

Velkorozměrový 3D tisk polymerního betonu

Martin Krčma, *vedoucí práce: 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



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

Obsah

- **Motivace**
- **Současný stav poznatků a analýza**
- **Cíl disertační práce a vědecké otázky**
- **Metody a způsob řešení**
- **Dosažené výsledky a závěr**



Realizovaný neplanární tisk z polymerního betonu

Motivace

- Tenčící se zásoba stavebních surovin, vysoká uhlíková stopa stavebnictví (38%), doprava surovin a výroba cementu (8%)
- Alternativa - využití místních zdrojů – např. odpadních materiálů jako náhrady cementového betonu
- Recykluje se max. 50% plastového odpadu (2019)



AI Factory Marsha Habitat Concept

Construction Climate Change, WBCSD, zalohujeme.cz

Motivace a předběžný cíl práce

Polybet – kompozit termoplastu vysoce plněný agregátem

- Předběžný cíl práce je zpracování metody 3D tisku materiálu
- Nesdílí stejné limitace jako současné metody tisku ve stavebnictví při tisku optimalizovaných dílů
- *„Hlavním přínosem 3D tisku nebude rychlost ani cena procesu, ale potenciál přidané hodnoty.“*

C. Gosselin et al., 2016

Fyzikální vlastnosti (písek/PET 23/77)	POLYBET	konvenční beton
Objemová hmotnost	1950 kg/m ³	2300 kg/m ³
Střední pevnost v ohybu	14,6 MPa	7 MPa
Nasákavost	0 %	7 %
Mrazuvzdornost	1 [-]	0,8 [-]
Odolnost proti působení vody a CHRL po 50 cyklech	odpad 4 g/m ² stupeň porušení: nenarušený	odpad 250 g/m ² stupeň porušení: slabě narušený
Hloubka průsaku tlakovou vodou	0 mm	3 - 5 mm



Současný stav poznání



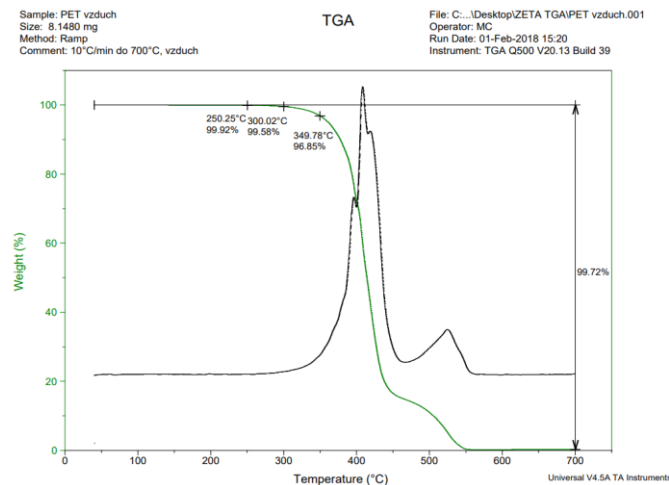
Současný stav poznání - Materiál

- Okno procesních parametrů
- Maximum pojiva 80%

E. Kulovaná et al., 2019
I. Slietsova et al., 2016

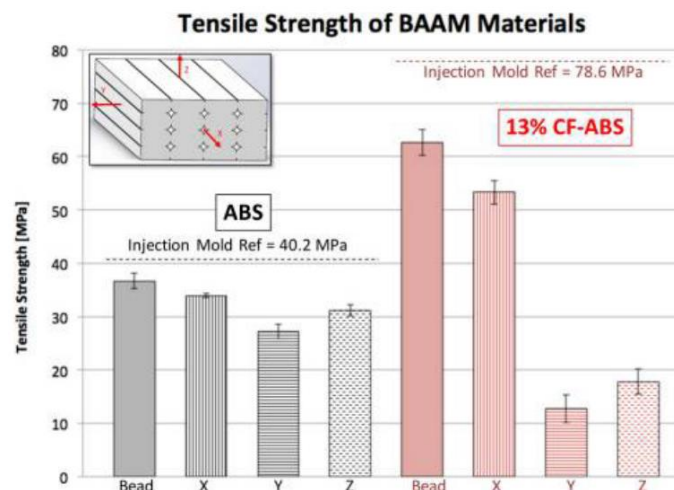
- Kompozit PET vložek a písku, poměr složek 1:1 pro max R_f a R_c

O. Dumitrescu et al., 2011



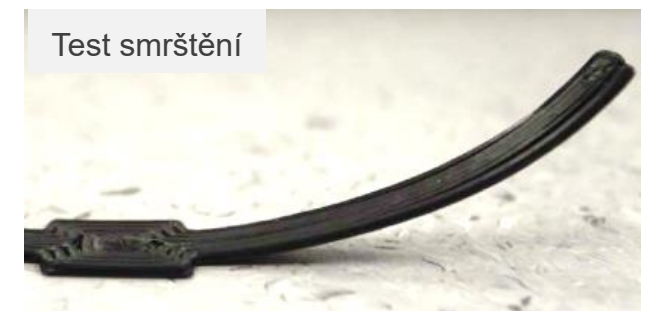
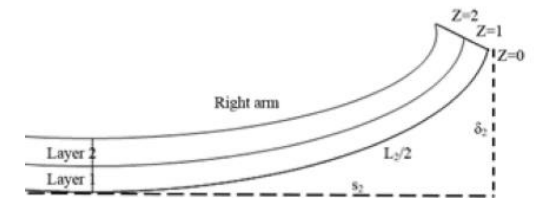
- Lineární smrštění mat. 2-5%
- Vlákno snižuje deformaci (84%)
- Plnění vlákný zvyšuje anizotropii a porozitu (z 2% až 10%)

F. Ning et al., 2015
C. E. Duty et al., 2017



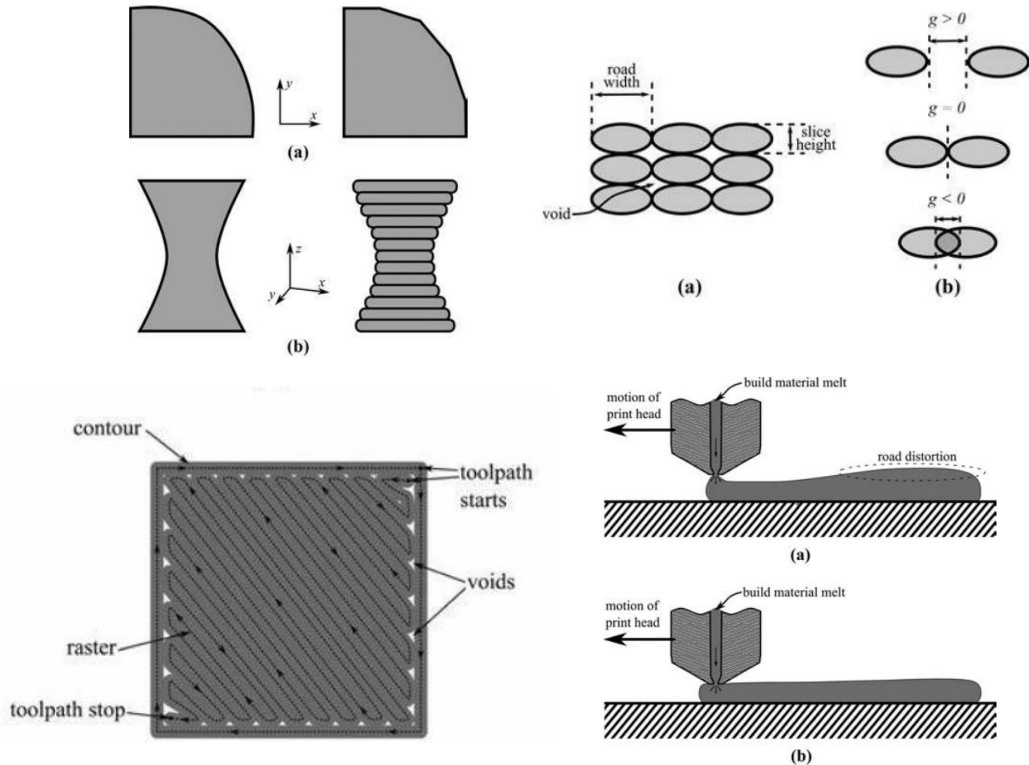
- Plnění zrnem snižuje deformaci o max. 46%
- Práce popisuje test smrštění

D. Stooft and K. Pickering, 2018



Současný stav poznání - Technologie

Vliv trajektorií



B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, 2014, 2015

Víceosý tisk

- Nutnost přizpůsobit tiskové trajektorie materiálu

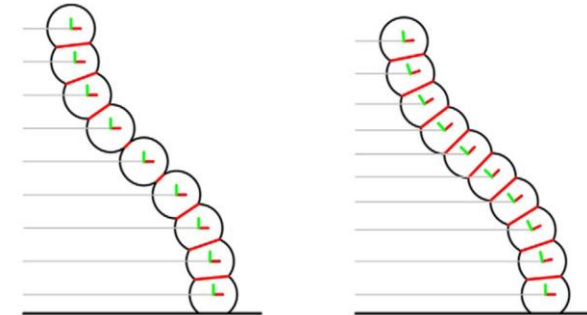
C. Gosselin, et al., 2016

- Převis při 5-osém tisku až 90°
- Testování víceosého tisku

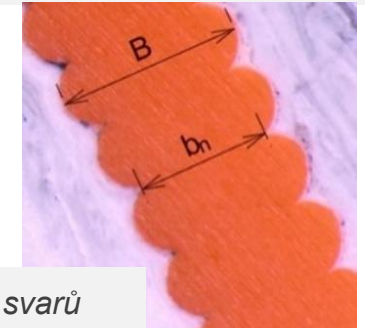
P. Krejcirik et al., 2018

- Prutová metoda – nánosy po 3D trajektoriích

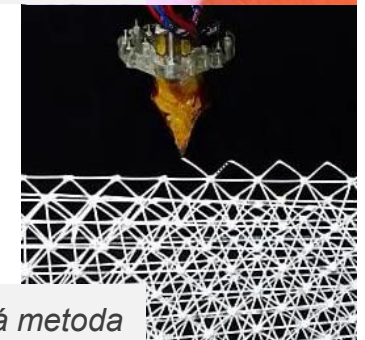
N. Hack and W. V. Lauer, 2014



Konstantní výška Tečná návaznost

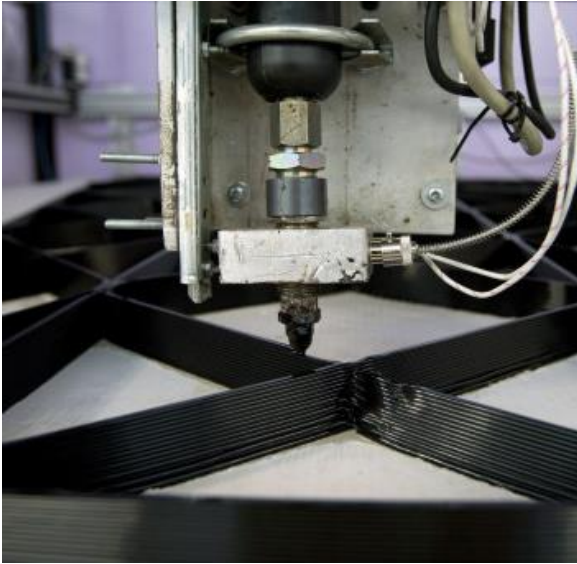


Kvalita svarů

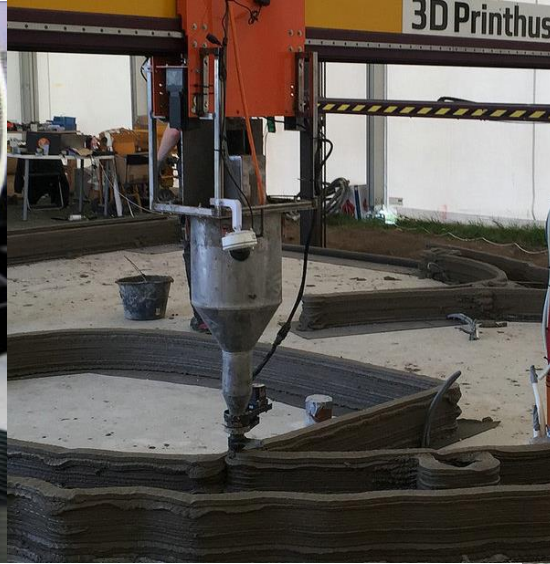


Prutová metoda

Současný stav poznání - Aplikace



FDM, 3D print Canal House



CC, 3D Printhuset



EM, R. Duballet, et al., 2017



D-Shape, E. Dini, 2009

- Žádná existující metoda nekombinuje materiál vhodný pro stavebnictví a tvarovou volnost dostatečnou pro optimalizované tvary

- Charakterizace tištěného materiálu, limity rozměru a tvarové volnosti Polybetu

R. Duballet, et al., 2017
B. Khoshnevis et al., 2001

Cíl práce

Hlavním cílem disertační práce je vývoj metody, nalezení limitů a vymezení aplikačního prostoru technologie velkorozměrového tisku z polymerního betonu.

Dílčí cíle:

- *Nalezení procesních parametrů materiálu, v závislosti na experimentálně zjištěných vlastnostech*
- *Test mechanických vlastností tištěného materiálu a porovnání s lisovaným stavem*
- *Vývoj velkorozměrové tiskové strategie a jejích limitů pro plněný materiál*
- *Pokročilé tiskové strategie se zaměřením na aplikaci ve stavebnictví*

Přínosem práce je potenciál uvedení technologie na trh.



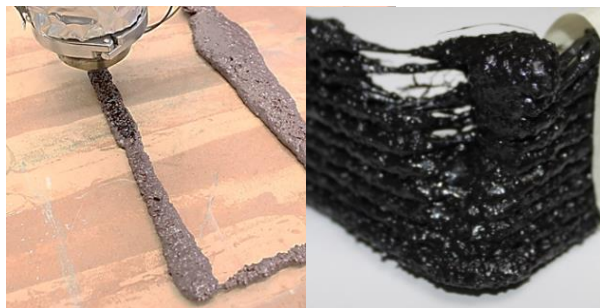
Proces tisku

Vymezení oblasti práce

VSTUPY TECHNOLOGIE

DESIGN
EXTRUDERU
ŘÍDÍCÍ SYSTÉM
MATERIÁLOVÁ
SMĚS

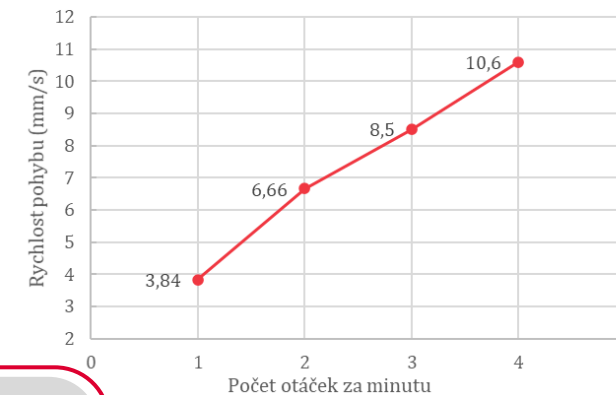
PROVEDENÍ



VYHODNOCENÍ



Rychlost nánosu při tisku vrstvy 4 mm



Obsah práce

TRAJEKTORIE
PROCESNÍ
PARAMETRY

EXPERIMENTÁLNÍ
TESTOVÁNÍ
VLASTNOSTÍ A
TISKNUTELNOSTI

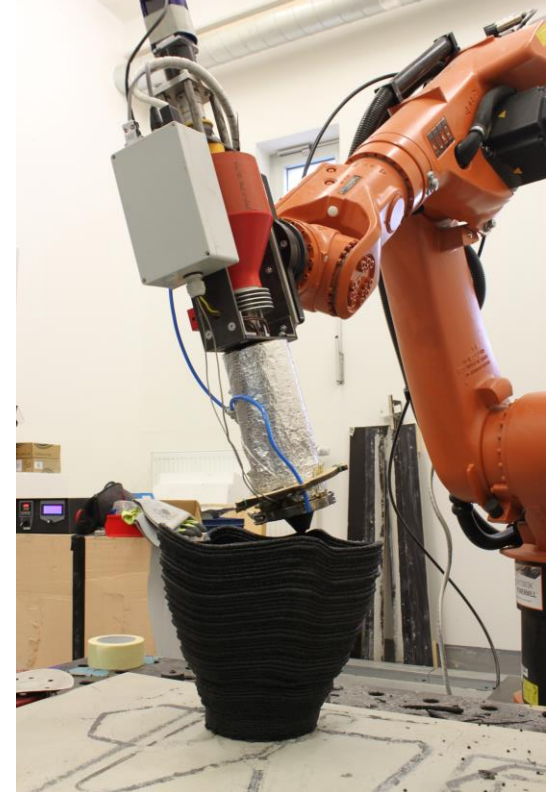
MATERIÁLOVÉ A
NÁVRHOVÉ
LIMITY METODY

APLIKACE

ZPĚTNÁ VAZBA

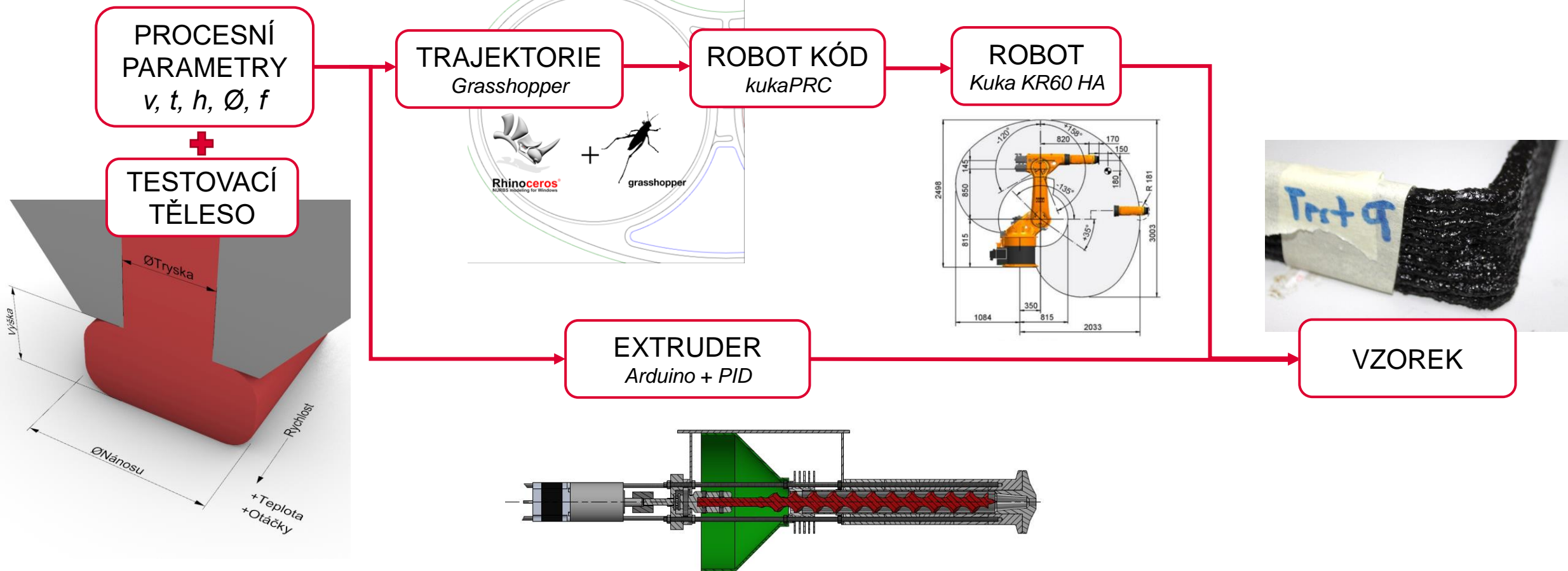
Vědecké otázky

- 1) *Do jaké míry a jakým způsobem degradují mechanické vlastnosti polymerního betonu při procesu 3D tisku?*
- 2) *Jak lze kompenzovat smrštění a geometrické limity velkorozměrového tisku pomocí tvaru tiskových stop, náklonu hlavy a neplanárního tisku?*
- 3) *Jaká je závislost tuhosti na snížení relativní hustoty pomocí tisku prostorové výplně?*

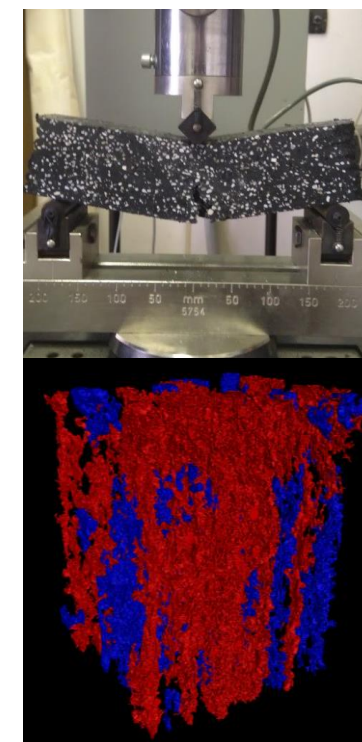
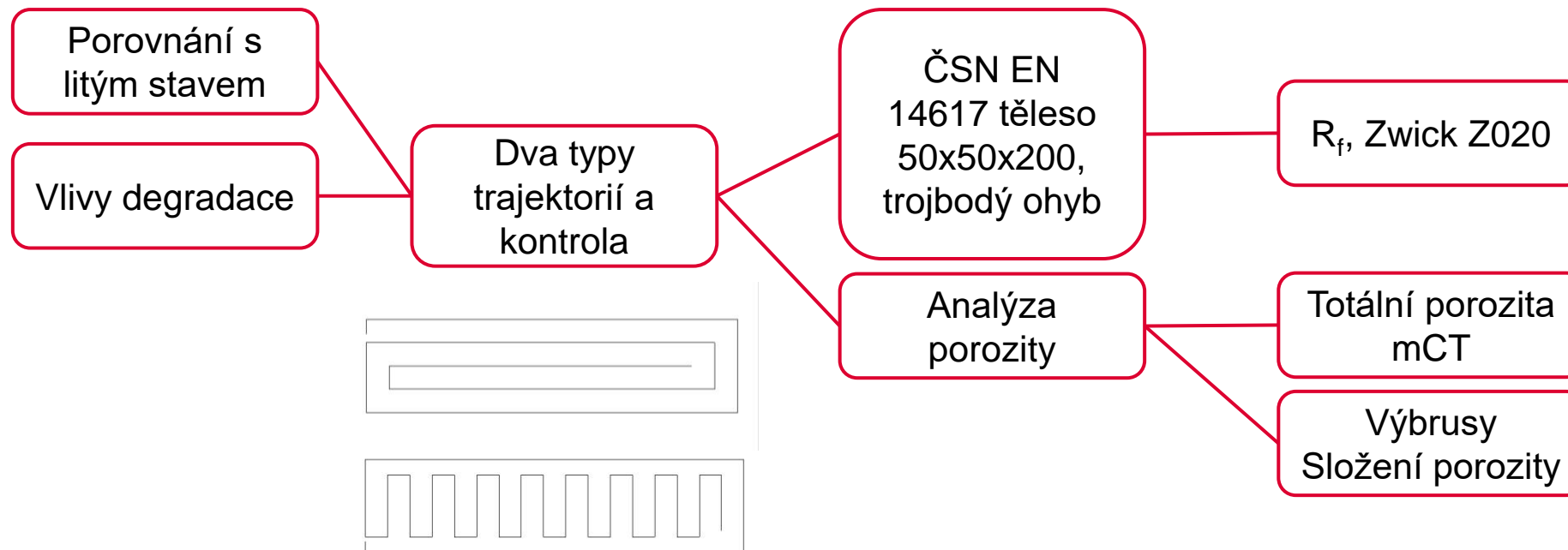


Tisková soustava

Materiál a metody



Vědecká otázka 1



Vědecká otázka 1 – Řešení

Pevnost v ohybu

	R_f (MPa)	Odchylka σ
Podélný	19,5	0,631
Příčný	14,9	0,265
Litý	19,7	

Porozita:

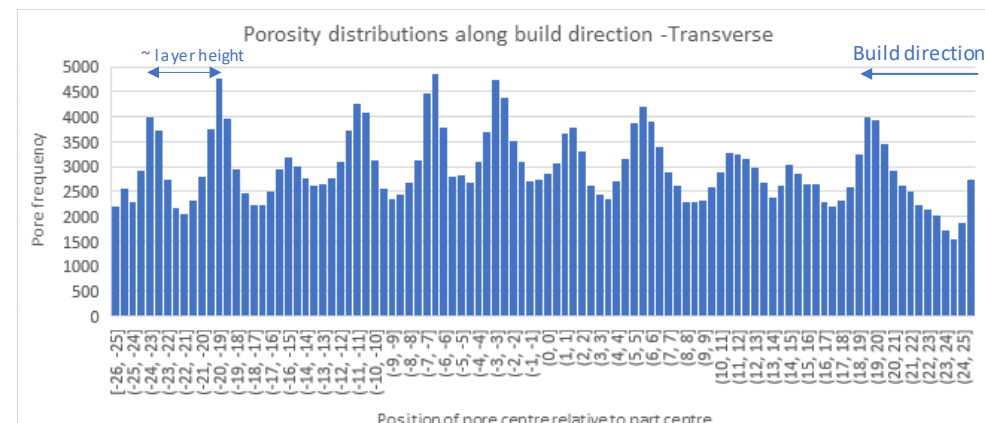
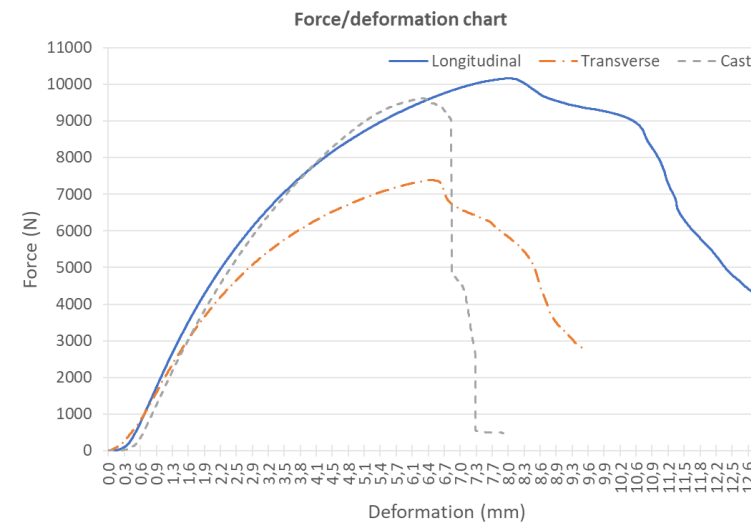
1. Podélný 12,59%
2. Příčný 10,54%
3. Litý 1,58%

- Patrná souvislá kavita v materiálu u 3D tištěných vzorků
- Vliv porozity a anizotropie

Příspěvek do RPJ: DOI: 10.1108/RPJ-12-2019-0316

USE OF POLYMER CONCRETE FOR LARGE SCALE 3D PRINTING

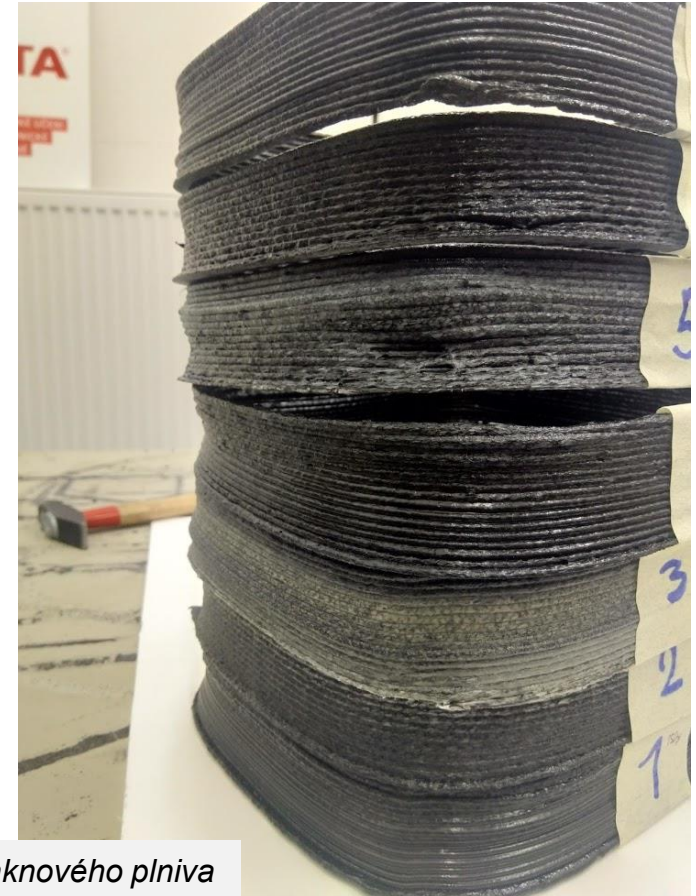
Ing. M. Krčma, P. Vosynek, PhD., T. Zikmund, J. Kaiser, D. Škaroupka, PhD.,
doc. D. Paloušek, PhD



Vědecká otázka 1 – Řešení

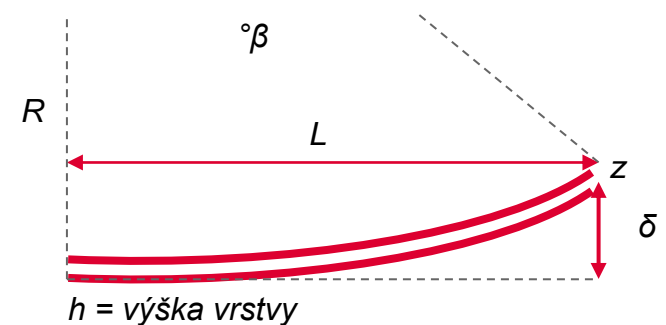
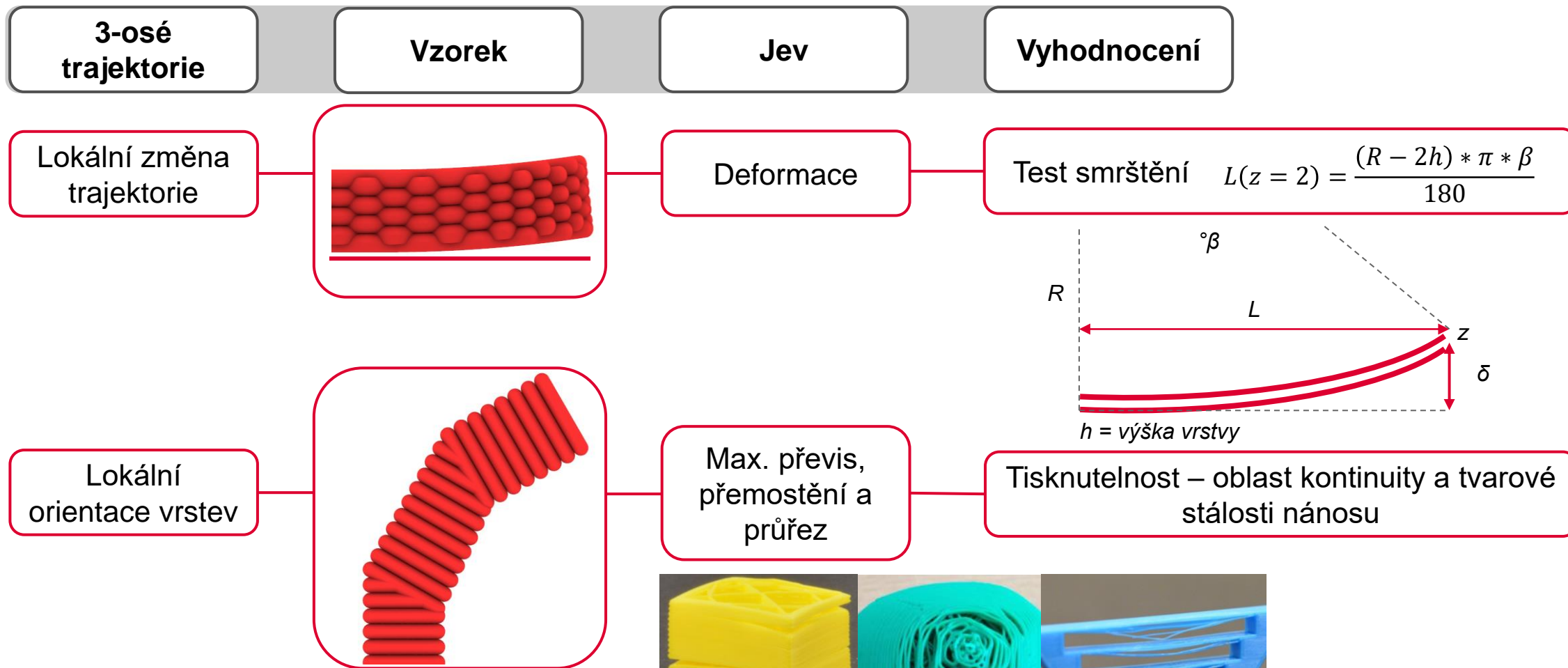
- „Difference in behaviour during additive manufacturing between different compositions of polymer concrete,,
 - Porovnání generací polymerního betonu, tisknutelnost, mechanické vlastnosti a zkroucení při tisku
1. Původní složení
 2. Složení optimalizované pro 3D tisk
 3. Složení vhodné pro cirkulární použití

Journal of Renewable Materials Q3, Imp 1.37

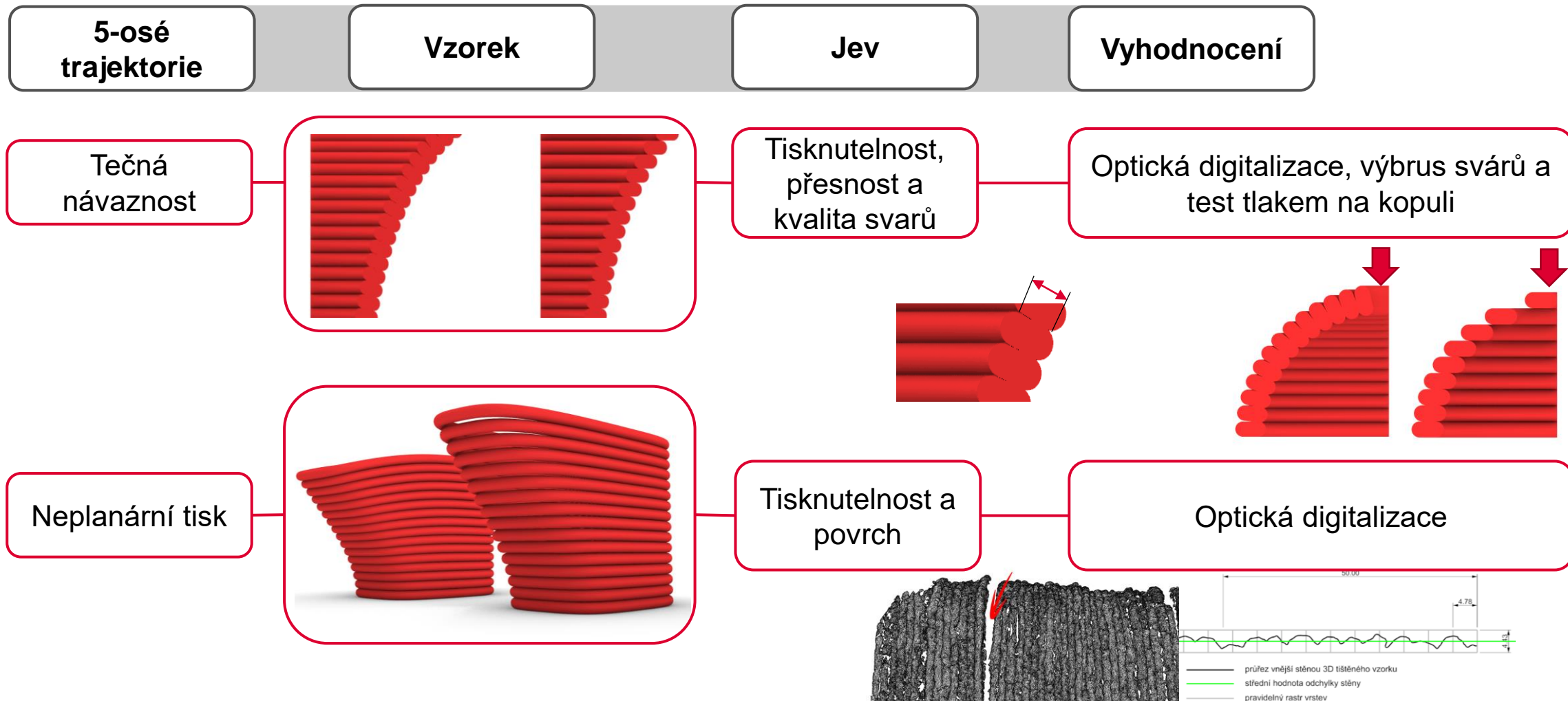


Testování vláknového plniva

Vědecká otázka 2



Vědecká otázka 2



Vědecká otázka 2 – Řešení

- Plánovaná publikace: Nonplanární pětiosý tisk, slicing objektů, vliv na tisknutelnost a povrch

Video abstrakt BE.AM 2020:

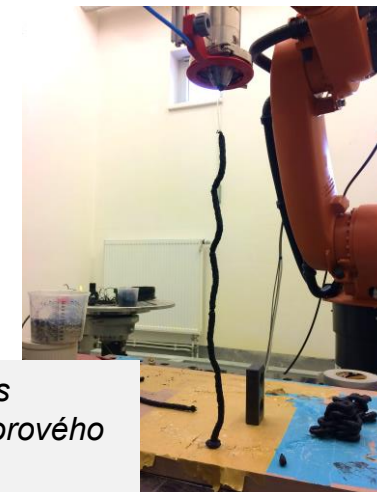
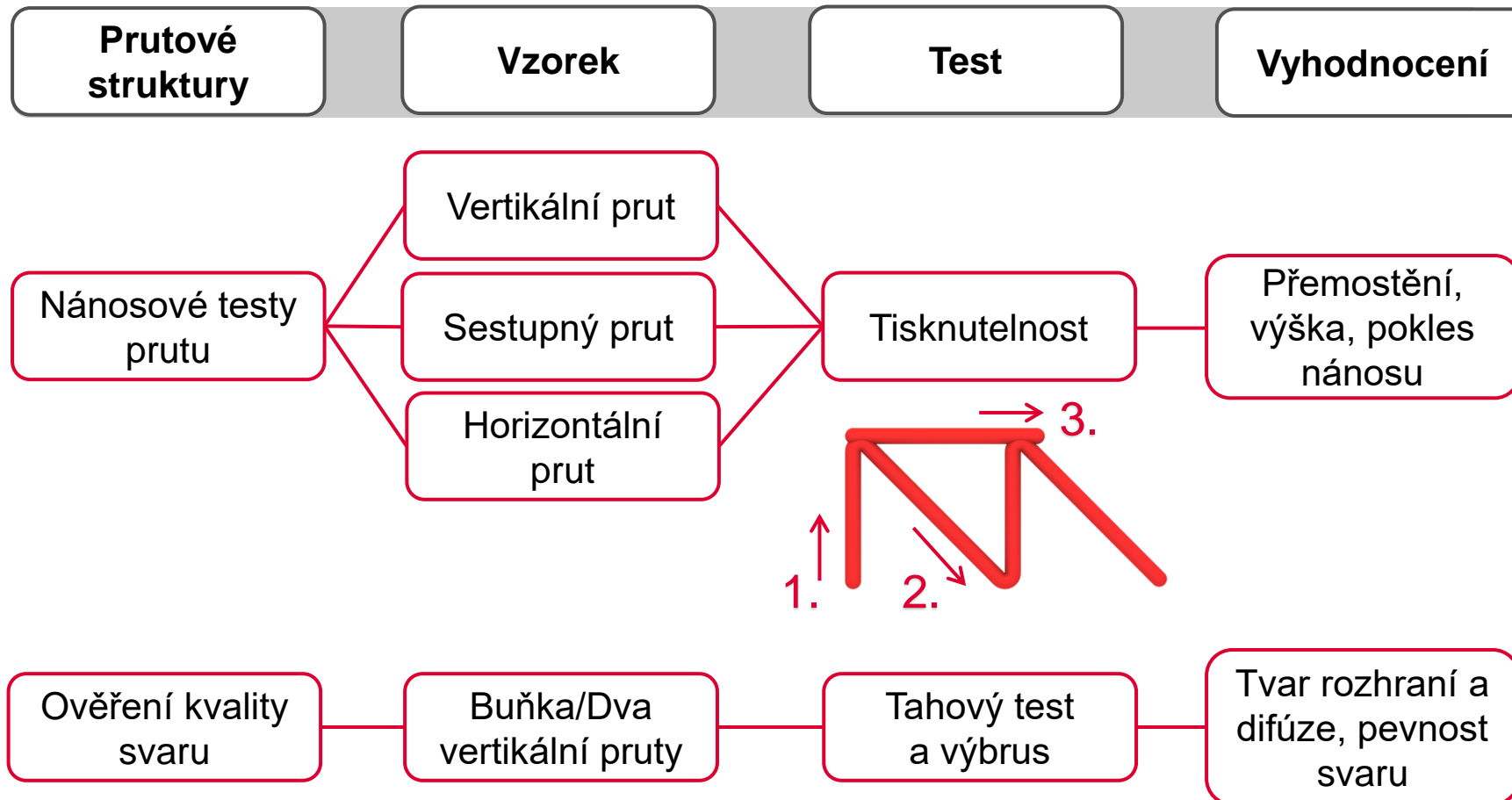
„Structural members manufactured by freeform deposition of polymer concrete“

- V současné době probíhá technologická úprava soustavy

Plán publikace: *První čtvrtletí 2021, Rapid Prototyping Journal, Q1*



Vědecká otázka 3



Nános prostorového prutu

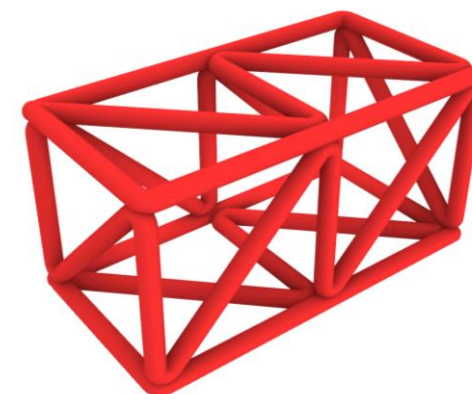


Schéma třípatrové buňky

Závěr

- VO1 z velké části zodpovězena (75%), dál lze zpracovat detailněji porozitu a vliv parametrů
- VO2 v řešení (40%), vyvinuté metody
- VO3 (10%), zatím předběžné testy

- 1 vydaná publikace, 1 abstrakt na symposiu, 1 rozpracovaná

Use of polymer concrete for large-scale 3D printing

Martin Krěma, David Škaroupka and Petr Vasynek
Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic
Tomáš Zikmund and Josef Kaiser
Central European Institute of Technology, Brno, Czech Republic, and
David Palousek
Faculty of Mechanical Engineering, Brno University of Technology, Brno, Czech Republic

Abstract

Purpose – This paper aims to focus on the evaluation of a polymer concrete as a three-dimensional (3D) printing material. An associated company has developed plastic concrete made from reused unrecyclable plastic waste. Its intended use is as a construction material.
Design/methodology/approach – The concrete mix, called PolyBet, composed of polypropylene and glass sand, is printed by the fused deposition modelling process. The process of material and parameter selection is described. The mechanical properties of the filled material were compared to its cast state. Samples were made from castings and two different orientations of 3D-printed parts. Three-point flex tests were carried out, and the area of the break was examined. Computed tomography of the samples was carried out.
Findings – The influence of the 3D printing process on the material was evaluated. The mechanical performance of the longitudinal samples was close to the cast state. There was a difference in the failure mode between the states, with cast parts exhibiting a tougher behaviour, with fractures propagating in a stair-like manner. The 3D-printed samples exhibited high degrees of porosity.
Originality/value – The results suggest that the novel material is a good fit for 3D printing, with little to no degradation caused by the process. Layer adhesion was shown to be excellent, with negligible effect on the finished part for the longitudinal orientation. That means, if large-scale testing of buildability is successful, the material is a good fit for additive manufacturing of building components and other large-scale structures.

Keywords 3D printing, Robotic fabrication, Polymer concrete, Recycled thermoplastic

Paper type Research paper

Introduction

As three-dimensional (3D) printing technology matures, so rises the number of its applications. Recently, there has been a significant growth in projects focusing on 3D printing in the construction industry. The progress is driven mostly by architects, who desire the freedom of form made possible by additive manufacturing. At first, cement concrete may appear as a viable choice of material for 3D printing, but its specific properties make it hard to process using extrusion manufacturing (EM). Cement concrete is also known as a great contributor to the carbon dioxide (CO₂) emissions worldwide. Thermoplastics commonly used for 3D printing are costly and present a substantial burden on the climate. An associated company has presented a novel material comprised of recycled waste from consumer packaging industry. The composite consists of large percentage of filler, mostly common or glass sand, and binder, in this case polypropylene (PP). Being comprised mostly of filler, the material may be viable for use in the construction industry for both its mechanical and

economical qualities. Its suitability for 3D printing will be evaluated.

State of the art

This section explores the current works on topics of thermoplastic composites from recycled material, their use for 3D printing and large-scale 3D printing in general. Common processing methods for recycling plastic that achieve a product of the same quality as virgin plastic are currently unavailable at a comparable cost. As a result, plastic waste is stored in landfills in megatons (Welle, 2011). The first mention of a more economic method to process this waste is a patent from Midland Ross Corp., which describes a process based on re-melting scrap plastic in large-scale extrusion device, mixing it with an additive and reusing it (Midland-Ross Corp, 1981). The process on which this article is based on is quite similar at its core, but the mixture is prepared in a reactor, which also dries and preheats it. That mixture is then melted and mixed by a screw extruder and used for casting building components. The system is variable, capable of processing various thermoplastics and working with filler ratios of 0–80%. The compressive strength is 29 MPa, the flexural strength is

The current issue and full text archive of this journal is available on Emerald Insight at: <https://www.emerald.com/insight/1355-2546.htm>



Received 13 December 2019
Revised 5 June 2020
27 August 2020
Accepted 22 September 2020

Shrnutí

Projektové zapojení:

- ZÉTA TJ01000034, Vývoj procesních parametrů aditivní výroby vysoce plněných odpadních termoplastů
- TREND FW01010513, Vývoj produkčního systému velkoformátové aditivní výroby vysoce plněných odpadních termoplastů
- ZÉTA TJ04000408, Vývoj technologie a strategií robotické aditivní výroby velkorozměrových prutových struktur

Práce na projektech a hospodářských smlouvách nesouvisející s tématem. Např:

- Projekt fondu vědy FV 2019-03, řešitel

Prezentace:

- MSV 2019, 3D EXPO Bratislava 2019, Prototyp 2018, Noc vědců, 120 let VUT

Výuka:

- Bc. studium: YRP, 1K, 2K, 3CD
- Mgr. studium: ZM1, ZPP



DĚKUJI VÁM ZA POZORNOST

Martin Krčma

Martin.Krcma1@vut.cz



ÚSTAV
KONSTRUOVÁNÍ

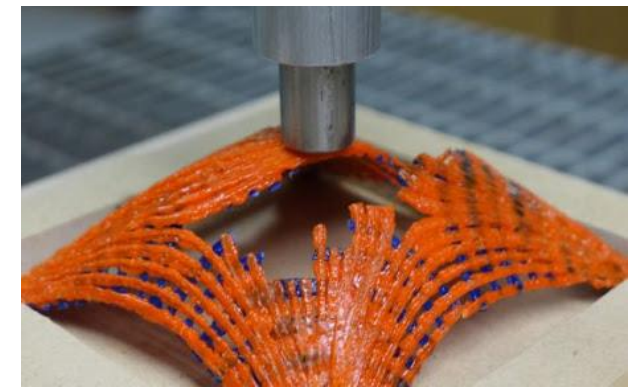
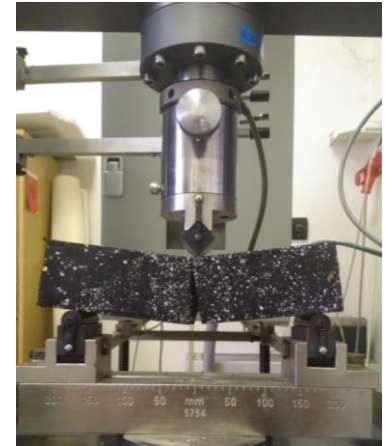
www.ustavkonstruovani.cz

Otázka č.1

- **Co je přesně míněno pevností v ohybu okolo hodnot 14,6 MPa na str. č. 35?**
- Polybet vyrobený odlitím, má při testu podle normy ČSN EN 14617 – umělý kámen, tříbodý ohyb, těleso 50x50x200, pevnost v ohybu 14,6 Mpa. S touto hodnotou 3d tištěný materiál porovnávám.

Otázka č.2

- Jaký je plán ohledně ověřování mechanických vlastností vzniklého materiálu?
- Dopusud používám normovaný test pro umělý kámen – tříbodý ohyb
- Mezivrstvá soudržnost/anizotropie materiálu pomocí tahových testů (Double cantilever beam). Dále je možnost použití testů na beton, jako je příčný tah.
- Mechanické testování výhod pětiosého tisku.
Navrhovaný test je tlak na kopuli tištěnou 3 a 5 ose.



Tam et al., 2015

Otázka č.3

- V čem spočívá „kompromis“ uvedený v první větě na str. 36, když se požadavky jeví uspokojeny?
- Kompromis byl zamýšlený mezi 3D tiskem čistého polymeru a cementového betonu a jejich výhodami a nevýhodami. Vhodnější by mohl být např. výraz spojení.

Otázka č.4

- **Jak je to s případným dlouhodobým vývojem mechanických vlastností Polybetonu, jeho odolností proti agresivním vlivům prostředí ve stavebnictví a jak by se měla řešit otázka odbourávání samotných odpadů z Polybetonu?**
- UV záření typicky degraduje PP. Díky plnému probarvení a vysokému stupni plnění je ale materiál před UV zářením stabilní.
- Nasákavost – Lisovaný Polybet nemá s nasákavostí a následným poškozením mrazem problémy. Matrice vlivem mrazu nedegraduje, projde skelným přechodem (-15°C). Aditivní zpracování ale zatím vnáší do materiálu vysokou úroveň porozity.
- Polypropylen se uvádí jako chemicky odolný plast, odolný proti polárním rozpouštědlům, kyselinám, zásadám a solím i za zvýšených teplot.
- Tepelná odolnost – Samotná PP matrice je stabilní do teploty 100°C, při plnění vlákny nebo minerály se teplota zvyšuje na 140-150°C. Lisovaný materiál má podle ČSN EN ISO 11925-2 požární odolnost Bfl-s1 a byl používán jako krytina.

(ViaAlta, 2016, L.Běhálek, 2015)

Otázka č.4

- **Jak je to s případným dlouhodobým vývojem mechanických vlastností Polybetonu, jeho odolností proti agresivním vlivům prostředí ve stavebnictví a jak by se měla řešit otázka odbourávání samotných odpadů z Polybetonu?**
- Jako každý kompozit je zacházení s odpadem problematické, kvůli obtížné separaci složek pro spalování nebo jiné zpracování. Pro Polybet se vypadá nejvhodnější pyrolýza.
- Recyklace Polybetu je zamýšlena pomocí cirkulárního využití materiálu, degradace PP je nízká a umožňuje opakované použití materiálu pro aditivní výrobu. Je potřeba změnit plnivo, aby nebránilo mletí výtisků.

Otázka č.4

- h