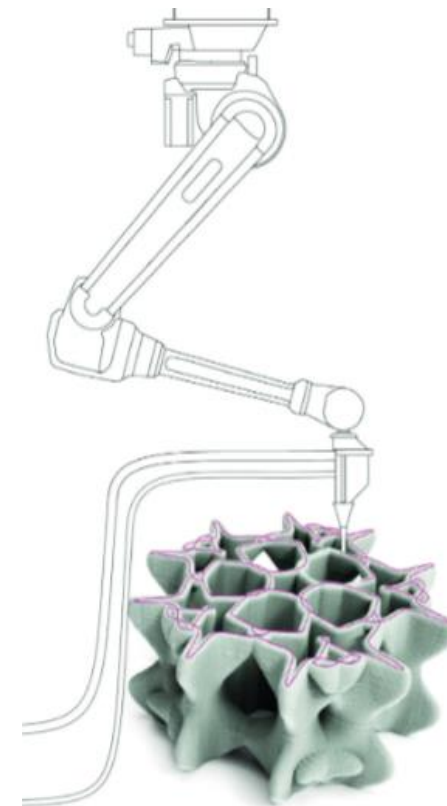


Schéma - 3D tisk struktury sloupu
(ACADIA.com)

Materiál a metody

Vývojový diagram:

Vstup:

- Informace o chování materiálu

I; II; III Fáze:

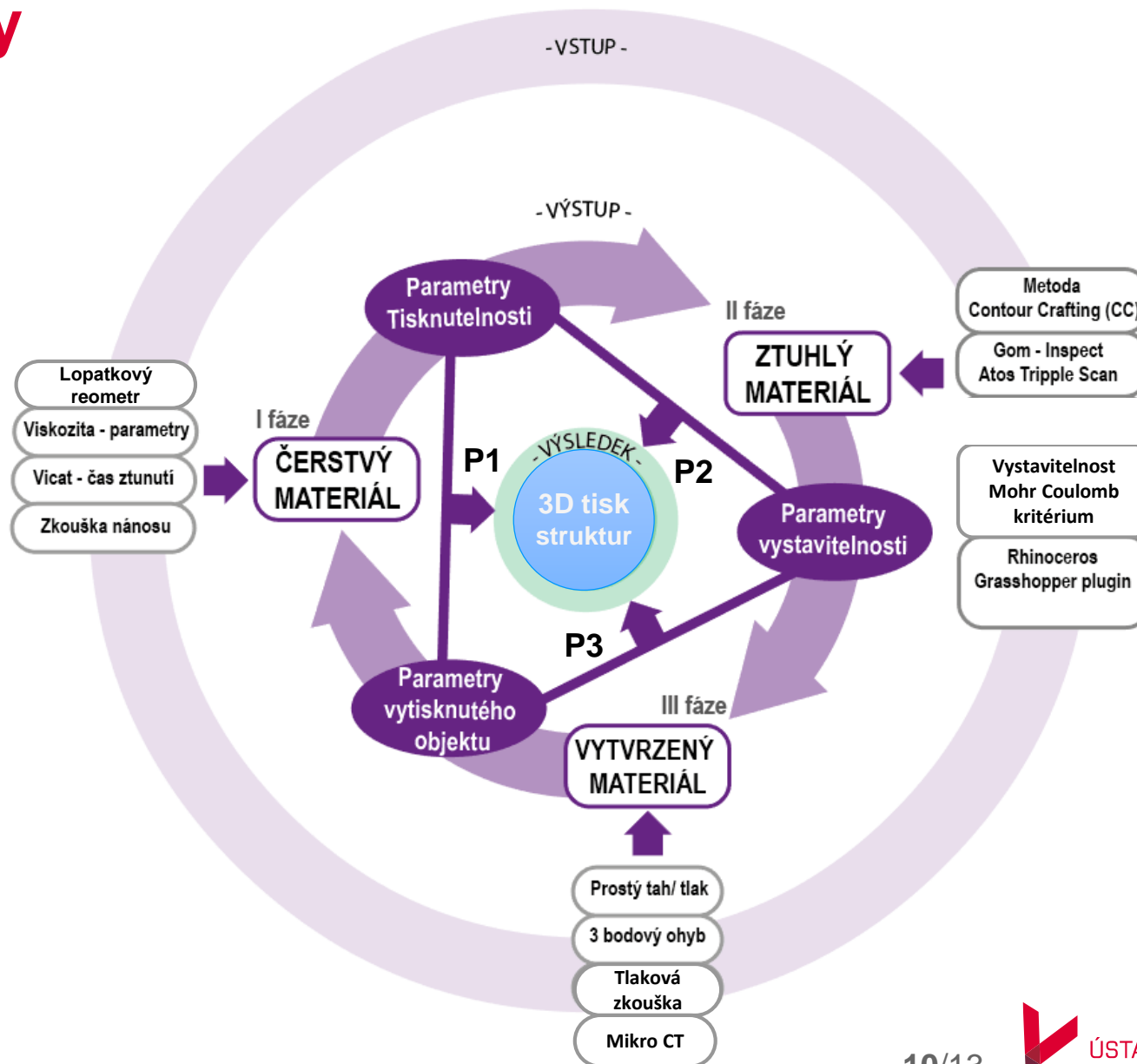
- Limity technologie

Výstup:

- Procesní parametry 3D tisku

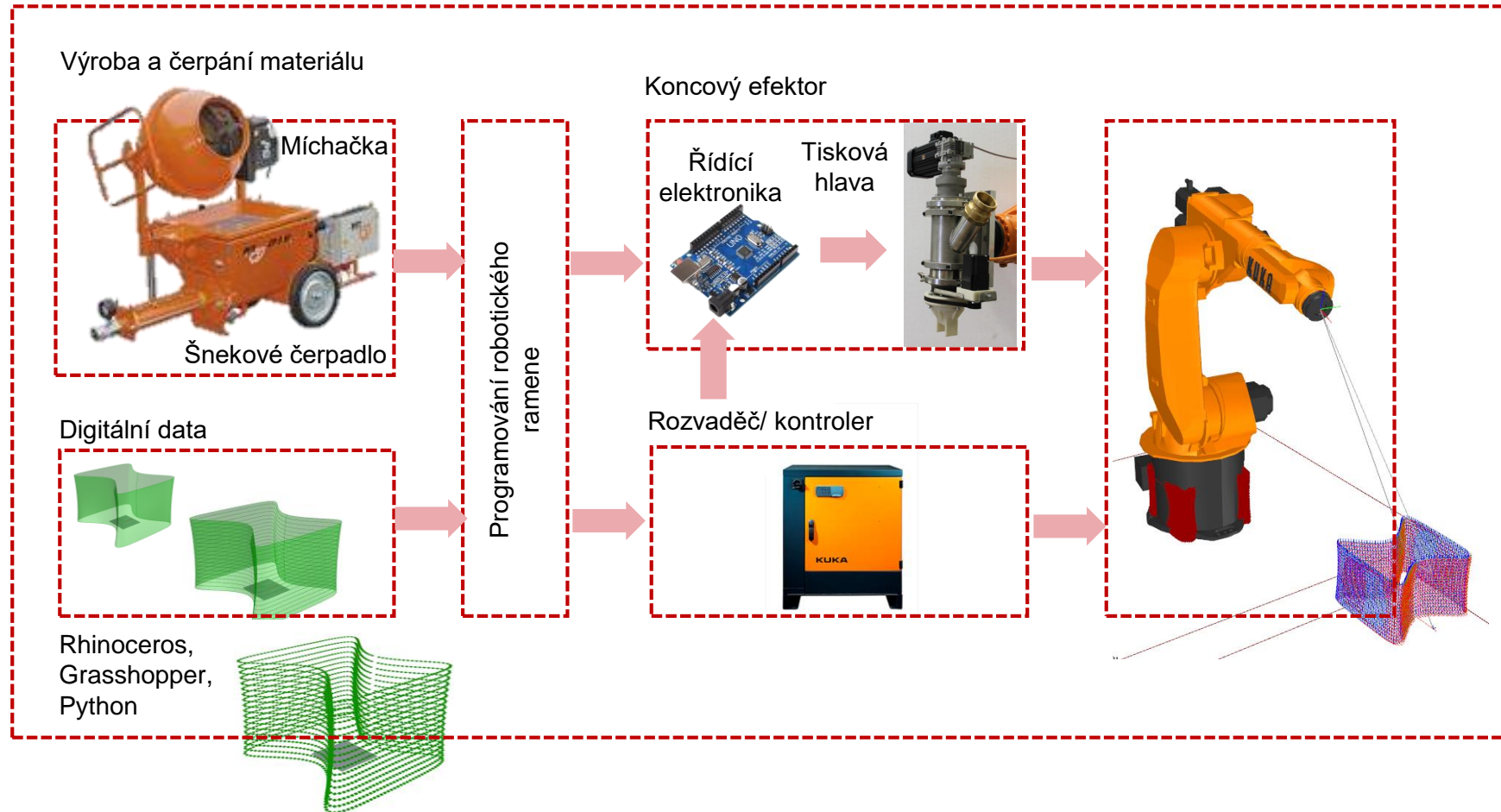
Výsledek:

- Parametry chování výtisku
- Publikace 1-3

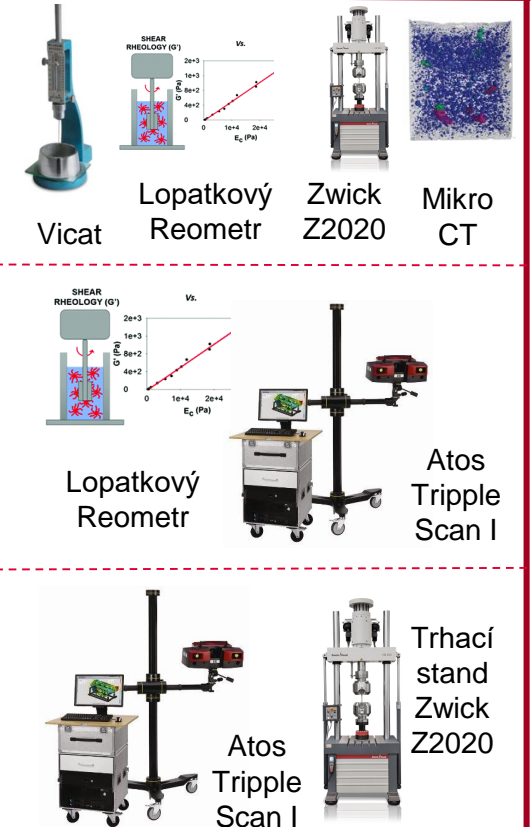


Způsob řešení a použité metody

Popis pracoviště a experimentální soustavy:



Laboratorní Aparatura





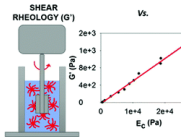

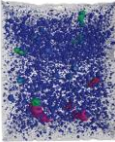

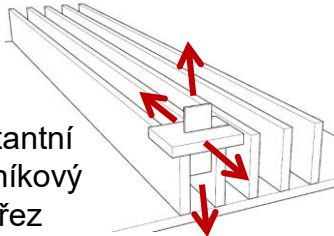
Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Vědecká otázka č.1

Jaký vliv má velikost frakce kameniva směsi, čerstvosti směsi a čas depozice na adhezi vrstev?

Pracovní hypotéza č.1:

- Větší frakce kameniva má za následek vyšší pevnost v tlaku betonu ve vytvrzené podobě. Jaký vliv má pro geometrickou stálost tiskové stopy a únosnost vrstev v čerstvém stavu. Velikost kameniva a čas depozice má vliv na provázanost vrstev.*

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
1.	<ul style="list-style-type: none"> Adheze vrstev Doba zpracovatelnosti směsi Viskozita (Pumpovatelnost/extrudovatelnost) 		 Vicat  Lopatkový Reometr  Zwick Z2020  Mikro CT	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">FW/ Extruze</div> <div style="writing-mode: vertical-rl; transform: rotate(180deg);">Pasivní</div> </div>   <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky Forma</p>

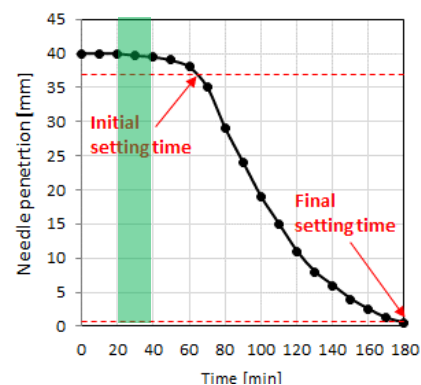
Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Odpověď na Vědeckou otázku Vo.1:

- Ideální časové okno od smísení s vodou je 20 + 5; 10; 15 min

Proběhlé Experimenty:

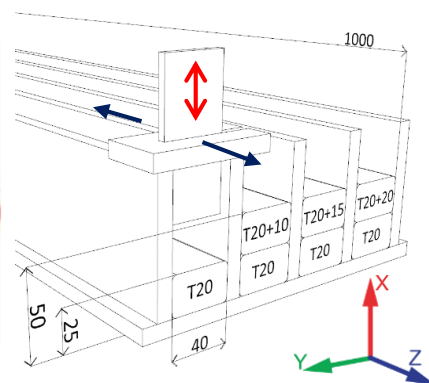
- Vicatova zkouška
- Zkouška nánosů
- Formování vzorků
- Adheze vrstev – Prostý tah



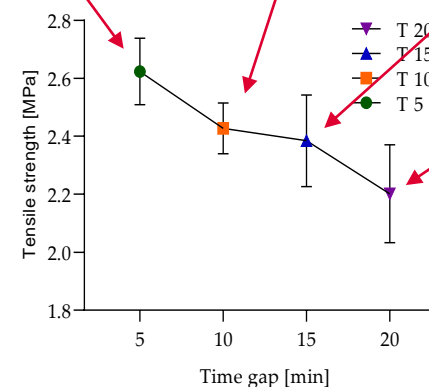
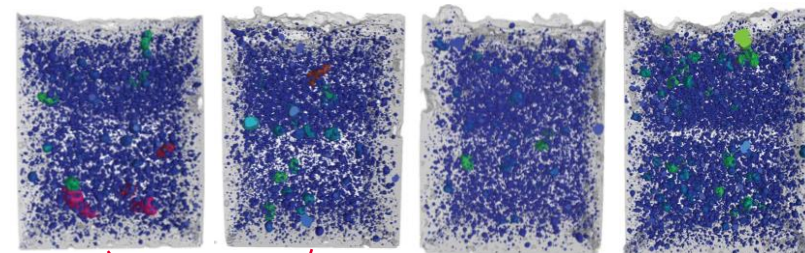
Vicatova zkouška



Zkouška nánosů



Formování vzorků



Prostý tah

Publikace:

Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of Hardened Concrete Mixture with Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. *Materials*, 2020, roč. 13, č. __, s. __-__. ISSN: ____-

Manuskript byl po prvním kole recenzního řízení přijat v časopise *Materials*, IF-3 (2019); (Q2)


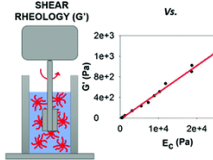


Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Vědecká otázka č.2

Jaký vliv má rychlost tisku a působení tlaku extruze cementového kompozitu při použití trysky o obdélníkovém průřezu v poměru stran 2:4 na stabilitu tisku geometrických těles?

Pracovní hypotéza č.2

Jmenovitě stabilitu tisku ovlivňuje chování materiálu během extruze (čerstvost), rychlost pojezdu, a tvar tisknuté geometrie.

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
2.	<ul style="list-style-type: none"> Vystavitelnost: Mohr-Coloumbovo kritérium charakteristika tisknutého materiálu Tvarová stálost extruze Minimální rádius 		 <p>Lopatkový Reometr</p>  <p>Atos Tripple Scan I</p>	<p>Metoda CC</p> <p>Aktivní</p>  <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>

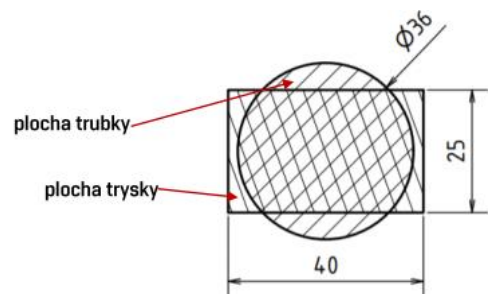
Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Odpověď na Vědeckou otázku Vo. 2:

- Proběhlé iniciační experimenty tisku válcových těles

Tisková aparatura:

- Mechanika pro větší frakci kameniva
 - Čerpadlo
 - Šnekový extruder
 - Tryska pro větší frakci kameniva



Velikost trysky pro kamenivo 8mm



Iniciační testy



Průběh tisku – optimalizace synchronizace

Rozpracované publikace s pracovním názvem:

Behavior of 3D printing of reinforced walls at an angle with a concrete mixture includes coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm.

Časopis *Materials*, IF-3 (2019); (Q2)

SDZ 2020

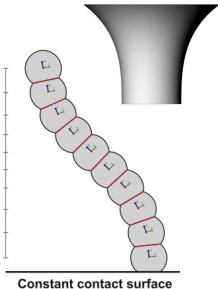



Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Vědecká otázka č.3

Jakým vhodným typem výztuže lze zlepšit mechanické vlastnosti čerstvého cementového kompozitu v procesu 3D tisku tak, aby došlo ke stabilizaci tvaru extrudované hmoty a umožnilo tisk převislých prvků komplexních struktur?

Pracovní hypotéza č.3

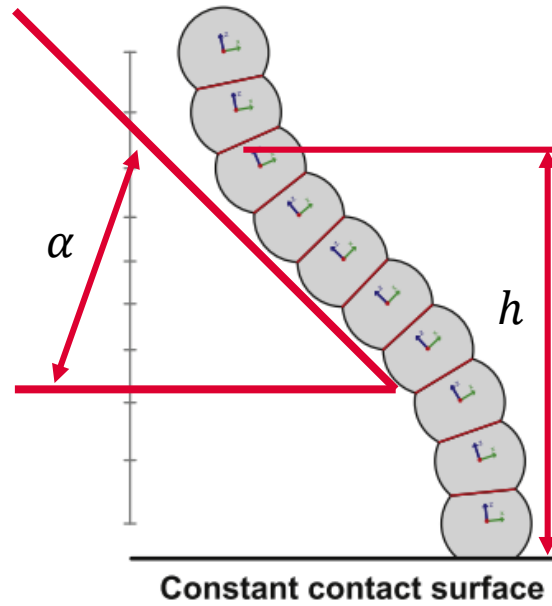
Při použití vhodného typu výztuže bude chování tisknuté stopy stabilní i při tisku převisů u složitějších dílů.

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
3.	<ul style="list-style-type: none">Stabilizace tvaru tisku – tisk převisů a složitějších tělesVýztuha vláknny	 <p>Constant contact surface</p>	 <p>Atos Tripple Scan I</p>  <p>Trhací stand Zwick Z2020</p>	<p>Metoda CC</p> <p>Aktivní</p>  <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>

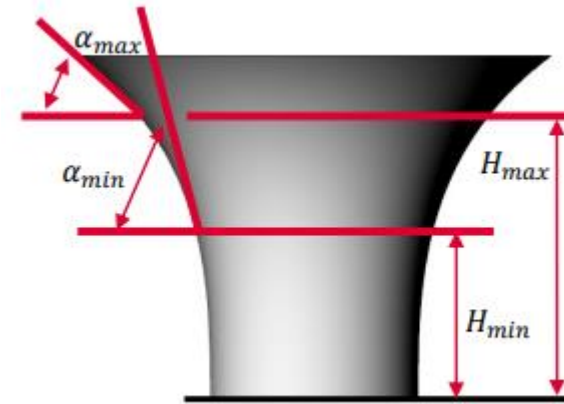
Vědecké otázky a pracovní hypotézy

Odpověď na Vědeckou otázku Vo.3:

- Tisk jednoduchých stěn s převisem
- Tisk rotačního tělesa
- Destruktivní zkouška tlakem
- Validace s literaturou



konstantní výška vrstvy, tečné vrstvení




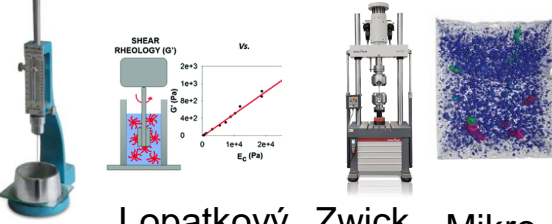
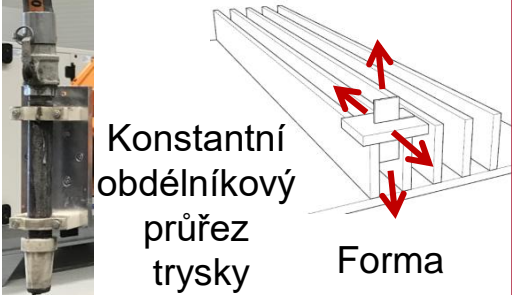

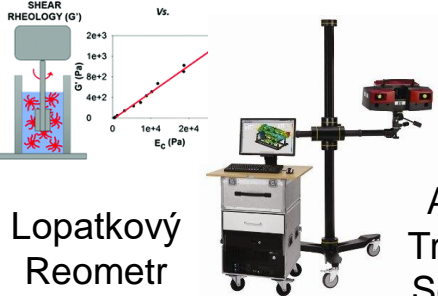

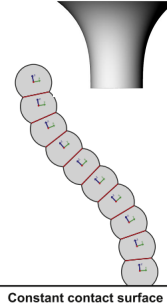

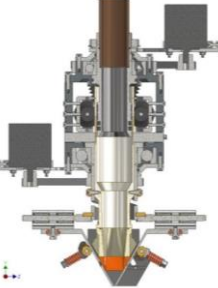
Těleso rotační hyperboloid

Rozpracované publikace s pracovním názvem:

3D printed complex geometries with a concrete mixture includes coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm.

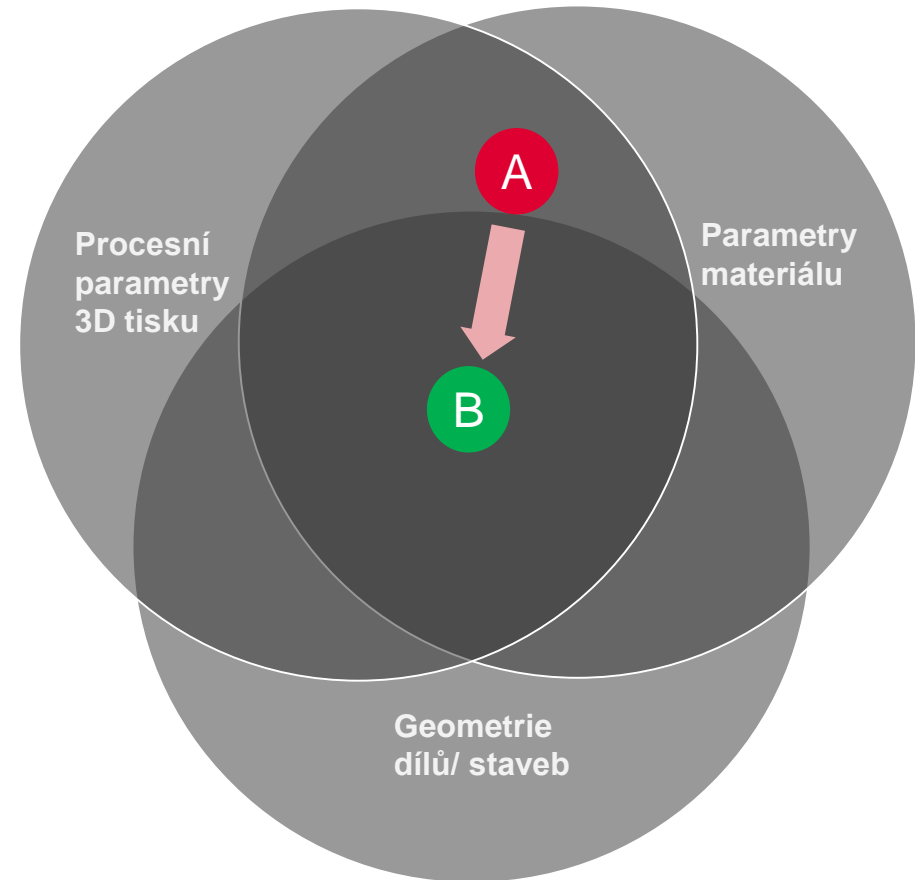
Construction and building materials -Concrete 3D Printing and Digitally-Aided Fabrication (IF = 3,169 pro rok 2018)

Způsob řešení a použité metody

Vo	Zkoumané parametry	Tělesa	Laboratorní Aparatura	Tisková Aparatura
1.	<ul style="list-style-type: none"> Adheze vrstev Doba zpracovatelnosti směsi Viskozita (Pumpovatelnost/extrudovatelnost) 	σ t η 	 <p>Vicat Lopatkový Reometr Zwick Z2020 Mikro CT</p>	<p>FW/ Extruze</p> <p>Pasivní</p>  <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky Forma</p>
2.	<ul style="list-style-type: none"> Vystavitelnost: Mohr-Coulombovo kritérium charakteristika tisknutého materiálu, Tvarová stálost extruze 	$v; h; Rt$ $G_{trys.} = G_{stopy}$ 	 <p>Lopatkový Reometr Atos Tripple Scan I</p>	<p>Metoda CC</p> <p>Aktivní</p>  <p>Konstantní obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>
3.	<ul style="list-style-type: none"> Stabilizace tvaru tisku – tisk převisů a složitějších těles Výztuhy – plastová vlákna 	$h; \alpha; \sigma$  <p>Constant contact surface</p>	 <p>Atos Tripple Scan I Trhací stand Zwick Z2020</p>	 <p>Nastavitelný obdélníkový průřez trysky s aktivní rotací</p>

Současný stav řešení

- ✓ Návrh a výroba experimentálních zařízení
- Zodpovězení Vo 1 – 60%
- Zodpovězení Vo 2 – 20%
- Zodpovězení Vo 3 – 0%
- Analýza, interpretace a publikace výsledků – 40%



Závěr

V rámci příprav na experimenty vznikly tyto zařízení:

- Pístová hlava (2017)
- Aktivní tisková hlava se šnekovým extruderem ver. I. (2018)
- Zkušební stand využívající tiskovou hlavu ver. I. (2018/ 2019)
- **Aktivní tisková hlava se šnekovým extruderem a s mechanismem natáčení trysky (2019/ 2020)**
- Pasivní tisková hlava s mechanismem otáčení a mechanismem změny průřezu trysky (2019/ 2020)

Publikační činnost:

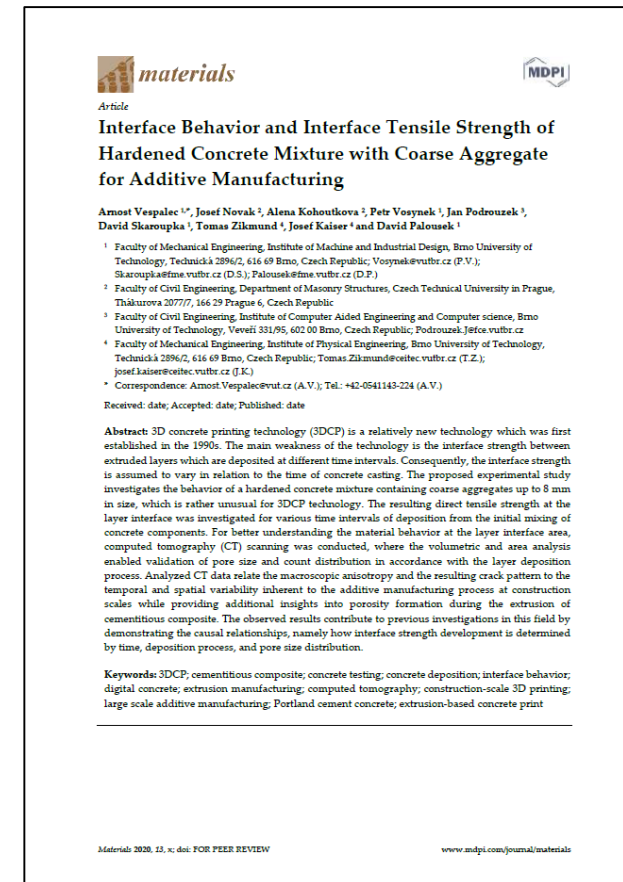
- *Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Škaroupka, D.; Paloušek, D. Interface Tensile Strength of Concrete Mixture for Additive Manufacturing. ICMD, 2019.*
- *Vespalec, A.; Novák, J.; Kohoutková, A.; Vosynek, P.; Podroužek, J.; Škaroupka, D.; Zikmund, T.; Kaiser, J.; Paloušek, D. Interface Behavior and Interface Tensile Strength of Hardened Concrete Mixture with Coarse Aggregate for Additive Manufacturing. Materials, 2020, roč. 13, č.YY, s. X-XX. ISSN: XXXX-XXXX.*

Přijat – časopis Materials (Special issue: „Concrete 3D Printing and Digitally – Aided Fabrication“) – IF 3 (2019); (Q2)

Plánované publikace (pracovní názvy):

- Behavior of reinforced 3D printed wall at an angle with a concrete mixture includes crushed coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm. (časopis!!!)
- 3D printed complex geometry with a concrete mixture includes crushed coarse aggregate with a maximum nominal size up to 8mm.

Construction and building materials -Concrete 3D Printing and Digitally-Aided Fabrication (IF = 3,169 pro rok 2018)



ZÁVĚR

Práce v rámci Ph.D. studia :

Participace na projektech:

- TAČR (TH03010172) - Výzkum a vývoj 3D tiskárny pro použití ve stavebnictví
- Specifický výzkum - Výzkum mechanických a fyzikálních vlastností strukturovaného materiálu připravovaného pomocí aditivní výroby.
- FV 18-38 – Inovace výuky předmětu Rapid Prototyping a 3D digitalizace [YRP]
- FV 19-36 – Inovace výuky předmětu Plastové Prototypy [ZPP] o návaznost výrobních postupů

Vzdělávací činnost:

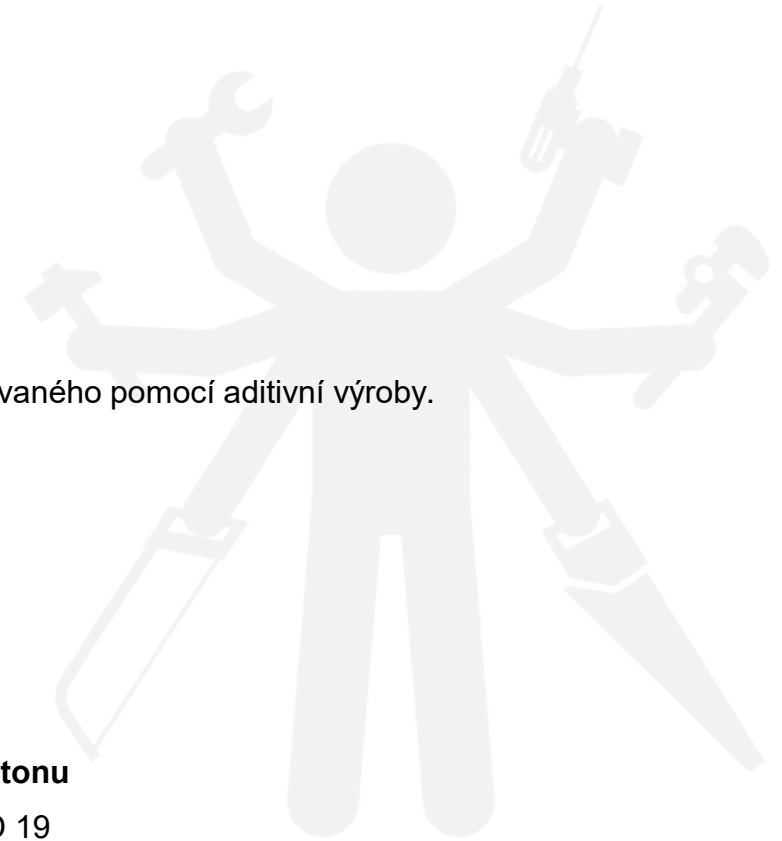
- Výuka: 9 předmětů (odučeno **508 h**) [ZPP; ZK; 2K; 4KC; 3CD; YA1; YPA; YRP; ZM1]
- Výukové podklady: 4 předměty [ZPP; YA1; YRP; ZM1]

Tvůrčí aktivity:

- **Průmyslový vzor – Tryska tiskové hlavy s nastavitelným obdélníkovým průřezem pro 3D tisk betonu**
- Funkční vzorek – Obličejová polomaska realizovaná pomocí termoformingu – aktivity spojené s COVID 19
- RUV výstupy: Adwitech WSM 2 – tenzometr / **Automatic trimmer XL – I gen.** / Automatic trimmer – II gen.
- Návrh a realizace interiérový design studentského strojlabu - učebna 105
- Spoluúčast na přípravě 3D tisku prostorových struktur pro Design EXPO 2020

Ocenění za design:

- Celosvětové ocenění - A Design Award 2020 (**Iron Trophy**) – **Automatic Trimmer XL – I gen.**





DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Arnošt Vespalec, Ing.

Arnost.Vespalec@vut.cz



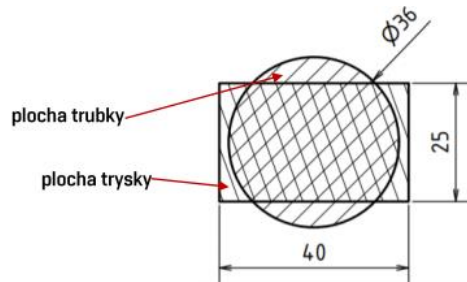
ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.ustavkonstruovani.cz

Otázky oponenta

Jaké jsou rozměry a geometrie těles?

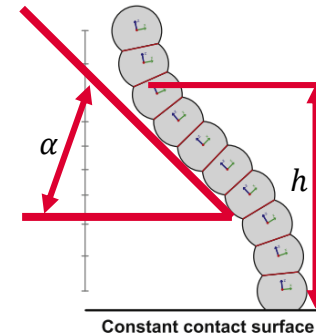
- Minimální rozměry a geometrie těles se odvíjí od chování směsi při tisku pro zvolenou metodu – velkou roli hraje měřítkový efekt.
- Pro metodu Contour Crafting (CC), šířka a minimální poloměr tisknuté geometrie vychází z průřezu trysky. Ten je odvozen od maximální velikosti kameniva ve směsi, kde minimální rozměr by měl být v poměru 1/3 a 2/3
- Rozměry geometrie a jejich podoba je stále otevřenou otázkou na poli 3D tisku betonu.



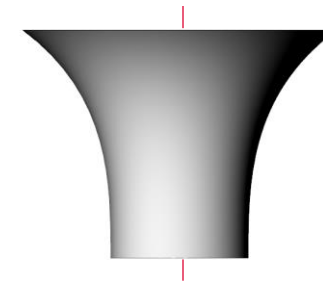
Velikost trysky pro materiál s kamenivem 8mm



Velikost trysky pro materiál s kamenivem 8mm



konstantní výška vrstvy, tečné vrstvení



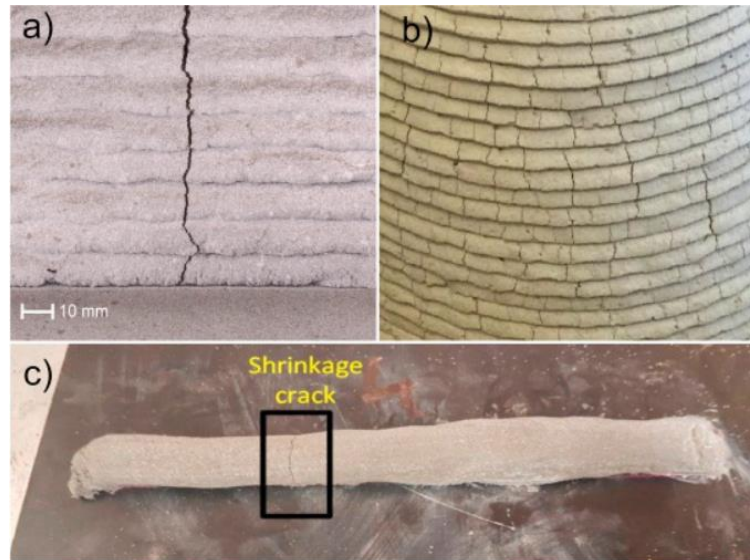
Rotační těleso s převisem

Otázky oponenta

Výzkum níže zmíněných otázek je nad rámec práce, ale jsou to věcné podněty pro další výzkumné práce.

Budete zkoumat i odolnost proti šíření trhlin?

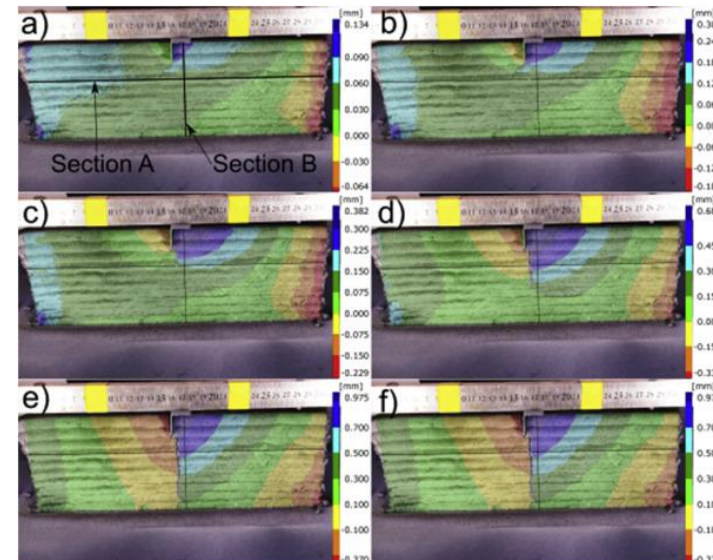
- Sledování šíření plastických trhlin u vytištěných vzorků.
- Sledování Trhlin během procesu vytvrzování
- Přidáním výztuže v podobě vláken bude zvýšena tvarová stabilita tisknuté směsi v čerstvém stavu
- Plastová vlákna sníží výskyt plastických trhlin a tvorbu trhlin v důsledku smrštění při tvrdnutí.



Šíření trhlin v laboratorních podmínkách: (a) Mírná rychlost odpařování 2h, (b) trhliny do 12h, (c) po 24h. (Gerrit, M. a kol.)



DIC - aparatura (Helan, T.)



DIC - Digital image correlation (Gerrit, M. a kol.)

Otázky oponenta

Výzkum otázek je nad rámec práce, ale jsou to věcné podněty pro výzkumné práce.

Budete sledovat odezvu na cyklické namáhání?

Potenciál:

- Sledování chování v různých orientacích
 - Pouze u betonu
-
- Sledování chování v různých orientacích
 - Pouze u betonu

Anizotropické chování zkušebních těles: (a) Zatížení v tlaku,
(b) Tříbodový ohyb
(Guowei, M. a kol.)

Otázky oponenta

Výzkum níže zmíněných otázek je nad rámec práce, ale jsou to věcné podněty pro výzkumné práce.

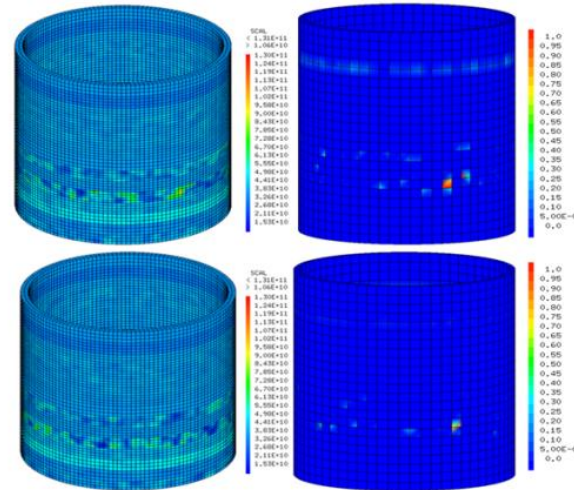
- Zajímáte se o náhodilost pevnosti?
- *Chystáte se kvantifikovat houževnatost nebo vliv prostorové variability pevnosti?*

Náhodilost pevnosti betonu je i obecně otevřenou otázkou

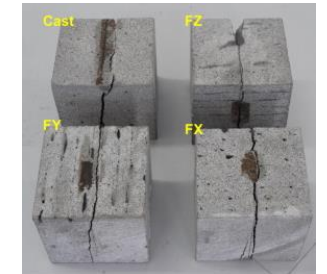
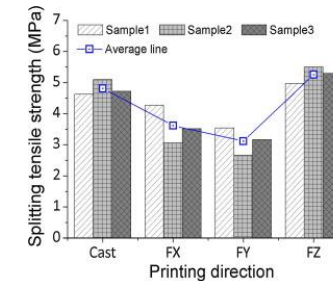
- Heterogenita betonu
- Měřítkový efekt
- FEM
- Nehomogenní tloušťka a výška nánosu
- Vruby způsobené vrstvením
- Velký objem statistických vzorků

Prostorová Variabilita

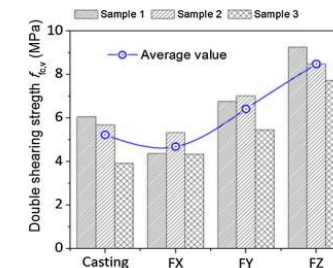
- Heterogenita betonu
- Měřítkový efekt
- FEM
- Nehomogenní tloušťka a výška nánosu
- Vruby způsobené vrstvením
- Velký objem statistických vzorků



SFE metoda – prostorová variabilita pevnosti v tahu (Sellier, a kol.)



(a)



(b)

Anizotropické chování zkušebních těles: (a) Zatížení v tlaku, (b) Tříbodový ohyb (Guowei, M. a kol.)