# PROCESNÍ PARAMETRY VELKOROZMĚROVÉHO ROBOTICKÉHO 3D TISKU KOMPOZITNÍHO CEMENTOVÉHO MATERIÁLU

**Arnošt Vespalec**, Ing.

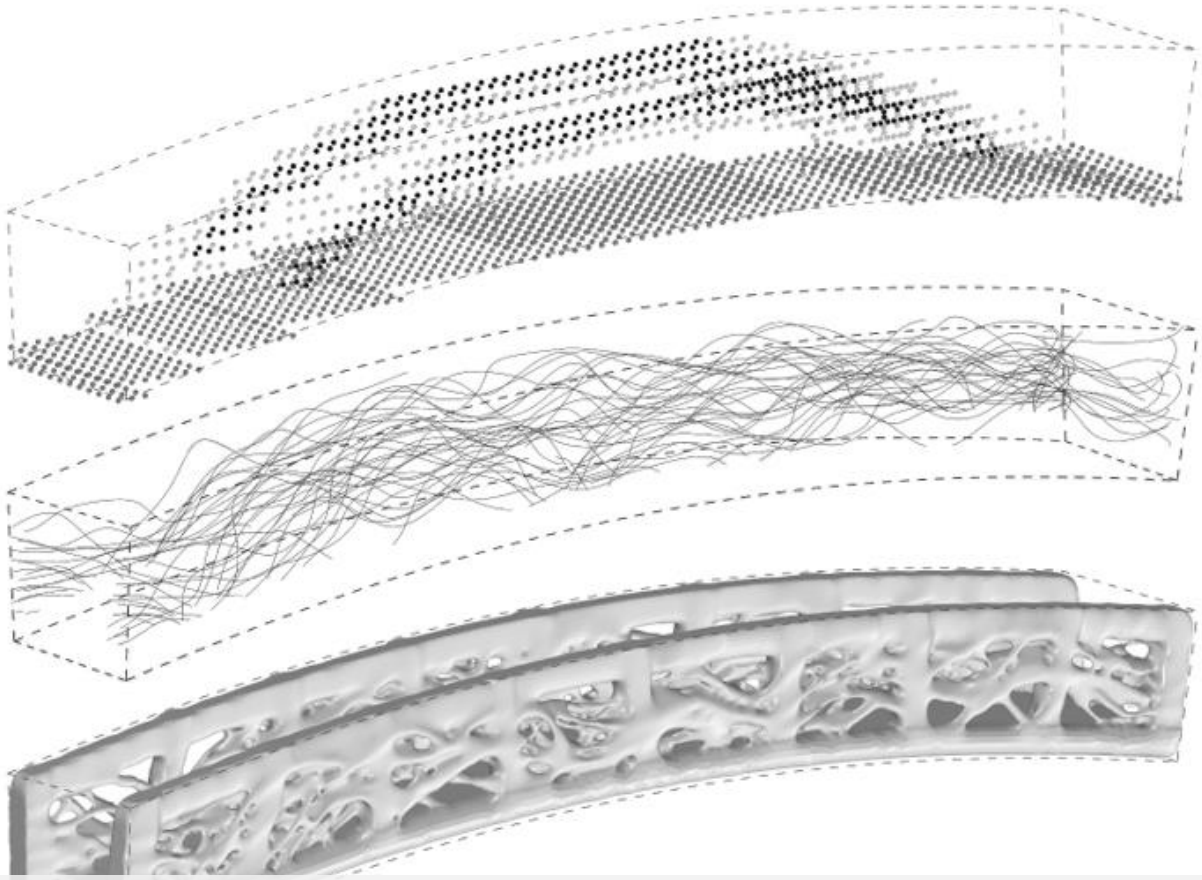
ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
Fakulta strojního inženýrství
VUT v Brně

BRNO, 12.06.2018

ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

# OBSAH

- MOTIVACE PRÁCE
- SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ
- ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ
- VĚDECKÉ OTÁZKA
- CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE
- METODY PRÁCE
- ČASOVÝ ROZVRH PRÁCE



Vytištěný most technologií 3D tisku
*(iaac.net)*

# MOTIVACE PRÁCE

- Robotická výroba + aditivní technologie
  + metody a strategie 3D tisku
- Nárůst odpadních nerecyklovaných hmot ve stavebnictví při bourání starých staveb
- Snížení emisí $CO_2$ a dopadu na životní prostředí
- Potřeba  lehkých a pevných dílů o velkých rozměrech ve stavebnictví a architektuře
- Málo probádaná oblast 3D tisku kompozitních cementových směsí plněných betonovým recyklátem
- Výzva 3DTCM složitých dílů z vyztužených cementových směsí

Samonosná nevyztužená konstrukce stropnice
*(eth.com)*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

**3D tisk betonu ve stavebnictví**

- **FDM** – Fused deposit moulding
- **CC** – Countour Crafting

- 3DPDT
- Spatial 3DP

Tisk metodou FDM robotickým ramenem KUKA
*(IAAC, Institute for advancet Architecture Catalonia [online])*

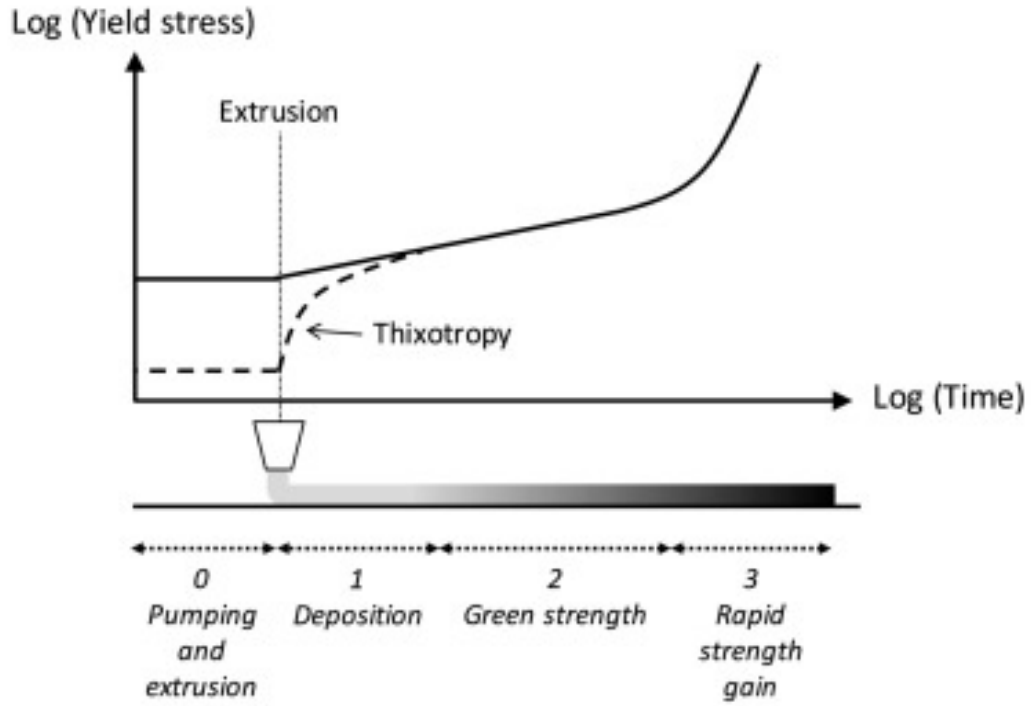
# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

**MATERIÁL- užívané materiály pro technologii 3DCP**

- Biobetony
- Betony s aditivní výztuží (chemikálie, minerály)
- Keramika
- Různé druhy pryskyřic
- Různé druhy jílovité hmoty

**Složení cementové směsi**

- Portlandský cement
- Křemičitý písek (o různé velikosti písečných zrn)
- Hrubá frakce kameniva
- Voda
- Superplastifikátory ( na polymerní bázi)
- Zpomalovače a urychlovače tuhnutí a tvrdnutí

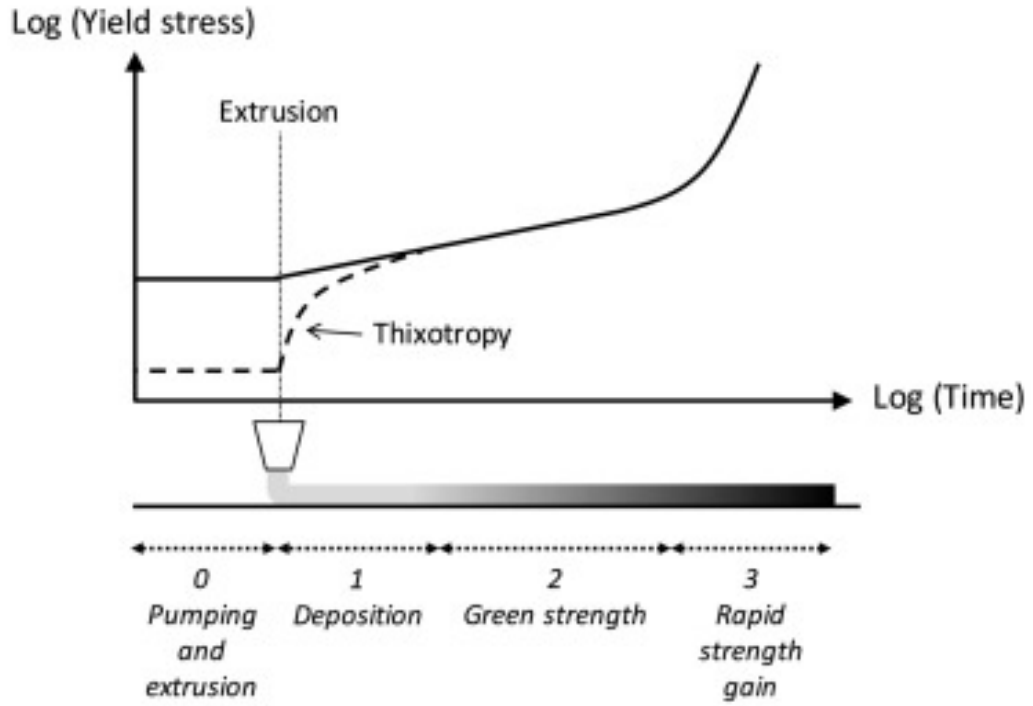



Fáze tvrdnutí čerstvé cementové směsi
*(Delphine, MARCHON, ScienceDIrect [online])*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

**MATERIÁL- procesní parametry směsi**

- **0, vysoká tekutost, stabilita směsi**
- **1, rapidní nárůst pevnosti struktury**
  - hmota zachovává geometrii pod svoji tíhou
- **2, Okno, během kterého působí zpomalovače**
  - Tato část dovoluje nános další vrstvy
- **3, Tvrdnutí betonu**
  - Nedochází k přilnutí další nanesené vrstvy
  - Úbytek hmotnosti ( minimalizace tvroby trhlin)

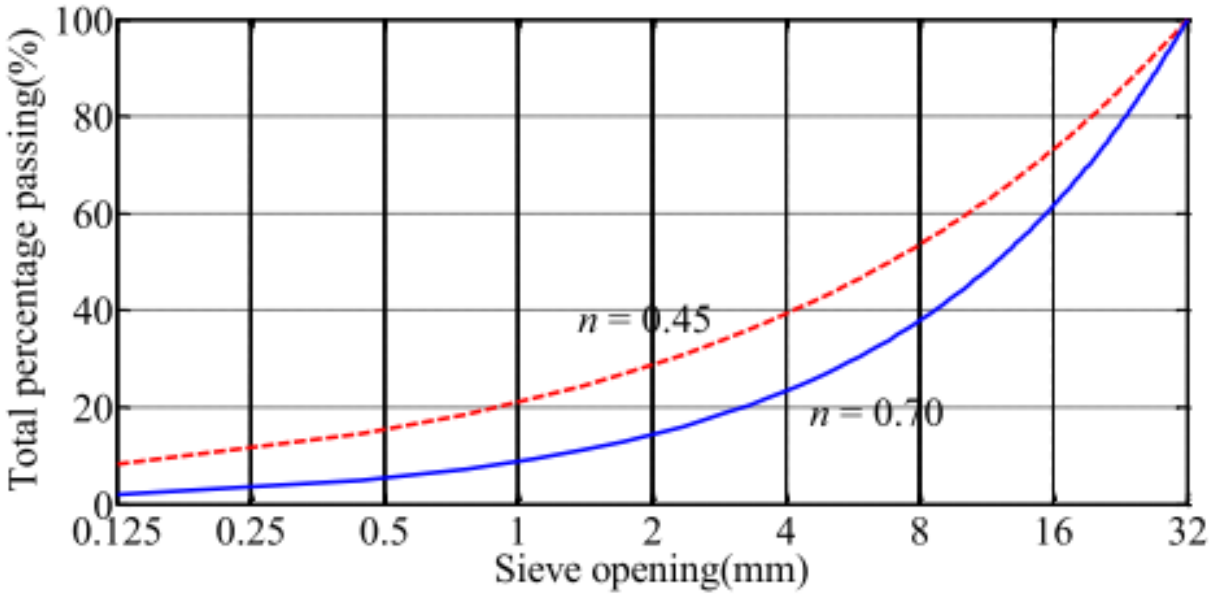


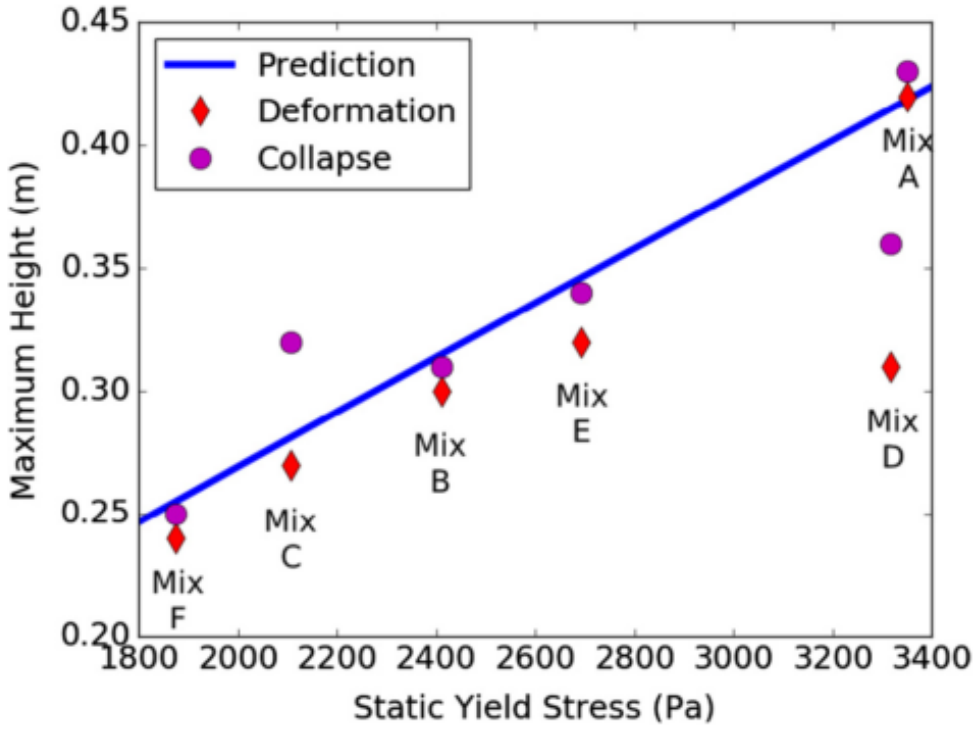

Fáze tvrdnutí čerstvé cementové směsi
*(Delphine, MARCHON, ScienceDIrect [online])*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

**MATERIÁL- úprava směsi pro technologii 3DCP**

- Fuller-Thompsonova teorie



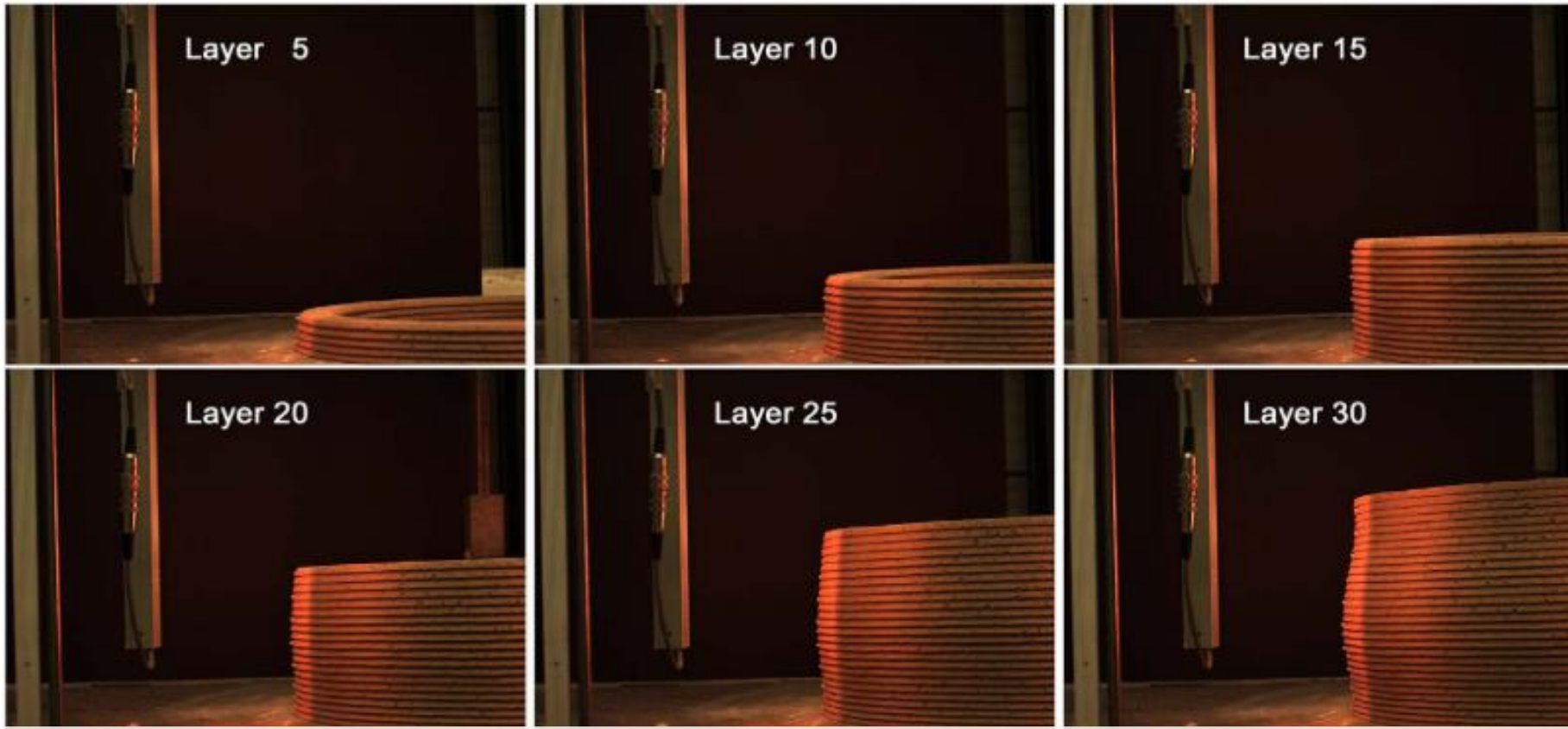

Fuller-Thompsonova teorie
*(ZHANG, Zihua, Xiaogang SONG, Yan LIU, Di WU a Chongmin SONG)*

Závislost tlakové síly a výšky při 3D tisku- *(WENG, Yiwei, Mingyang LI, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN)*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ

- Nežádoucí deformace
- Únosnost
- Maximální výška tisku
- Malá pevnost ve smyku a tahu

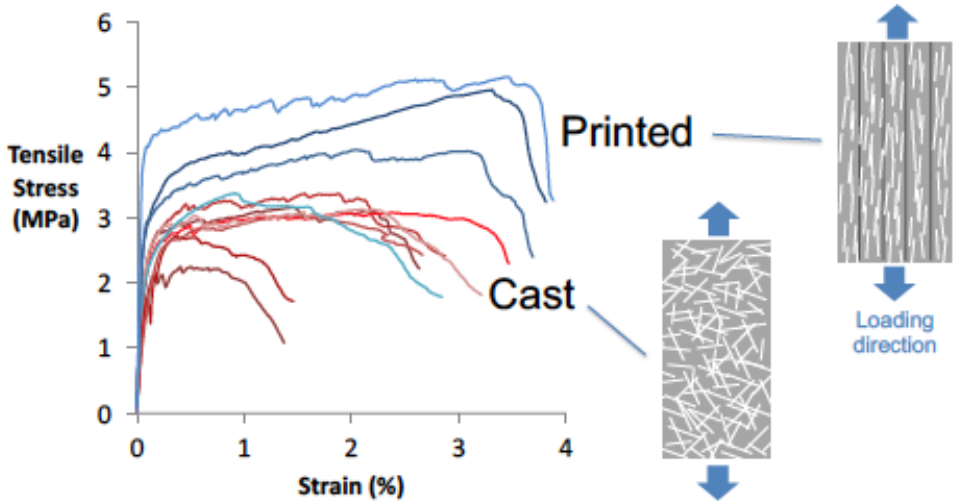



Deformace během procesu 3D tisku
*(University of Barcelona, [online])*

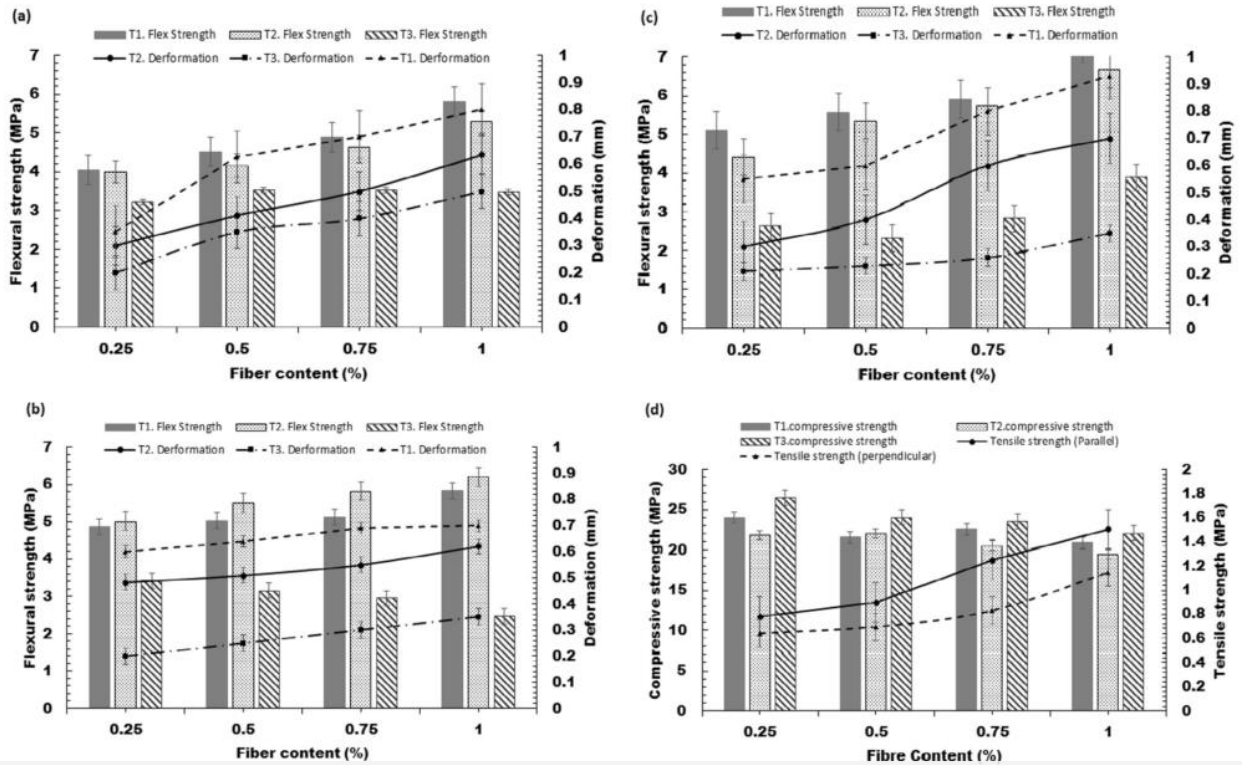
# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ

- Aditivy (Chemikálie, pryskyřice)
- Vlákny, polymery, tvarovými prvky




Vytištěný a nevytištěný beton z ECC
*(http://gyges3d.com [online])*




Závislost pevnosti v tahu a tlaku - cementová směs vyztužená různými velikostmi a % zastoupením skelných vláken
*(PANDA, Biranchi, Suvash CANDRA PAUL a Ming JAN TAN; Materials Letters [online])*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ

Vyztužení ocelovými vlákny
*(Behaviour of different types of fibre reinforced conc…[online])*

# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ – Vnější konstruce

- Vnější ocelová výztuž v podobě vnější pevné konstrukce (2,5D)

Vnější aktivní výztuhy
*(Domenico; Construction and Building Materials [online])*

Vnější ocelová výztuž
*(3dprintingindustry.com[online])*

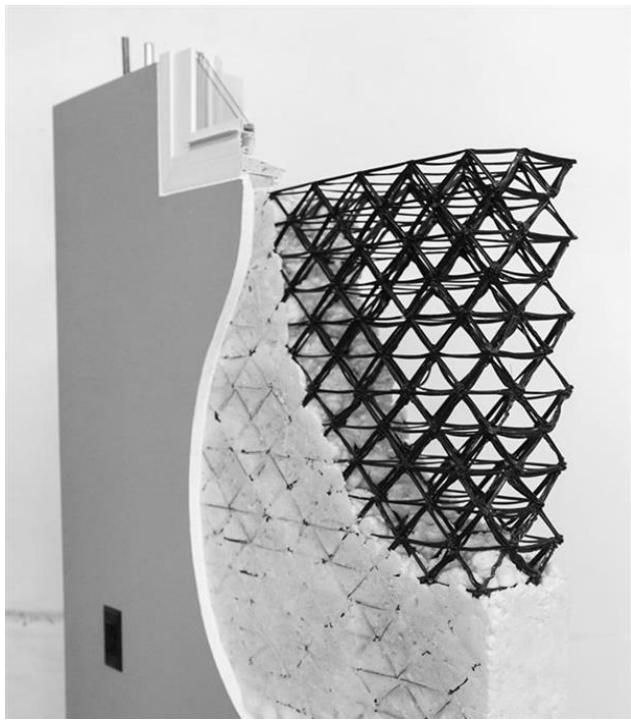
# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ - Armatury

- Roboticky implantovaná a svařovaná armatura z oceli (generativní design)

Robotická fabrikace ocelové armatury
*(3dprintingindustry.com[online])*

Plnění svařované armatury ČCS
*(Robohub.org[online])*

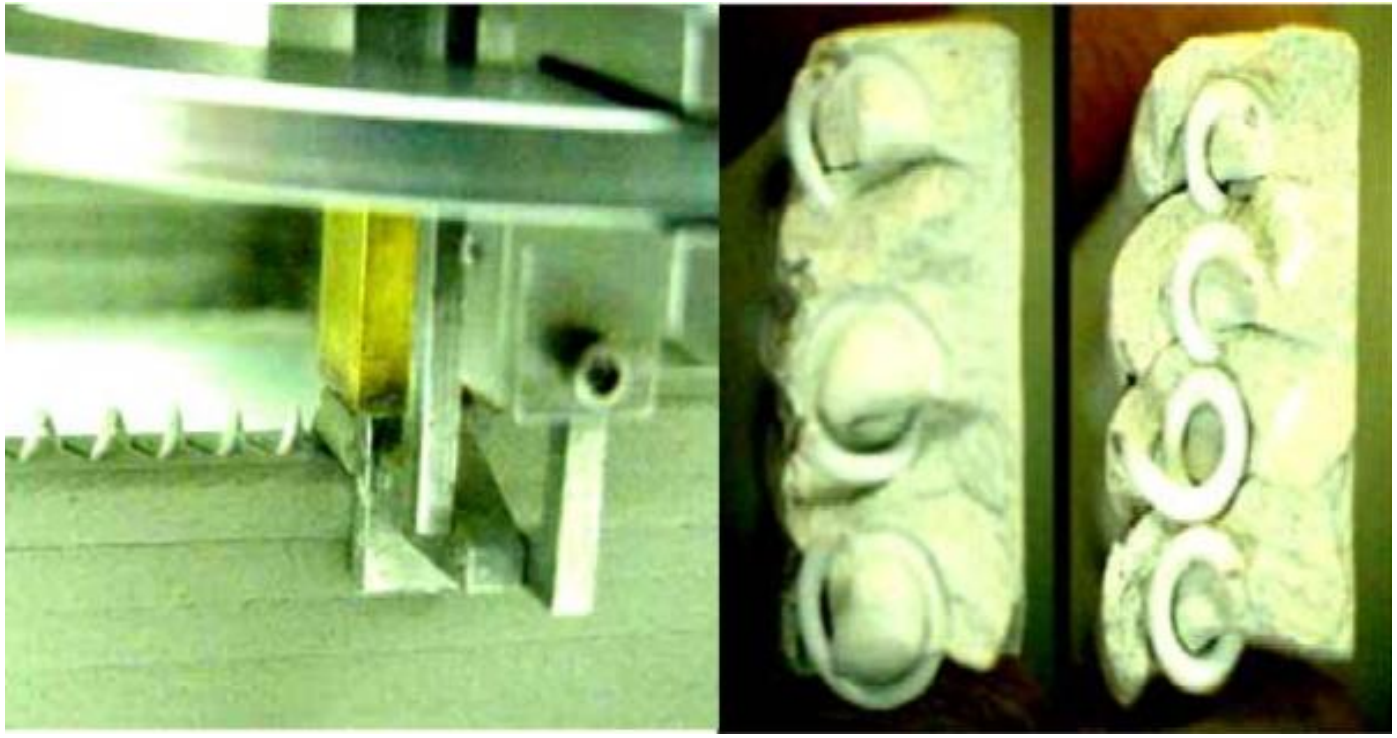


Výztuž z PLA
*(3ddevice.com.ua [online])*

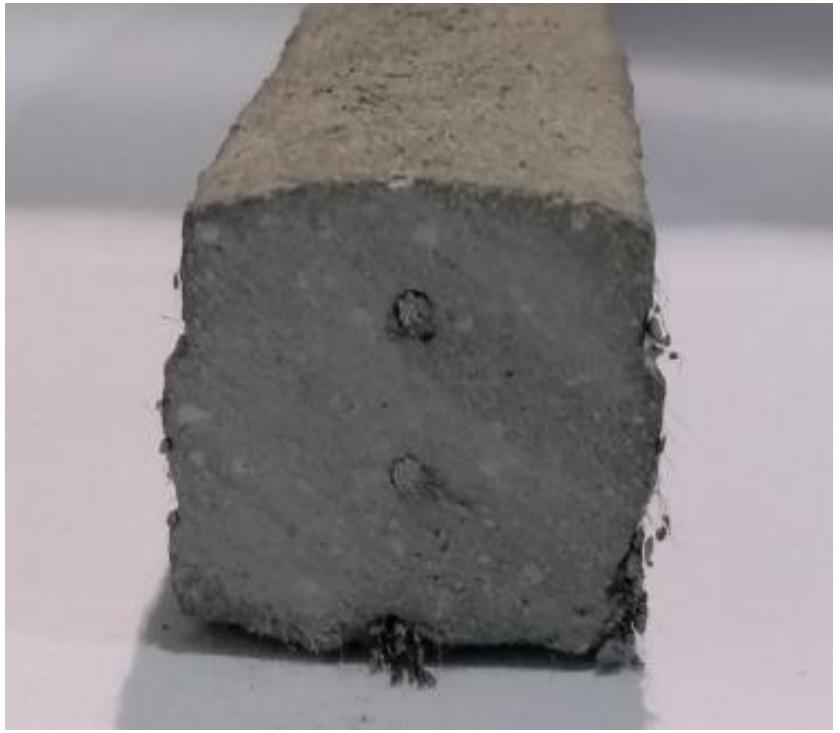
# SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

## PŘÍSTUPY VYZTUŽENÍ - Armatury

- Roboticky implantovaná volná armatura z oceli



Armatura v podobě vkládáná pružiny mezi vrstvy
*(KHOESNIEVIC, Elsewiever [online])*



Armatura v podobě vkládaného ocelového lanka *(LIM, Elsewiever [online])*

# ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

**Partikulární problémy – Vlastnosti materiálu**

- **Zpracovatelnost směsi**
  - Mísící poměr složek směsi
  - Dobamíchání
- **Reologické vlastnosti**
  - Tisknutelnost - Dobrá čerpatelnost a transport do kohezivní a spojité tisknoucí stopy
  - Vystavitelnost – udržení tvaru pod zátěží
- **Proces tvrdnutí**
  - Tvorba provázané struktury

What makes a materiál printable?
*(http://gyges3d.com [online])*

# ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

**Partikulární problémy – Aparatura**

- **Tisková hlava**
  - Průměr trysky
  - Mechanismus vyztužování
- **Přípravný okruh**
  - Mísení směsi
  - Míchání směsi
- **Čerpací okruh**
  - Čerpání směsi

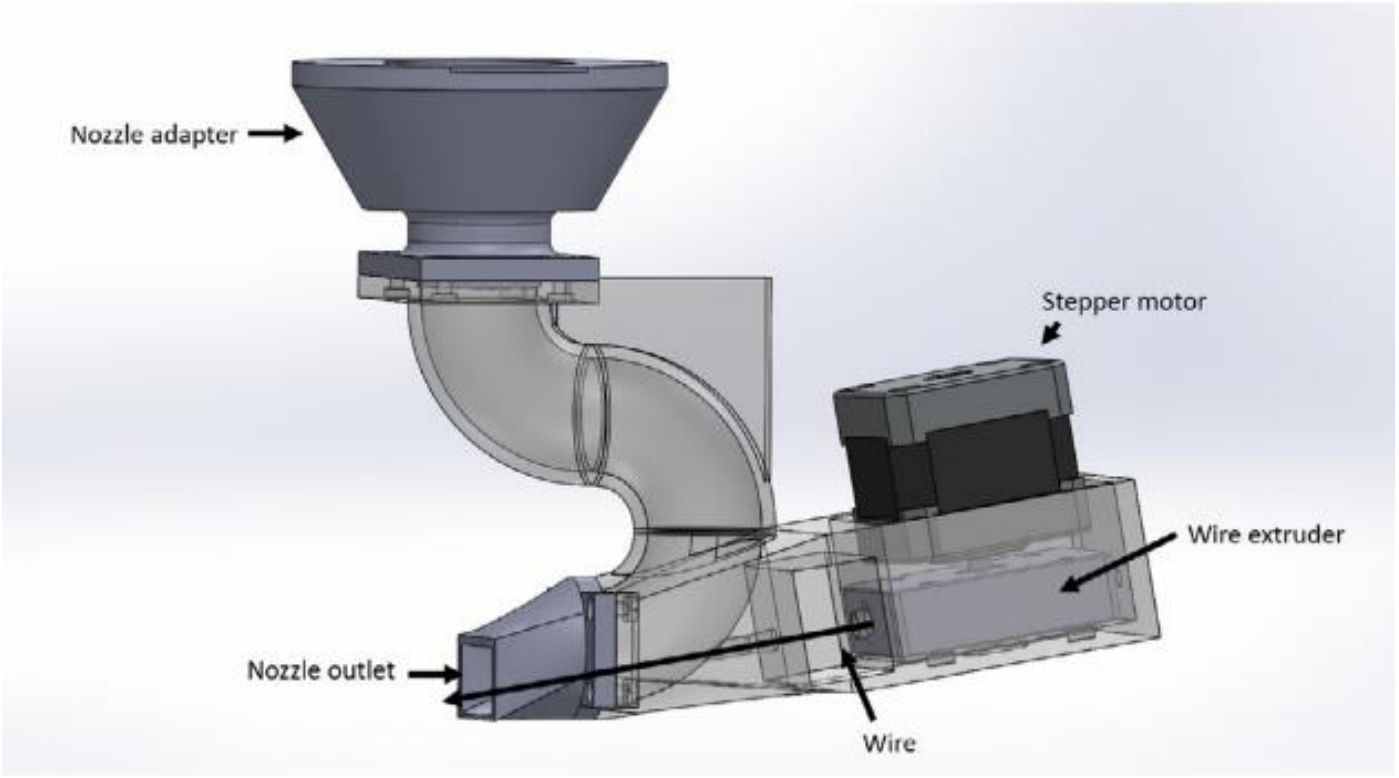
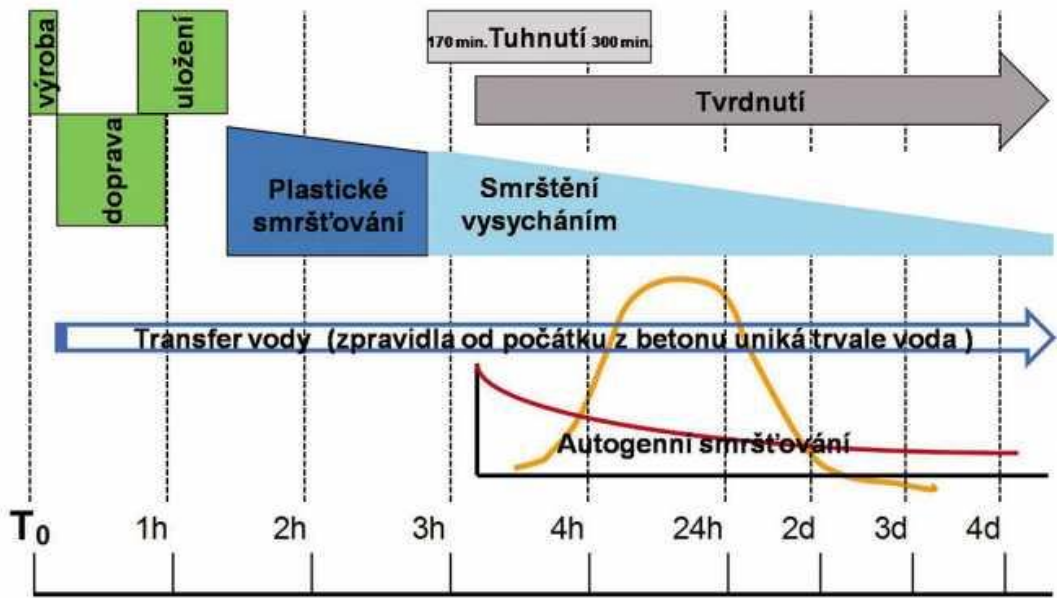



Schéma trysky s mechanismem kladení ocelového lanka
*(LIM, Elsewiever [online])*

# ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

**Partikulární problémy – Procesní parametry**

- **Časování operací**
  - Homogenní promísení cementové směsi
  - Dávkování aditiv
  - Rychlost extruze
  - Přidávání výztuže
- **Strategie výroby**
  - Trajektorie robotického ramene
  - Zpětná vazba




What makes a materiál printable?
*(http://gyges3d.com [online])*

# ANALÝZA A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ

## POTENCIÁL – BÍLÉ MÍSTO

- Výzkum směsi s optimalizovaným podílem složek směsi a chemických aditiv šetrných k životnímu prostředí.

- Nahrazení kameniva frakcemi z betonových recyklátů = snížení emisí $CO_2$, ušetření financí a recyklace materiálů.

# CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

**Podstata DP**

- Podstatou disertační práce je adaptace technologie 3DCMP pro cementové směsi s nízkým podílem chemických aditiv a strojové kladení ocelových výztuží v průběhu aditivní výroby. Jedná a se o aplikovaný výzkum prováděný ve spolupráci s průmyslovým partnerem VIA ALTA a.s. a Fakultou stavební ČVUT. Předpokládanou aplikací je aditivní výroba velkorozměrových dílů pro stavební a architektonické účely.

**Hlavní cíl DP**

- Cílem disertační práce je při použití soudobé technologii výroby 3DTCM vyvinout strategii a proces 3D tisku komplexních dílů o velkém rozměru z vyztužované kompozitní cementové směsi a obohatit tak znalosti v oblasti metodiky a strategie výroby této substance pro stavební a architektonické účely.

# CÍL DISERTAČNÍ PRÁCE

**Dílčí cíle DP**

- Výzkum procesních parametrů 3D tisku cementové směsi s optimalizovaným podílem složek směsi a chemických aditiv.
- Experimentální zjištění reologických vlastností a limitů cementové směsi vyvinuté Fakultou stavební ČVUT s ohledem na tisknutelnost. (Partikulární problémy – tisknoucí materiál)
- Vliv kompozitního materiálu v podobě vláken, nebo tvarové výztuže na únosnost a tvarovou stabilitu čerstvé cementové směsi pro kontrolovatelný 3DCMP s ohledem na vystavitelnost.
- Konstrukce tisknoucí hlavy *(Partikulární problémy – technologie a strategie  výroby)*
- Návrh a realizace procesu výroby a strategie 3DCP, tak aby nedocházelo k nežádoucím defektům v průběhu procesu stavění a došlo ke stabilní provázanosti vrstev i složitěji strukturovaných dílů *(Partikulární problémy – technologie a strategie  výroby)*
- Definování metody pro postup hodnocení kvality tisku podle souboru kritérií (tvar, geometrie, kvalita, mechanické vlastnosti = materiálové zkoušky) [Vyhodnocení tisku metodami RI, výbrusy = zjištění sedimentace plniva…]

# VĚDECKÁ OTÁZKA

***Pracovní hypotéza 1***

*Reologické vlastnosti čerstvé cementové směsi vhodné pro technologii 3DCMP, jsou ovlivněny jednotlivými složkami směsi. Zejména však distribucí částic písku v cementové směsi.*

***Vědecká otázka 1***

*Jakým způsobem ovlivní změna poměrů složek směsi a distribuce zrn písku podle Fuller-Thompsonovi teorie reologické vlastnosti směsi pro 3DCMP?*

***Pracovní hypotéza 2***

*V případě vrstvení čerstvé cementové hmoty na sebe, se záměrem výstavby stěny pod úhlem, dochází vlivem tíhy ke smykovému napětí mezi vrstvami, které při překročení únosné meze vede ke kolapsu stěny.*

***Vědecká otázka 2***

*Jak velký dopad bude mít smykové napětí mezi nanesenými vrstvami na stabilitu výstavby jednoduché stěny pod úhlem z čerstvé cementové směsi?*

# VĚDECKÁ OTÁZKA

***Pracovní hypotéza 3***

*Beton sám o sobě nemá dobré mechanické vlastnosti, proto při aplikaci ve stavebnictví musí být vyztužen. Při použití vhodného podpůrného materiálu (ocelový drát, ocelová síť, tkaninová síť, vysoce-plněný termoplast, skelné vlákno, Aramid, [pavoučí vlákno]), dojde ke stabilizaci materiálu a zlepšení mechanických vlastností, na jejichž základě bude dobře predikované chování v průběhu procesu tisku i komplexnějších struktur.*

***Vědecká otázka 3***

*Jakým vhodným materiálem výztuže vhodným pro 3DCMP lze zlepšit mechanické vlastnosti surové betonové hmoty tak, aby došlo ke stabilizaci tvaru extrudované hmoty, a umožnilo tak 3D tisk komplexnějších struktur?*

# VĚDECKÁ OTÁZKA

***Pracovní hypotéza 4***

*V odvětví stavebnictví se tisknou díly různé tvarové složitosti o velkém rozměru. Mechanické vlastnosti jsou ovlivněny procentuálním zastoupení příměsí (poměr vody, velikost zrna plniva, obsah cementu, obsah zpožďovače a urychlovače tuhnutí, obsah polykarboxylátových plastifikátorů, a obsah jiných zpevňujících aditiv), dobou mezi povrchovým ztvrdnutím - možnou strukturální provázaností vrstev a vytvrdnutím a technologií výroby. Úspěšnost tisku takových dílců tedy závisí na strategii výroby 3DCMP, která zohledňuje tisknutou geometrii, procesní parametry a složení směsi.*

***Vědecká otázka 4***

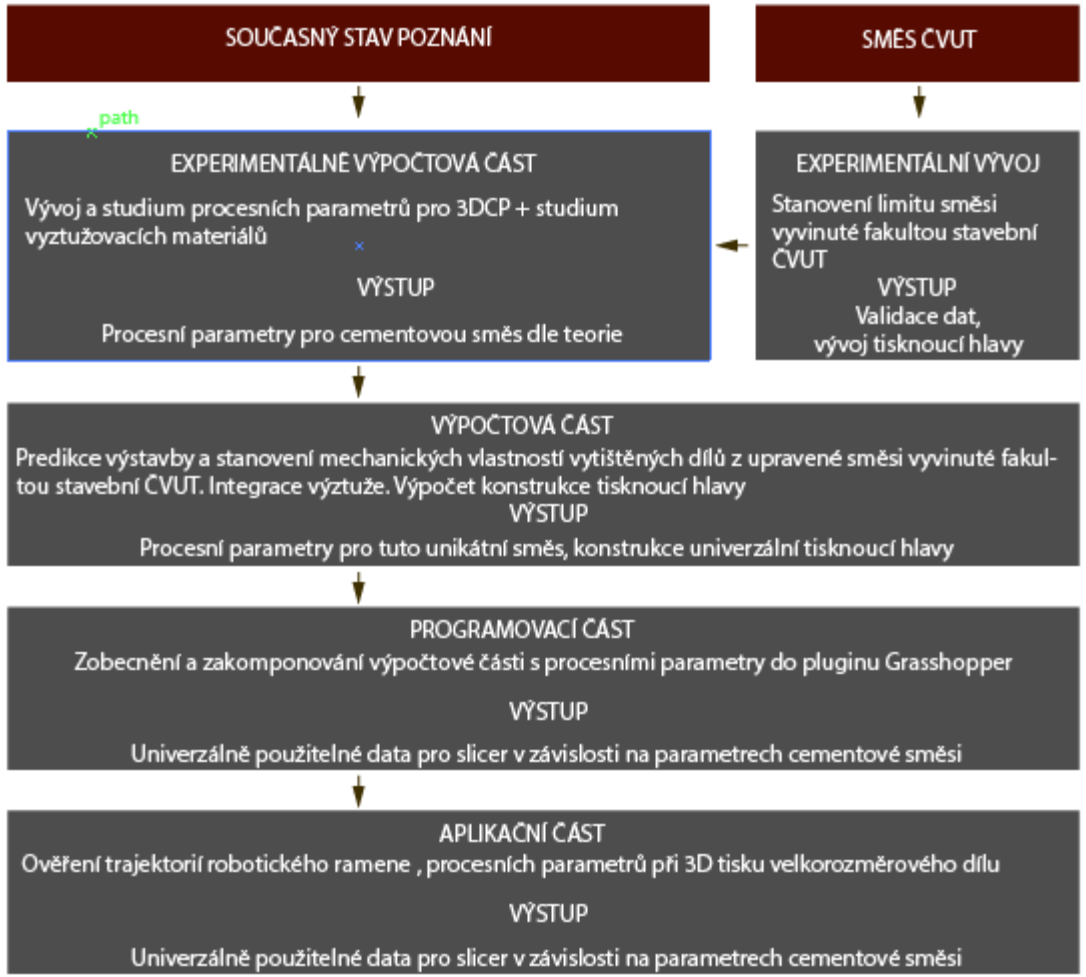
*Jakou strategií výroby pro robotický 3DCMP lze tisknout komplexní díly o rozměru do 12m$^3$ z vyztužované cementové směsi plněné betonovým recyklátem, aniž by nedocházelo ke kolapsu, a jaké jsou klíčové parametry pro tuto strategii?*

# METODY A POSTUP PRÁCE

## Postup práce

4 hlavní části

- Analýza současného stavu poznání
- Experimentální a výpočtová část
- Programovací část
- Aplikační část

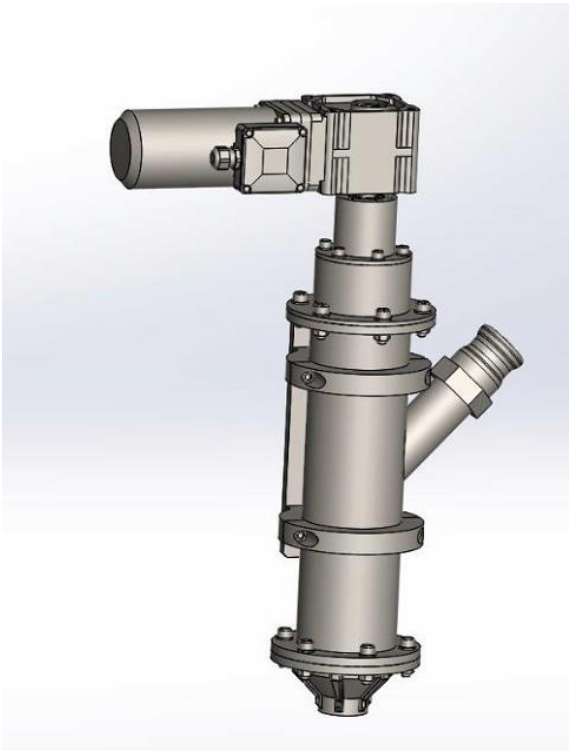


# METODY A POSTUP PRÁCE – hotové/ v procesu

**Tisková aparatura a vývoj extruderu**

- Konstrukce jednoduché pístové hlavy **hotovo**
- Konstrukce šnekové hlavy **v procesu**

Pístová hlava
*(autor)*



Šneková hlava
*(Bc. Slavíček)*

# METODY A POSTUP PRÁCE – hotové/ v procesu

**Materiál a jeho úprava**

- Zkoušky konzistence čerstvé betonové směsi
- Otestování cementové směsi navrhnuté fakultou stavební ČVUT
- Zkoumání chování cementové směsi

Fáze I -
Poměr složek
*(autor)*

Fáze II -
Test základních procesních parametrů a ověření funkčnosti *(autor)*

Fáze III -
Test únosnosti vrstev
*(autor)*

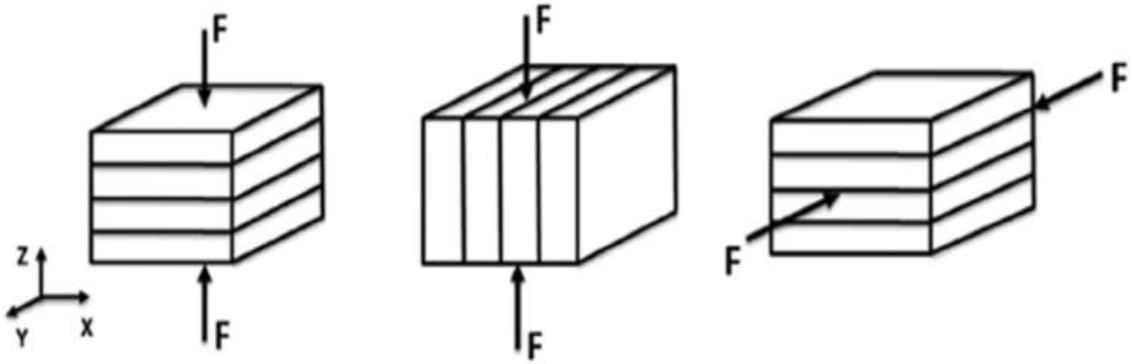
# METODY A POSTUP PRÁCE - následující kroky

**Materiál a jeho úprava**

**Fáze IV - Test mech. Vlastností cementových směsí dle ČSN EN 12390 ve spolupráci s ČVUT**

- Cylindrické (0,053 m3)/ krychlové (0,003375 m3) útvary zkušebních těles
- Uchování vzorků pod vodou
- Ověření geometrické stálosti tvaru
- Zkouška pevnosti betonu v tlaku

- Min. 3 tělesa pro jednu směs pro jeden způsob zatížení (9) C =0,477 m3 => 1,097Kg (hrubý odhad)

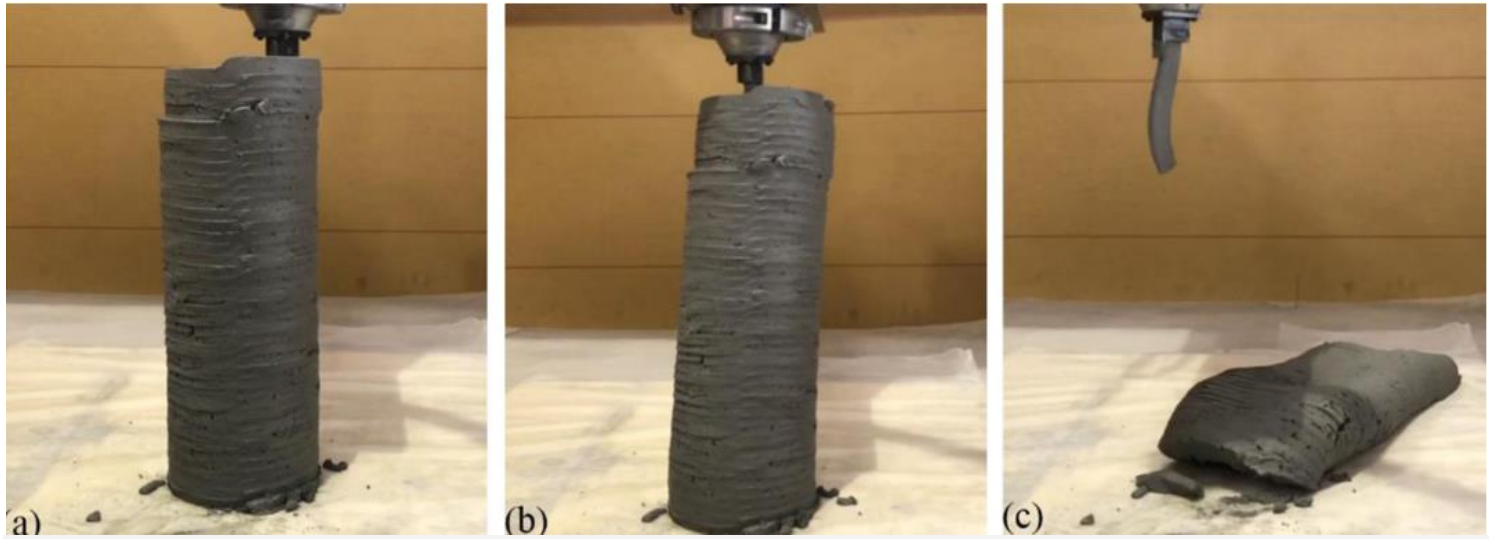


# METODY A POSTUP PRÁCE – následující kroky

**Testování kontinuity výnosu, test únosnosti  a stability tvaru = deformace vzniklá při vrstvení**

- Teoretické zlepšení vlastností cementové směsi použitím Fuller-Thompsonova teorie
- Binghamův model viskozity ke zlepšení reologických vlastností směsi
- Vypočtení chování geometrie dle Roussel-Lanosovi teorie
- Vhodná výztuž kompozitní cementové směsi
- Zkoušky konzistence čerstvé betonové směsi a testy výnosu
- Spolupráce s ČVUT a VIA ALTA

Poměr složek
*(autor)*



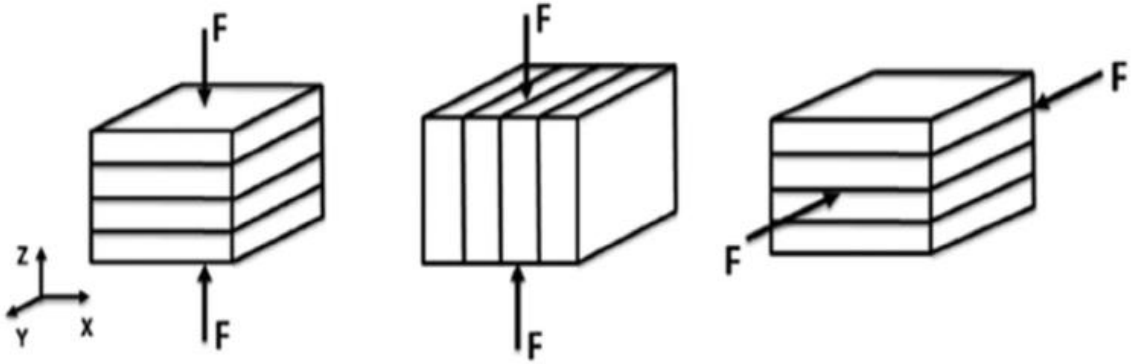

*Aplikace Fuller-Thompsonovi teorie a Binghamova modelu viskozity*
*(Yiwei Weng [19])*

# METODY A POSTUP PRÁCE - následující kroky

**Fáze IV - Test mech. Vlastností cementových směsí dle ČSN EN 12390 ve spolupráci s ČVUT**

- Cylindrické (0,053 m3)/ krychlové (0,003375 m3) útvary zkušebních těles
- Uchování vzorků pod vodou
- Ověření geometrické stálosti tvaru
- Zkouška pevnosti betonu v tlaku

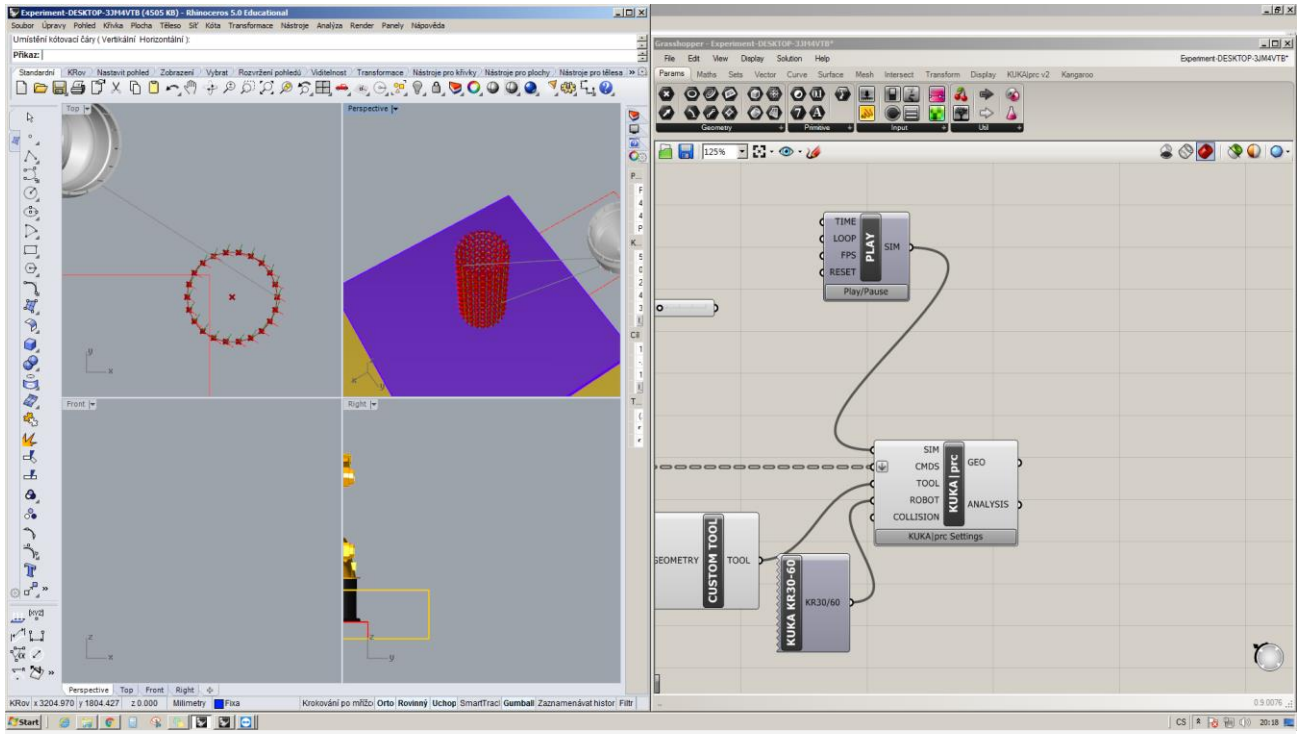
- Min. 3 tělesa pro jednu směs pro jeden způsob zatížení (9) C =0,477 m3 => 1,097Kg (hrubý odhad)



# METODY A POSTUP PRÁCE - následující kroky/ v procesu

**Naprogramování jednoduchého Sliceru (trajektorie robota)**

- Univerzální slicer pro 3DCP
- Měnitelné parametry v závislosti na směsi
- Signifikantní procesní parametry

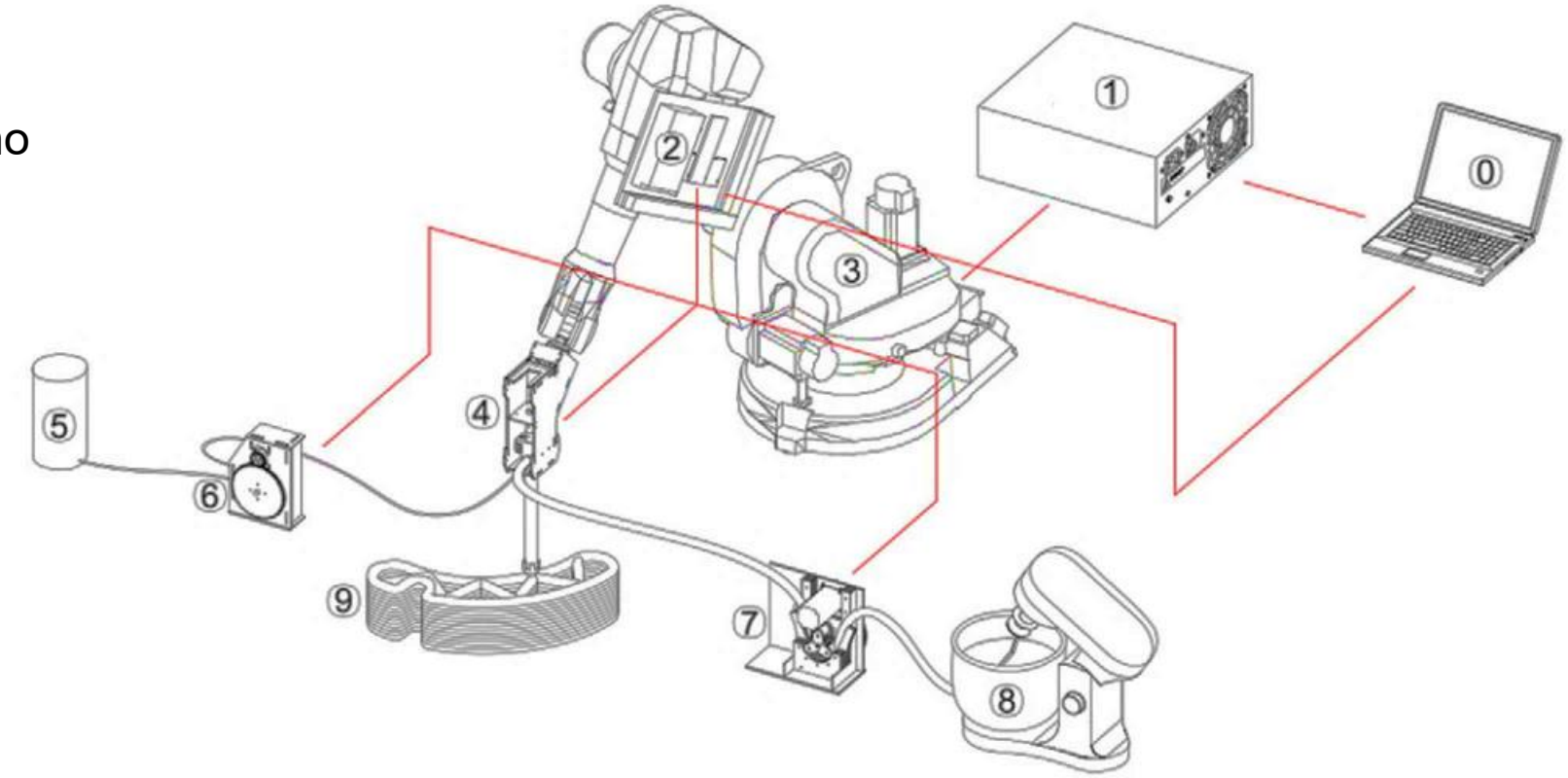



*Slicer v prostředí Rhinoceros, plugin Grasshopper (autor])*

# METODY A POSTUP PRÁCE/ následující kroky

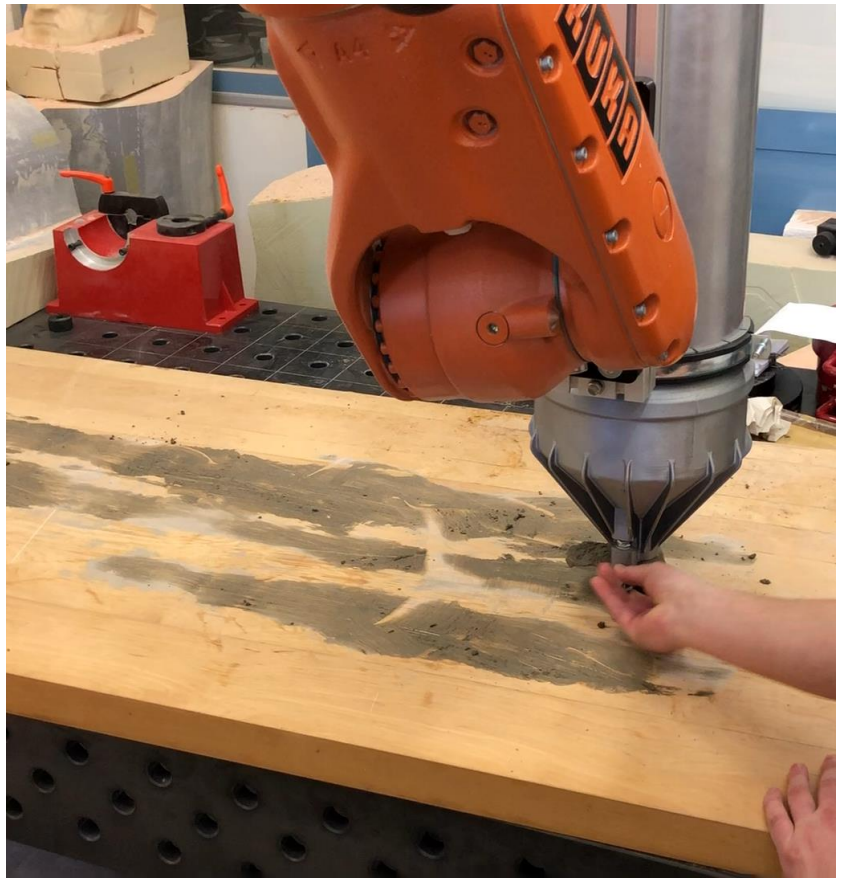
**Koncepce podle Gosselin, C.**

0. Zpracování dat
1. Řídící jednotka robotického ramene
2. Řízení 3D tisku
3. Robotické rameno KUKA
4. Tisková hlava
5. Urychlovač tvrdnutí
6. Peristaltické čerpadlo pro urychlovač tvrdnutí
7. Peristaltické čerpadlo pro předmíchávač směsi
8. Předmíchávač směsi
9. Vytištěný objekt




*Koncepce aparatury dle Gosselin, C.*
*(Gosselin, Elsewiever [online])*

# METODY A POSTUP PRÁCE



# ČASOVÝ ROZVRH PRÁCE

- **A** Rešerše Studium velkorozměrového 3D tisku
- **B** Konstrukce vytlačovací hlavy
- **C1** Základní experimenty s cementovou směsí - Hledání signifikantních procesních parametrů
- **C2** Definování vhodné výztuže - Hledání signifikantních procesních parametrů
- **D** Návrh a realizace softwarového řešení strategie výroby
- **E** Hodnocení kvality tisku
- **F** Publikační činnost

# ČASOVÝ ROZVRH PRÁCE

| Plán práce | 2017 6.-12. | 2018 1.-6. | 2018 6.-12. | 2019 1.-6. | 2019 6.-12. | 2020 1.-6. | 2020 6.-12. | 2021 1.-6. |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A | | | | | | | | |
| B | | | | | | | | |
| C1 | | | | | | | | |
| C2 | | | | | | | | |
| D | | | | | | | | |
| E | | | | | | | | |
| F | | | | | | | | |

# Aktuální vědecký přehled

## Významné studie zabývající se 3D tiskem cementových směsí


1. KHOSHNEVIS, Behrokh. Automated construction by contour crafting - Related robotics and information technologies. *Automation in Construction* [online]. 2004, **13**(1), 5–19. ISSN 09265805. Dostupné z: doi:10.1016/j.autcon.2003.08.012

2. WENG, Yiwei, Mingyang LI, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN. Design 3D printing cementitious materials via Fuller Thompson theory and Marson-Percy model. Construction and Building Materials [online]. 2018, 163, 600–610 [vid. 2018-04-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.112

3. NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2018 [vid. 2018-02-19]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012

4. GOSSELIN, C., R. DUBALLET, Ph ROUX, N. GAUDILLIÈRE, J. DIRRENBERGER a Ph MOREL. Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete - a new processing route for architects and builders. *Materials and Design* [online]. 2016, **100**, 102–109 [vid. 2017-11-27]. ISSN 18734197. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2016.03.097

5. PANDA, Biranchi, Suvash CHANDRA PAUL a Ming JEN TAN. Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material. *Materials Letters* [online]. 2017, **209**, 146–149 [vid. 2017-11-27]. ISSN 18734979. Dostupné z: doi:10.1016/j.matlet.2017.07.123

6. KAZEMIAN, Ali, Xiao YUAN, Evan COCHRAN a Behrokh KHOSHNEVIS. Cementitious materials for construction-scale 3D printing: Laboratory testing of fresh printing mixture. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, **145**, 639–647 [vid. 2017-11-28]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.015

7. AGUSTÍ-JUAN, Isolda, Florian MÜLLER, Norman HACK, Timothy WANGLER a Guillaume HABERT. Potential benefits of digital fabrication for complex structures: Environmental assessment of a robotically fabricated concrete wall. *Journal of Cleaner Production* [online]. 2017, **154**, 330–340 [vid. 2017-11-29]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.002

# DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

**Arnošt Vespalec**, Ing.

email@prednasejiciho.cz

ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

www.**ustavkonstruovani**.cz