

# Short Paper na první doktorský workshop

Student: Jiří Vele

Školitel: prof. Dr. Henri Hubertus Achten

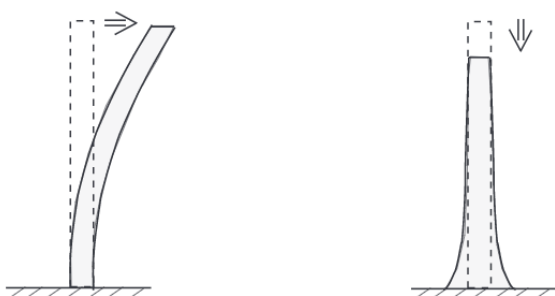
Téma disertační práce: 3D tisk betonu pomocí robotů

## Název příspěvku: Rozdíly 3D tištěného objektu a jeho digitálního dvojčete

**Pilotní studie:** 3D tisk obytné sochy Prvok

**Identifikace problému:** Při tisku betonu dochází ke změně tvaru ještě před jeho zatuhnutím. Vlivem plastického kolapsu, nebo elastického kroucení může dojít až ke zborcení výtisku. Změnou tvaru se výtisk liší od svého digitálního dvojčete a to komplikuje využití 3D tisku betonu ve stavebnictví. Minimalizovat takové změny lze přidáním látek pro zvýšení tixotropity, urychlovače a mikrovlákna. Každá směs se dá popsat pomocí své tisknutelnosti a tvarové stálosti před zatvrdnutím, používá se termín buildability [1]. V současné době se mnoho článků zabývá mapováním těchto tvarových změn, popisem co je způsobuje a jak by se daly redukovat pomocí vylepšeného materiálu, a technologie [2], [3], [4]. Ve své práci bych se rád zabýval vlivem samotné geometrie na tyto tvarové změny a zda by určitým způsobem upravená geometrie pomohla zachovat tvar.

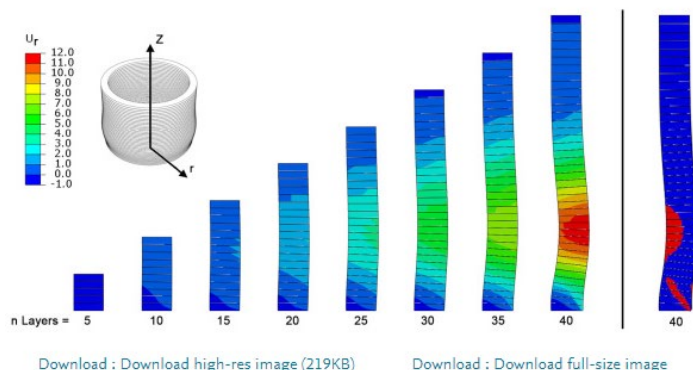
Současný stav poznání:



Elastic buckling

Plastic collapse

Obr. 1: Elastické kroucení a plastický kolaps. Zdroj: [2]



Obr. 2: Tvarové změny se začínají projevovat při příliš velkém zatížení neztuhlé směsi. Zdroj: [3]

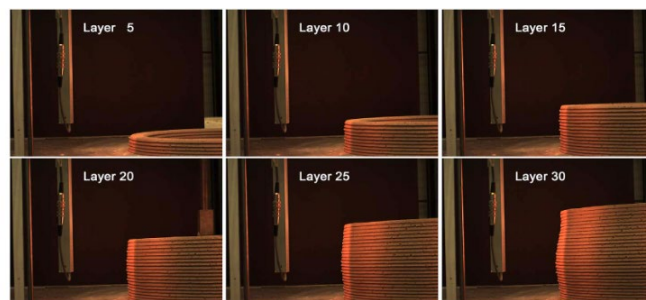
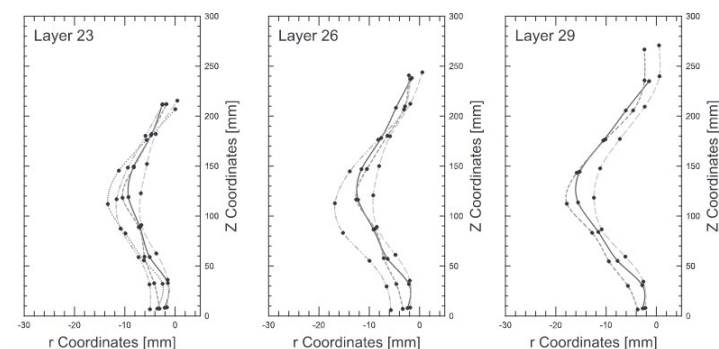


Fig. 23. Deformed shape of a cylinder during the printing process, visualized at 5 to 30 layers.



Obr. 3: Detailně zdokumentovaná míra hroucení. Zdroj: [3]

## Výzkumná otázka:

Lze minimalizovat plastické změny upravením geometrie objektu?

## Strategický cíl:

Umět před tiskem odhadnout, zda dojde k tvarovým změnám a jak případně upravit geometrii tak, aby se minimalizovaly.

**co se má zjistit:** Kdy a jak je třeba upravit geometrii 3D tištěného objektu, aby se nezměnil architektonický výraz, ale aby se minimalizovaly plastické změny.

**vliv proměnných:** velikost tvarové změny v závislosti na úpravu geometrie (v rámci zachování architektonického výrazu). Pro tento výzkum by se používal stejný materiál a zajistila se konstantní rychlost tisku, teplota a vlhkost.

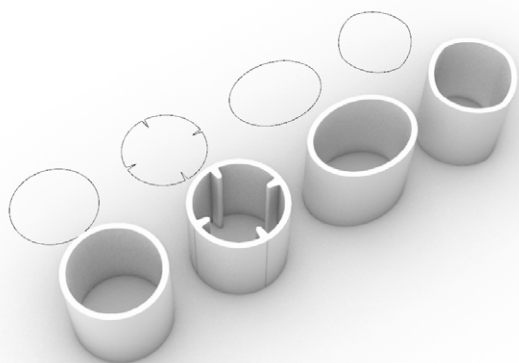
## Taktické cíle:

### 1. Zmapovat, kde v průběhu přípravy dat a tisku dochází ke změně tvaru

Rozdíly mezi digitálním dvojčtem a vytištěným objektem mají více příčin. Kromě sesedání při tisku se data transformují při přípravě k tisku. V softwaru Rhino/Grashopper se matematicky popsané křivky aproximují na systému úseček. Následně si robot upravuje svoji trajektorii tak, aby nemusel příliš zpomalovat, vkládáním takzvaných zón mezi tyto úsečky. Zóny jsou kruhové výseče o poloměru 15 mm, ve kterých se robot pohybuje v blízkosti bodů. Tyto změny jsou minimální a je snadné s nimi počítat ve 3D modelu. Při samotném tisku rozhodují také klimatické podmínky. Cementová směs používaná pro 3D tisk je velice náchylná na změny teplot a vlhkosti. Její optimální rozmezí pro tisk je 20 - 25 stupňů a 40% vlhkosti. Při zvýšení teploty směs může začít tuhnout již v hadici. Z trysky se začne extrudovat méně materiálu, na kterém se objevují praskliny. Při nízké teplotě je zase směs příliš řídká, extruduje se více materiálu a materiál netuhne ani po delší době. To může vést až ke zřícení. Chtěl bych se zaměřit na měření proměnných, které ovlivňují kvalitu směsi [5]. Jmenovitě to je teplota a množství vody ve směsi, rychlost tisku, rychlost pumpy, stáří materiálu a jeho rychlost tuhnutí při tisku. Data by byla sbírána pomocí programovatelné elektroniky a poslána na server. Z naměřených dat bych vytvořil databázi informací z průběhu 3D tisku.

### 2. Tisk a skenování architektonických prvků sloupů a stěn s různou geometrií

Provedu analýzu tisknutelných konstrukcí jako jsou sloupy a stěny a zkusím vytisknout několik vzorků s mírně odlišnou geometrií. Všechny vzorky budou vytištěny ze stejného materiálu, za stejných podmínek, se stejnou dobou tisku jedné vrstvy. Jedinou proměnnou bude geometrie objektu a budu sledovat míru plastických změn.



Obr. 4: Ilustrační model sloupu a případné změny v jeho geometrii, které by mohly zmírnit plastickou deformaci.

### 3. Vytvořit algoritmus pro analýzu geometrie a její případnou úpravu

Pravděpodobně by se jednalo o Plug-in do Rhina/Grashopperu. Tento program je nejčastěji využíván pro 3D tisk betonu pomocí robotů. Ze získaných dat bych rád vytvořil postup pro kontrolu modelu a jeho případnou úpravu ještě před tiskem.

## Metodiky:

Pro cíl 1: Empirická, pozorování

Zkoumaná otázka: kdy vznikají rozdíly mezi modelem a vytištěným objektem (příprava dat, materiál, teplota a množství vody ve směsi, rychlost tisku, rychlost pumpy)

Hodnotící kritéria: kdy vzniká pozorovatelná deformace

Sledované proměnné: změna tvaru tištěného objektu od jeho digitálního dvojčete

Pro cíl 2: Empirická, experiment, pozorování, měření

Zkoumaná otázka: jak moc pomáhá změna geometrie tisknutelnosti objektu?

Hodnotící kritéria: estetické (změna tvaru) funkční (snížení plastické deformace)

Sledované proměnné: vzájemný vztah estetické a funkční kvality

Pro cíl 3: Empirická, experiment, měření

Zkoumaná otázka: Mohly by se poznatky z předešlého měření použít při predikci a analýze?

Hodnotící kritéria: kdy a jak moc bude zapotřebí měnit geometrii architektonických prvků

## Program:

2021: Zmapovat, kde v průběhu přípravy dat a tisku dochází ke změně tvaru

2022: Tisk a skenování architektonických prvků sloupů a stěn s mírně odlišnou geometrií

2023: Analýza naměřených dat a následný tisk objektů s upravenou geometrií

2024: Vytvořit algoritmus pro analýzu geometrie a její případnou úpravu

## Reference:

1) Jayathilakage, R., P. Rajeev a J. G. Sanjayan. Yield stress criteria to assess the buildability of 3D concrete printing [online]. Construction and Building Materials. 2020, 240, 117989. Dostupné z: [10.1016/j.conbuildmat.2019.117989](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117989).

2) Suiker, A.S.J., R.J.M. Wolfs, S. M. Lucas a T.A.M. Salet. Elastic buckling and plastic collapse during 3D concrete printing [online]. Cement and Concrete Research. 2020, 135, 106016. Dostupné z: [10.1016/j.cemconres.2020.106016](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106016).

3) Wolfs, R.J.M., F. P. Bos a T.A.M. Salet. Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing [online]. Cement and Concrete Research. 2018, 106, 103-116. Dostupné z: [10.1016/j.cemconres.2018.02.001](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001).

4) Kruger, Jacques, Seung Cho, Stephan Zeranka, Celeste Viljoen a Gideon van Zijl. 3D concrete printer parameter optimisation for high rate digital construction avoiding plastic collapse [online]. Composites Part B: Engineering. 2020, 183, 107660. Dostupné z: [10.1016/j.compositesb.2019.107660](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107660).

5) Kazemian, Ali a Behrokh Khoshnevis. Real-time extrusion quality monitoring techniques for construction 3D printing [online]. Construction and Building Materials. 2021, 303, 124520. Dostupné z: [10.1016/j.conbuildmat.2021.124520](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124520).