

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

## VÝVOJ HMOT PRO 3D TISK PRVKŮ SPLŇUJÍCÍCH POŽADAVKY DOPRAVNÍCH STAVEB

DEVELOPMENT OF MATERIALS FOR 3D PRINTING OF ELEMENTS MEETING THE REQUIREMENTS  
OF  
TRANSPORT STRUCTURES

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dorota Romanová

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

BRNO 2023

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

## Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav technologie stavebních hmot a dílců
Studentka:	<b>Dorota Romanová</b>
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2022/23
Studijní program:	B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor:	Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Vývoj hmot pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Rychlý rozvoj technologie 3D tisku betonu poskytl stavebnictví koncept, který odpovídá požadavkům Průmyslu 4.0. Přestože v této oblasti probíhá intenzivní výzkum a vývoj, stále zde existují výzvy týkající se technických, ekonomických a environmentálních aspektů 3D tisku cementových kompozitů. Mezi environmentální výzvy patří balíček "Fit for 55", v rámci kterého se EU dohodla, že do roku 2030 sníží emise nejméně o 55 %, a proto bude muset stavební průmysl najít způsoby, jak mimo jiné snížit spotřebu portlandského cementu.

#### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je návrh a testování cementového kompozitu určeného pro 3D tisk prvků splňujících požadavky stanovené v Technických kvalitativních podmínkách staveb pozemních komunikací – Kapitola 18 (TP 18), který využívá alternativní suroviny. V práci proveďte:

- 1.) Zpracujte rešerši stávajícího stavu zaměřenou na složení a sledované vlastnosti cementových kompozitů určených pro aditivní technologie.
  - 2.) Pozornost zaměřte na možnosti snížení uhlíkové stopy spojené zejména se sníženou spotřebou portlandského cementu.
  - 3.) Na základě získaného přehledu proveďte návrh receptur respektující požadavky cirkulární ekonomiky, tj. v rámci formulace receptur využijte vedlejší produkty a další alternativní suroviny.
  - 4.) Experimentálně ověřte základní vlastnosti jemnozrnných cementových hmot pro 3D tisky definovanými parametry (vhodné pro dopravní stavby dle TP 18) a vyhodnoťte.
  - 5.) Dosažené výsledky zpracujte ve formě tabulek a grafů.
- Doporučený rozsah práce 40–50 stran.

Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně / Veveří 331/95 / 602 00 / Brno

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

- [1] Zhang, J. et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 2019, 125, <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105533>.
- [2] Lu, B. et al. A systematical review of 3D printable cementitious materials, *Construction and Building Materials* 2019, 207, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>.
- [3] De Schutter, G. et al. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials, *Cement and Concrete Research* 2019, 112, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- [4] Paul, U., Ch. et al. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction, *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2018, 18, <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 4. 11. 2022

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.  
vedoucí ústavu

---

doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá využitím druhotných surovín ako čiastočnej náhrady portlandského cementu v cementových kompozitoch so zameraním na požiadavky dopravných stavieb. Teoretická časť pozostáva z opisu vstupných surovín ako aj náhrad cementu, sledovaných vlastností 3D tlačených zmesí a popisu charakteristík technológie. Praktická časť je zameraná na experimentálne overenie vybraných vlastností so sledovaním vplyvu dávky polymérnej a bio-polymérnej prísady v navrhnutých receptúrach a následné vyhodnotenie najvhodnejšej z nich pre 3D tlač.

## KLÚČOVÉ SLOVÁ

3D tlač betónu, 3D tlač, aditívne technológie, cementový kompozit, náhrady portlandského cementu, portlandský cement, požiadavky dopravných stavieb, cirkulárna ekonomika

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the use of supplementary cementitious materials as a partial replacement of Portland cement in cement composites, focusing on the requirements of transport constructions. The theoretical part consists of a description of the input raw materials as well as cement substitutes, the studied properties of the 3D printed mixtures and a description of the characteristics of the technology. The practical part is focused on the experimental testing of the selected properties with monitoring of the influence of polymer and bio-polymer additive dosage in the proposed formulations and subsequent analysis of the most convenient one for 3D printing.

## KEYWORDS

3D concrete printing, 3D printing, additive manufacturing, cement composite, supplementary cementitious materials, Portland cement, transport construction requirements, circular economy

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROMANOVÁ, Dorota. *Vývoj hmot pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí doc. Ing. Nikol Žižková, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vývoj hmot pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 26.5.2023

---

Dorota Romanová

Autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vývoj hmot pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26.5.2023

---

Dorota Romanová

Autor práce

## **Pod'akovanie**

Chcela by som sa poďakovať vedúcej tejto bakalárskej práce, doc. Ing. Nikol Žižkovej, Ph.D., za odborný prístup, ochotu, cenné rady, trpezlivosť a podporu pri spracovávaní bakalárskej práce. Taktiež by som chcela poďakovať doc. Ing. Jiřímu Brožovskému CSc, Blanke Bártovéj, Ing. Šárke Keprdovéj, Ph.D. a všetkým zamestnancom ústavu THD za pomoc a odborné rady. A v neposlednom rade by som chcela poďakovať rodine a priateľom za veľkú podporu počas celej doby. Bakalárska práce bola vypracovaná v rámci riešenia projektu TAČR č. CK03000240 s názvom „Vývoj cementových kompozitů a procesních parametrů pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb“.

# Obsah

1 Úvod.....	11
2 Cieľ práce.....	12
3 Teoretická časť.....	12
3.1 Cementové kompozity určené pre aditívne technológie .....	12
3.1.1 Plnivá .....	13
3.1.2 Spojiva .....	13
3.1.3 Prímiesy .....	14
3.1.4 Prísady .....	20
3.2 Požadované vlastnosti .....	23
3.2.1 Reologické vlastnosti.....	23
3.2.2 Tixotropia .....	25
3.2.3 Vytlačateľnosť .....	25
3.2.4 Čerpatelnosť.....	26
3.2.5 Vystaviteľnosť.....	27
3.2.6 Obsah vzduchu .....	28
3.2.7 Mechanické vlastnosti .....	28
3.2.8 Medzi vrstvová súdržnosť.....	29
3.3 Technológia výroby.....	29
3.3.1 3DCP Systémy .....	29
3.3.2 Metódy návrhu optimálneho tvaru a štruktúry .....	31
3.3.3 Rýchlosť tuhnutia/rýchlosť tlače.....	33
3.3.4 Interval kladenia vrstiev .....	33
3.3.4 Nanášacia vzdialenosť.....	34
3.3.5 Možnosti vystuženia .....	34
3.4 On-site printing .....	35
3.5 Ďalšie udržateľné materiály vhodné pro 3D tlač .....	36
3.5.1 Geopolymérne materiály.....	36
3.5.2 Zemité materiály .....	37
3.5.3 Keramické materiály .....	37
3.5.4 Drevné materiály.....	38
3.6 Zásady cirkulárnej ekonomiky v stavebníctve.....	38
3.7 Požiadavky pre dopravné stavby.....	39
4 Praktická časť.....	40
4.1 Schéma skúšania.....	40
.....	40

4.2	Skúšobné metódy .....	40
4.2.2	Konzistencia .....	40
4.2.3	Ultrazvuková analýza .....	41
4.2.3	Obsah vzduchu .....	43
4.2.4	Určenie času tuhnutia .....	45
4.2.5	Stanovenie objemovej hmotnosti – zjednodušený postup.....	47
4.2.6	Stanovenie pevnosti v ťahu a ohybu.....	47
4.2.7	Stanovenie pevnosti v tlaku .....	48
4.3	Vstupné suroviny a návrh zloženia .....	49
4.3.1	Spojivo .....	49
4.3.2	Plnivo .....	50
4.4	Vyhodnotenie .....	52
4.4.1	Ultrazvuková analýza .....	52
4.4.2	Obsah vzduchu .....	52
4.4.3	Určenie času tuhnutia .....	53
4.4.7	Stanovenie objemovej hmotnosti, pevnosti v ťahu a ohybu a pevnosti v tlaku.....	54
5	Diskusia výsledkov .....	56
6	Záver.....	58
7	Zdroje .....	59
	Zoznam obrázkov .....	63
	Zoznam grafov .....	64
	Zoznam tabuliek .....	64
	Zoznam skratiek .....	64

# 1 Úvod

3D tlač betónu (3D concrete printing – 3DCP) ako jeden z hlavných súčasných trendov technologického vývoja v mnohých odboroch prenikla v posledných rokoch aj do oblasti stavebníctva pre vytváranie rôznych modelov a výrobkov, ktoré by inými spôsobmi bolo možné dosiahnuť iba veľmi komplikovane alebo drahoo. V niektorých prípadoch je dokonca 3D tlač (3D printing – 3DP) jediným možným spôsobom výroby. Preto bolo len otázkou času, kedy vo väčšej miere prenikne aj do stavebníctva. Hlavnou prednosťou 3D tlače je úspora materiálu, keďže pri klasickej betonáži sa vyplní aj objem konštrukcie, kde betón nie je potrebný, čo korešponduje s dnešnými požiadavkami na úsporu neobnoviteľných zdrojov surovín, úsporu energie a minimalizáciu odpadu. Ďalšou veľkou výhodou je úspora času a potreba menšieho počtu pracovníkov pri výstavbe. Na druhej strane sú ale potrební vysoko kvalifikovaní odborníci v tomto odbore. V neposlednom rade 3D tlač dovoľuje značnú architektonickú slobodu s možnosťou využitia organických tvarov.

Medzi hlavné výzvy 3D tlačených technológií patrí návrh zmesí. Tie v porovnaní s bežným betónom využívajú vyšší podiel spojivového materiálu, iné frakcie kameniva, podiel jemných častíc a iné prísady – konkrétne prísady upravujúce viskozitu a tixotropiu, najmä polyméry a bio-polyméry, a taktiež vyšší podiel vzduchu. Navrhnuté receptúry musia taktiež spĺňať kľúčové sledované požiadavky a vlastnosti špecifické pre tieto technológie. Ide najmä o reológiu, tixotropiu, čerateľnosť, vytlačiteľnosť, vystaviteľnosť, počiatočné pevnosti, obsah vzduchu, mechanické vlastnosti a medzivrstvovú súdržnosť. Keďže hovoríme o pomerne nových technológiách, tieto sledované vlastnosti nie sú nijako štandardizované ani normalizované.

Požiadavky súčasnej doby vyžadujú prihliadanie na požiadavky cirkulárnej ekonomiky, a teda potrebu zníženia spotreby portlandského slínku náhradou druhotnými surovinami, prípadne portlandského cementu náhradou alternatívnymi surovinami. Táto potreba taktiež súvisí s medzinárodnými klimatickými cieľmi Green Deal, Fit for 55 a Carbon Boarder Adjustment, ktoré požadujú klimaticky neutrálnu výrobu a použitie cementu do roku 2050. Snažia sa teda o dekarbonizáciu celého stavebného cyklu od ťažby surovín cez výrobný proces až po recykláciu.

## 2 Cieľ práce

Cieľom predkladanej bakalárskej je návrh a testovanie cementových kompozitov určených pre 3D tlač prvkov splňujúcich požiadavky stanovené v Technických kvalitatívnych podmienkach stavieb pozemných komunikácií – kapitola 18 (TKP – 18) s využitím alternatívnych surovín. Úlohou práce je teda spracovať rešerš súčasného stavu aditívnych technológií zameranú na zloženie s možnosťou zníženia uhlíkovej stopy znížením spotreby portlandského cementu a sledované vlastnosti cementových kompozitov vhodných pre aditívne technológie.

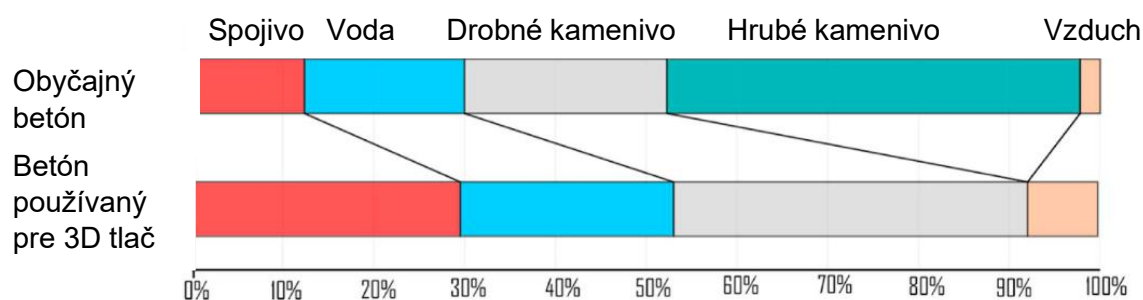
Úlohou praktickej časti je návrh receptúr na základe získaných informácií s prihliadaním na cirkulárnu ekonomiku, a teda využívanie druhotných a alternatívnych surovín ako náhrady portlandského cementu. Následne budú experimentálne overené základné vlastnosti. Namerané a vypočítané hodnoty budú spracované vo forme tabuliek a grafov.

## 3 Teoretická časť

### 3.1 Cementové kompozity určené pre aditívne technológie

Cementové kompozity vhodné pre 3D tlačené technológie sa v porovnaní s bežným liatym betónom líšia najmä zložením, ktoré zabezpečuje vhodné reologické vlastnosti a taktiež čerpatelnosť, vytlačiteľnosť a vystaviteľnosť čerstvej zmesi, ako aj počiatočné pevnosti a medzivrstvovú súdržnosť.

Ako možno vidieť na schéme (pozri obrázok 1), zloženie bežného liateho a 3D tlačeneho betónu sa mierne líši. 3D tlačенý betón obsahuje výrazne väčšie množstvo spojivových materiálov a drobného kameniva, ktoré v súčasnej dobe vo väčšine nahrádza hrubé kamenivo. [1]



Obrázok 1 Porovnanie zloženia obyčajného a 3D tlačeneho betónu [1]

### 3.1 Plnivá

Ako plnivo do betónu využitého v 3D tlačenej technológii sa používa najmä drobné, jemnozrnné, ideálne ťažené kamenivo. Vo veľkej miere sa využíva jemný kremičitý piesok frakcie 0 – 1 mm, prípadne jemné ťažené/drvené kamenivo frakcie 0 – 4 mm. V niektorých prípadoch sa používa kamenivo frakcie 4 – 8 mm, tu však môže dochádzať k nerovnostiam tlačených vrstiev a pretlačovaniu kameniva do spodnej vrstvy. Ďalšími zdrojmi kameniva môže byť recyklovaný piesok, recyklovaný drvený/mletý betón, v prípade jemných častíc taktiež tehlový prach, mletý vápenec alebo popolčeky. Veľkosť zŕn kameniva určuje, či ide o 3D tlačený betón, ktorý je vo všeobecnosti definovaný kamenivom vo frakcii nad 4 mm, zatiaľ čo hmoty s jemnejšími časticami kameniva označujeme 3D tlačenou maltou. [2]

Pri 3D tlačenej technológii je dôležité dodržať plynulú krivku zrnitosti jemných častíc, čo má priamy vplyv na tlačiteľnosť danej zmesi. Zmesi s plynulou krivkou zrnitosti dosahovali lepšiu medzu klzu a nižšiu viskozitu v porovnaní so zmesami, ktoré mali v krivke zrnitosti medzery. Jemnosť kameniva, krivka zrnitosti a veľkosť častíc ovplyvňujú ďalšie vlastnosti materiálu. Pridaním väčšieho množstva jemných podielov sa zvyšuje medza klzu, čo zlepšuje tvarovú stálosť. Naopak, znížením podielu jemných častíc je dosiahnutá jednoduchšia vytlačiteľnosť, avšak zväčšením častíc kameniva môže spôsobiť medzery v tlači, slabšie väzby a nižšiu medzu klzu. [3][4][5]

#### 3.1.2 Spojiva

##### **Cement**

ČSN EN 197 – 1 uvádza nasledujúce skupiny (pozri obrázok 2):

##### Rozdelenie podľa zloženia:

- CEM I – portlandský cement,
- CEM II – portlandský cement zmesný,
- CEM III – vysokopecný cement,
- CEM IV – pucolánový cement,
- CEM V – zmesný cement.

##### Rozdelenie podľa množstva prímеси:

- A – 6 – 20 %,
- B – 21 – 35 %.

##### Rozdelenie podľa konkrétneho druhu prímеси:

- K – slínok,
- S – vysokopecná troska,
- D – kremičitý úlet,
- P – prírodné pucolány,
- V – kremičité popolčeky,
- W – vápenaté popolčeky,

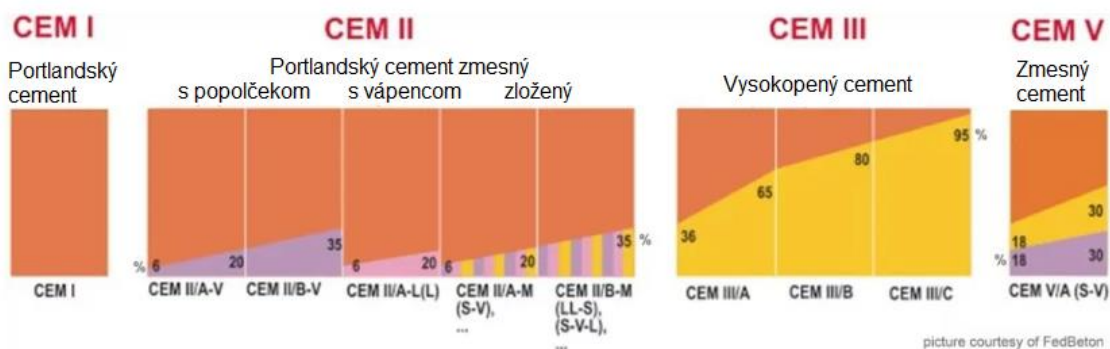
- T – kalcinované íly,
- LL,L – vápenec.

Rozdelenie podľa pevnosti (MPa po 28 dňoch):

- 32,5,
- 42,5,
- 52,5.

Rozdelenie podľa vývoja počiatkových pevností:

- N – normálny,
- R – rýchly,
- L – pomalý. [6]



Obrázok 2 Zloženie tried cementov [6]

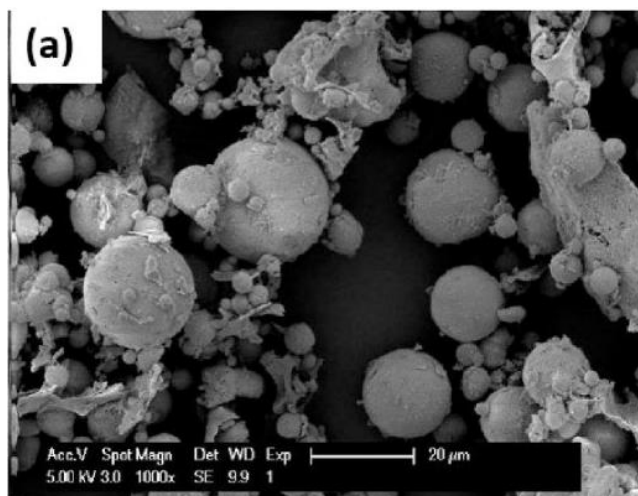
### 3.1.3 Prímiesy

#### Popolčeky

Popolček je zrnitý anorganický materiál s puzolánovými vlastnosťami, získavaný elektrostatickým alebo mechanickým odlučovaním z plynov spaľovaní, vykurovaných práškovým uhlím spolu so spoluspaľovanými materiálmi (drevotrieska, kaly,...) alebo bez nich. Je to jemný prášok tvorený prevažne z guľovitých sklovitých častíc a skladá sa vo veľkej miere z oxidov  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , pričom dôležitý je obsah aktívneho oxidu kremičitého a oxidu hlinitého. Podľa ČSN EN 450 – 1: 2013 obsah aktívneho oxidu vápenatého musí byť väčší ako hmotnostných 10 %. Obsah aktívneho oxidu kremičitého v kremičitom popolčeku nesmie byť menší ako hmotnostných 25 %.

Popolčeky majú premenlivé chemické, mineralogické a granulometrické zloženie, ktoré závisí od druhu a lokality spaľovaného uhlia, spaľovacieho procesu a spôsobu odlučovania z exhalátov. Zrornosť popolčekov potom závisí od použitých odlučovačov. Z mechanických odlučovačov sú popolčeky výrazne hrubšie (zrná väčšie ako 0,09 mm sú obsiahnuté v množstve nad 20%, sypná hmotnosť je v rozmedzí 900 – 1200  $\text{kg/m}^3$ ) ako z elektrostatických odlučovačov (zrná väčšie ako 0,09 mm sú obsiahnuté v množstve výrazne pod 20 %, sypná hmotnosť je okolo 800  $\text{kg/m}^3$ ). Popolčeky môžu mať vzhľadom

k lokalite spaľovania väčšiu alebo menšiu pravdepodobnosť výskytu rádioaktívneho  $^{226}\text{Ra}$ . [7]



Obrázok 3 Mikroskopicky 1000 x zväčšené zrná popolčeku [1]

Vzhľadom k zloženiu uhlia, ktorého sú popolčeky vedľajším produktom, rozdeľujeme lietavé popolčeky na kremičité (trieda F) a vápenaté (trieda C). V porovnaní s kremičitými, vápenaté popolčeky obsahujú väčšie množstvo reaktívneho CaO. V 3D tlačnej technológii sa preto využívajú kremičité popolčeky, ktoré sú v súčasnosti používané ako hlavná náhrada portlandského cementu. [8]

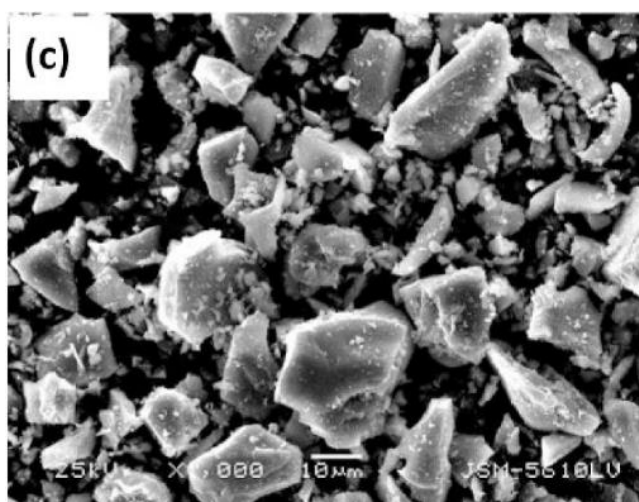
Popolčeky je možné použiť ako náhradu za portlandský cement v objeme až 80 %. Gulovitý tvar a hladký povrch zrn popolčeku (pozri obrázok 3) zabezpečuje zníženie medze klzu a viskozity, čím zlepšuje tekutosť a tiež čerpatelnosť čerstvej zmesi. Na druhej strane však môžu nevyhorené zvyšky uhlia v popolčekoch adsorbovať veľké množstvo superplastifikátoru alebo zámesovej vody, čo môže zhoršiť alebo zmeniť spracovateľnosť, konkrétne čerpatelnosť. Popolčeky vykazujú podobnú alebo relatívne hrubšiu veľkosť častíc a menšiu hustotu ako portlandský cement. Použitie veľkého množstva popolčeku ako náhrady spojiva by mohlo viesť k výraznému riediacemu efektu, čo by malo nepriaznivý vplyv na vnútornú štruktúru a oneskorenie počiatočného tuhnutia a skorej hydratácie. Pre zlepšenie vnútornej štruktúry týchto miešaných zmesí sa využívajú ďalšie náhrady cementových materiálov ako mikrosilika, ktoré potom tvoria systém troch spojív (cement – popolček – mikrosilika) pre 3D tlačné cementové zmesi. Je nutné podotknúť, že náhrada veľkého množstva portlandského cementu popolčekom (nad 50 %) môže mať za následok potrebu alkalizácie zmesi pre optimalizáciu procesu tuhnutia a tvrdnutia. Všeobecný prístup k aktivácii spojív na báze popolčekov zahŕňa: mletie (zvýšenie merného povrchu a jemnosti), pridaním malého množstva vysoko reaktívneho materiálu ako napríklad

mikrosiliky alebo pridanie určitej dávky chemického aktivátora (síran sodný pre zlepšenie počiatkových pevností). [7][8]

### **Struska**

Vysokopecná struska je definovaná ako sklovitý, granulovitý materiál, ktorý vzniká ako pevný odpad z hutníckej výroby, vyteká nálevovým žľabom do spevňovacieho žľabu, kde sa napení a rýchlo schladí vodou. Hlavnými komponentmi vysokopecnej strusky sú 42 % CaO, 38 % SiO<sub>2</sub>, 10 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 2 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 6 % MgO a 2 % MnO, vďaka ktorému strusku v betóne detegujeme. Vysokopecná struska sa vo veľkom používa ako náhrada cementov pre jej dobré mechanické vlastnosti a odolnosť. [9]

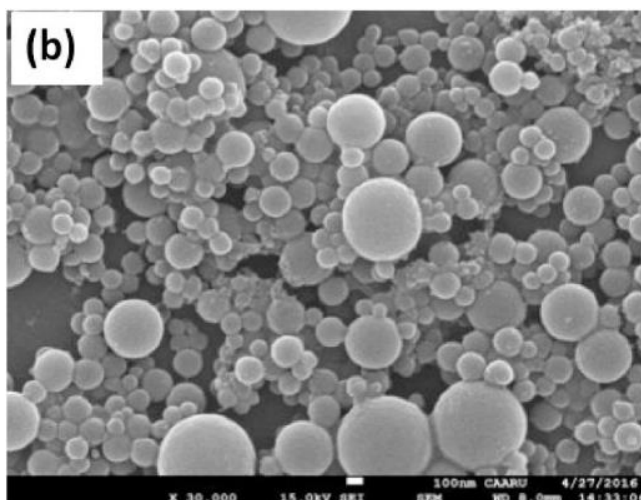
Granulovaná vysokopecná troska je často využívaná ako hodnotná udržateľná náhrada cementu. Pre dosiahnutie lepšej reaktivity je troska najskôr mletá až do jemnosti porovnateľnej s cementovými časticami. Vďaka jej latentne hydraulickým vlastnostiam a jemnosti mletia môže byť granulovaná vysokopecná troska použitá ako náhrada až 95 % slínku v CEM III/C cemente podľa EN 197-1. Dopad vysokopecnej trosky na reologické vlastnosti čerstvej zmesi vo veľkej miere závisí na jej fyzikálnych a chemických vlastnostiach. V porovnaní s portlandským cementom jej hladký povrch častíc (pozri obrázok 4) a nízka reaktivita môže zlepšiť spracovateľnosť, čo však spôsobuje zníženie plastickej viskozity a/alebo medze klzu. Na druhej strane požiadavky na vodu a superplastifikátor sa použitím vysokopecnej trosky zvyšujú kvôli jej veľkému špecifickému povrchu a chemickej reaktivite. V súčasnosti je len málo pokusov pre vytvorenie pre vytvorenie cementových materiálov s využitím vysokopecnej trosky pre 3D tlač. [10]



Obrázok 4 Mikroskopicky zväčšené zrná trosky [1]

### **Mikrosilika**

Mikrosilika vďaka veľmi jemným časticiam, okrúhlemu tvaru (pozri obrázok 5) a veľmi veľkým perným povrchom ( $15 - 30 \text{ m}^2/\text{g}$ ) vyplňa priestor medzi ostatnými časticami cementu, čím zvyšuje hustotu a súdržnosť. Použitím mikrosiliky ako náhrady portlandského cementu sa zvyšuje pomer vody a superplastifikátoru a vnútorného trenia častíc. Použitie mikrosiliky môže za určitých okolností zvýšiť alebo znížiť medzu klzu a plastickú viskozitu, čo je spôsobené primárne rozdielnymi fyzikálnymi charakteristikami (povrch častíc, hustota a morfológia) a rôznemu množstvu použitej mikrosiliky. Ďalej je efekt mikrosiliky na reologické vlastnosti závislý na vodnom súčiniteli a type superplastifikátoru.



Obrázok 5 Mikroskopicky zväčšené zrná mikrosiliky [1]

Mikrosilika sa v technológii 3D tlače používa ako súčasť zmesných cementov a ako podiel ultrajemných častíc, kde môže byť pridaná až do 20%. V tomto kontexte môže mikrosilika vylepšiť tekutosť konzistencie čerstvej zmesi pre vytlačanie a zlepšiť vystaviteľnosť a štruktúru vďaka jej veľmi jemným časticiam a efektu mikrovýplne. [10]

### **Mikromletý vápenec**

Mikromletý vápenec sa podľa ČSN EN 206-1 klasifikuje ako minerálne plnivo, ktoré sa získava mletím drteného vápenca. Obsah  $\text{CaCO}_3$  v surovine musí byť väčší ako 75 % a obsah ílových minerálov nesmie prekročiť 1,2 %. Čo sa týka granulometrie, musí spĺňať požiadavku na prepad sitom 0,063 mm väčší ako 70 %. Podobne ako u trosky alebo mikrosiliky je efekt vápenca na reologické vlastnosti betónovej zmesi závislý na fyzikálnych vlastnostiach častíc vápenca, ako napríklad jemnosť mletia a hrubosť povrchu zrna. Tieto materiálové charakteristiky majú veľký vplyv na objemovú hmotnosť a spotrebu vody a superplastifikátoru. V prípade, že je vápencová múčka jemnosťou mletia zrovnateľná s cementom, môže pridanie vápenca zlepšiť spracovateľnosť znížením medze klzu

a plastickej viskozity. Naopak, parametre ako medza klzu a plastická viskozita môžu byť zvýšené použitím ultrajemne mletého vápenca, ktorého jemné častice absorbujú vodu a superplastifikátor a tiež zvýšia vnútorné trenie častíc. Rovnako cementová flokulácia môže byť zlepšená a zrýchlená so zmenšujúcou sa veľkosťou častíc vápenca (pre fixné množstvo vápenca) alebo s jeho zvyšujúcim sa množstvom (pre fixnú jemnosť mletia vápenca). Hlavným dôvodom pre použitie vápenca na hydratáciu cementu môže byť jeho schopnosť pôsobiť ako mikro filler, čo zapríčiňuje dva mechanizmy: znižovanie podielu cementu a zvýšenie nukleácie zabezpečenej povrchom vápenca. Náhrada časti portlandského cementu vápencom môže urýchliť začiatkové štádiá hydratácie, špeciálne ak priemerná veľkosť zrna vápenca je veľmi jemná spôsobuje zvýšenie nukleácie. Môže to však ovplyvniť mechanické vlastnosti a zvýšenie porozity zatvrdnutej cementovej zmesi v prípade náhrady portlandského cementu väčším podielom ako 20 %. Mnohé návrhy cementových zmesí však používajú zmes vápenca a jednej alebo dvoch ďalších náhrad cementu, ako je napríklad troska, mikrosilika alebo kalcinované íly. [1][10][11]

### **Kalcinované íly**

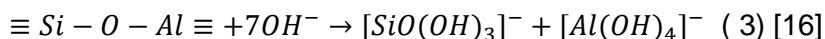
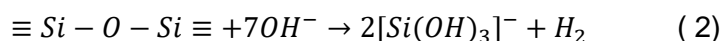
Používanie kalcinovaných ílov ako náhrady cementových materiálov pritiahla v poslednej dekáde značnú pozornosť. Výhody používania kalcinovaných ílov ako náhrady portlandského cementu môžu byť sumarizované nasledovne:

- Íly ako surovina sú vo svete široko rozšírené. Ako najvhodnejší typ, kaolínové hliny sa najčastejšie vyskytuje v tropických a subtropických podnebiach, hlavne v Indii a juhovýchodnej Ázii. [13]
- Proces kalcinovania vyžaduje menšiu spotrebu paliva a produkuje omnoho menej CO<sub>2</sub> v porovnaní s produkciou slínku. Pri výrobe 1 kg kalcinovaného ílu sa vyprodukuje len 0,25 – 0,37 kg CO<sub>2</sub>, čo je ďaleko menej ako pri výrobe 1 kg slínku, ktorá vyprodukuje až 0,9 kg CO<sub>2</sub>. Teplota horenia pri výrobe kalcinovaných ílov dosahuje 700 – 850 °C čo je v porovnaní s produkciou slínku 1450 °C výrazne menšia hodnota. Čas výpalu môže byť kontrolovaný každú desatinu sekundy pomocou kalcinačných horákov a senzorov.
- Zmesi, ktoré obsahujú vápno, kalcinované íly a slínok boli predmetom mnohých výskumov. Jedným z najčastejšie používaných je zmes 50 % portlandského slínku, 15 % vápno, 30 % kalcinované íly a 5 % sádry. [8]

Metakaolín je primárnou reaktívnou fázou v kalcinovaných íloch, tvorí aj kalcinovaný produkt vysokej čistoty. Metakaolín je však ekonomicky relatívne náročný (3-krát drahší ako cement), a preto je vo všeobecnosti viac využívaný v iných odvetviach, akými sú produkcia papiera a keramiky. Podľa štúdií [14][15] môže byť použitím kalcinovanej kaolínovej hliny

nižšej triedy (obsah metakaolínu 40 %) v cemente dosiahnutá 7-dňová pevnosť v tlaku porovnateľná s čistým portlandským cementom [14][15]. Tieto kalcinované kaolínové hliny nižších tried sú taktiež dobrým a lacným zdrojom pre produkciu cementu a pravdepodobne v blízkosti lomov cementových surovín.

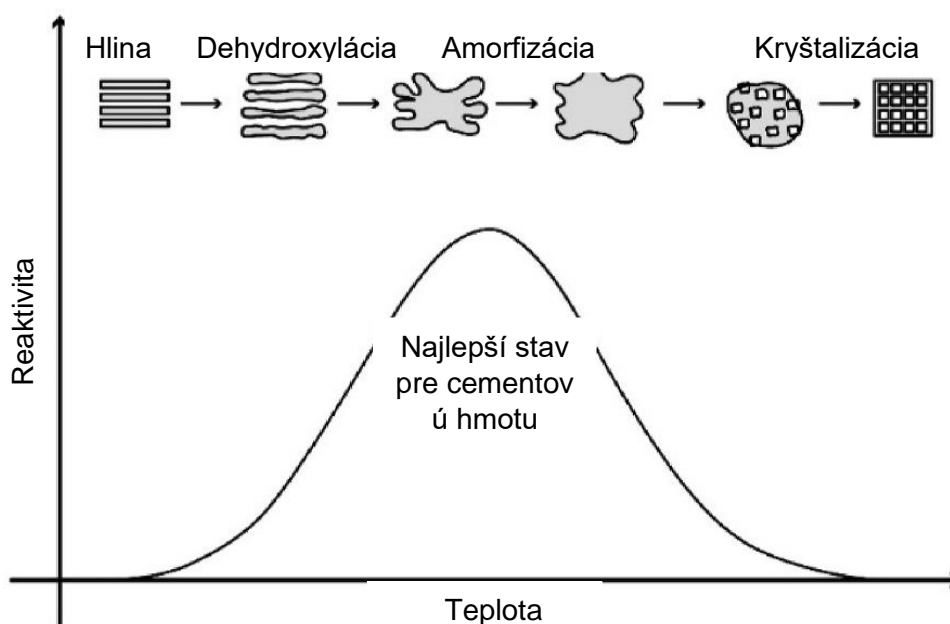
Dochádza k reakciám:



Produkty týchto reakcií môžu vyplniť póry a tým znížiť celkovú porozitu. Prispievajú k zlepšeniu pevnosti a odolnosti zatvrdnutého cementového materiálu, napríklad odolnosť voči chloridom a síranom. Pridanie kalcinovaných ílov ako náhrady portlandského cementu môže viesť k zhoršeniu spracovateľnosti čerstvých betónových zmesí, čo zapríčiní zvýšenie dávky vody a superplastifikátoru. Tieto dopady na reologické vlastnosti čerstvej zmesi sú veľmi závislé na type kalcinovaného ílu, ktorý bol použitý. Kalcinované íly dodávané od rôznych výrobcov môžu vykazovať rôzne fyzikálne a chemické charakteristiky, napríklad rôzny podiel metakaolínu, ktorý môže kolísať v rozmedzí 40 – 90 %, sekundárne fázy (vápenec, hlina,...), jemnosť mletia, morfológia a objemová hmotnosť. Tieto rozdiely môžu byť spôsobené rozdielnymi počiatočnými surovinami, metódami kalcinácie (zariadenie, teplota), procesom chladenia a mletia. Napríklad kalcinované íly, ktoré obsahujú kremeň (aj v malom množstve), vedia znížiť spotrebu vody a plastifikátoru. Kalcinačné metódy a metódy mletia môžu ovplyvniť morfológiu. Sférické metakaolínové častice, ktoré boli vyrobené výpalnou kalcinačnou metódou navrhnutou Claverie [17], môžu zlepšiť spracovateľnosť čerstvej cementovej zmesi. Na druhej strane Akhlaghi [18] predstavil modifikovaný superplastifikátor na báze PCE, ktorý efektívne disperguje zmesi, ktoré obsahujú vysoký podiel kalcinovaných ílov a sírových iónov. Tieto superplastifikátory môžu byť ideálnou možnosťou pre multikomponentné cementové zmesi. Kalcinované íly sú taktiež dobrou zložkou pre štruktúrne zloženie čerstvých zmesí, čo môže byť považované za výhodu pre vývoj cementových materiálov vhodných pre 3D tlač na báze kalcinovaných ílov. Pridaním kalcinovaných ílov sa môžu zlepšiť reologické parametre, index vnútorného trenia, viskozity, súdržnosti a čerstvých mált. Zlepšenie vnútornej štruktúry môže byť hlavným atribútom vysokého merného povrchu a vrstvenej štruktúre častíc. Avšak, ako bolo spomenuté vyššie, použitie rôznych kalcinovaných ílov môže spôsobiť rôzne výsledky

vnútornej štruktúry čerstvej zmesi. Tiež prítomnosť nekalcinovaného kaolínu môže ovplyvniť vnútornú štruktúru.

V súčasnosti je využitie kalcinovanej hliny alebo metakaolínu ako náhrady za portlandský cement v receptúrach pre 3D tlač stále limitované. Je známych iba niekoľko prípadov. Podľa niektorých štúdií [19][20] bolo použité malé množstvo metakaolínu (do 5 %) pre modifikáciu vnútorného trenia 3D tlčenej receptúry. Bohuchval [21] skúšal účinok rôznych dávok metakaolínu (6 %, 12 % a 20 % cementu) na reológiu a stlačiteľnosť čerstvej hmoty. Za optimálnu náhradu cementu pre zlepšenie medze klzu, súdržnosti, zlepšenie tlačiteľnosti a zníženie vodného súčiniteľa bola navrhnutá zmes 24 % popolčeku a 6 % alebo 12 % metakaolínu. Medzi ďalšie návrhy patrí náhrada až 60 % portlandského cementu vápencom a kalcinovaným ílom v pomere 1:2. Účinok miešania rôznych tried kalcinovaných ílov mal vplyv na 3D tlačiteľnosť, pevnosť v tlaku a hydratáciu. Zvyšovaním podielu kalcinovaných ílov vyšších tried boli výrazne zlepšené vlastnosti ako tekutá konzistencia, vnútorné trenie



Obrázok 6 Reaktivita kalcinovaných ílov vplyvom teploty [15]

a vystaviteľnosť. Začiatková hydratácia bola mierne zrýchlená a zlepšená, zatiaľ čo čas vhodný na tlačenie bol skrátený a medzivrstvová súdržnosť zhoršená [13][15][19][20][21].

### 3.1.4 Prísady

#### **Plastifikátory a superplastifikátory**

Plastifikátory sa vo všeobecnosti používajú z viacerých dôvodov. Hlavným benefitom je výrazne zlepšená spracovateľnosť pri znížení vodného súčiniteľa o viac ako 5 %, čo je dobrým predpokladom pre zníženie dotvarovania a zmršťovania. Ďalším benefitom zníženia vodného súčiniteľa je zvýšená pevnosť a trvanlivosť betónu bez použitia intenzívnej vibrácie pri zhutňovaní.

Superplastifikátory sú svojím zložením prispôsobené používaniu pri výrobe prefabrikátov, kde využívame ich schopnosť znižovať vodný súčiniteľ o viac ako 12 %, až do 30 – 35 % a rýchly nárast počiatkových pevností bez pôsobenia tepla. Ďalej sa využívajú pri výrobe transport betónu vďaka predĺženiu doby spracovateľnosti, pre vysoko hodnotové betóny (zníženie vodného súčiniteľa) a pre samozhutniteľné betóny (vysoká tekutosť čerstvého betónu a vylúčenie segregácie). [22]

Plastifikátory a superplastifikátory môžeme podľa chemického zloženia rozdeliť na skupiny organických zlúčenín:

- LS – soli alebo deriváty ligninosulfátov,
- PC – polykarboxyláty (polykarboxietér),
- SNF – sulfonované naftalénformaldehydové kondenzáty,
- SMF – sulfonované melaminformaldehydové kondenzáty,
- CAE – kopolymery karboxyakrylové kyseliny. [22]

V prípade 3D tlače využívame superplastifikátory najmä pre zlepšenie čerpatelnosti malty alebo hmoty na báze cementu, ktorá je pre 3D tlač kľúčová. Je však nutné dodržiavať správne dávkovanie pre zabezpečenie správnej plastickej viskozity a reologických vlastností, ktoré nie je možné dosiahnuť pri nedostatočnej alebo nadmernej dávke, kedy má superplastifikátor minimálny účinok. Vhodná dávka superplastifikátora závisí na jeho mineralogickom zložení a molekulovej štruktúre, kedy sa dávky u rôznych superplastifikátorov líšia (polykarboxylové a polyfosfátové superplastifikátory vyžadujú menšiu dávku, napríklad naftalénové) a na vodnom súčiniteli, kde nie je pozorovaný výrazný rozdiel medzi rôznymi druhmi. Je tiež nutné dodržať kompatibilitu daného plastifikátora s použitým typom cementu. U veľmi nízkych vodných súčiniteľoch ako 0,20 už nie je možné použiť superplastifikátory na báze polyméru (polynaftalén sulfát na báze polyméru), pretože už nedochádza k zmene reologických vlastností. Rôzne molekulové usporiadanie superplastifikátorov má za následok rôzne reologické parametre, plastickejšiu viskozitu, efektívnu, citlivosť na dávkovanie, segregáciu a kompatibilitu s rôznymi materiálmi na báze cementu.[22][23][24]

### **Prísady urýchľujúce tuhnutie**

Urýchľovače tuhnutia sú prísady, ktoré skracujú dobu, za ktorú prejde čerstvý betón z plastickeho do tuhého stavu. Tieto prísady nesmú podľa ČSN EN 934 spôsobiť pokles 28 denných pevností v tlaku nižšie ako 80 % referenčného betónu bez prísady. 90 denné pevnosti už ale musia byť rovnaké u oboch betónov. Všeobecne má byť doba tuhnutia dlhšia ako 30 minút pri teplote 20 °C. Toto kritérium však neplatí pre prísady použité do zmesi pre 3D tlač, kde musia byť nábehy tuhnutia v priebehu niekoľkých minút (požadované

rýchlosť nábehov závisí od intervalu kladenia vrstiev), aby bolo umožnené kladenie ďalších vrstiev. [22][25]

Urýchľovače zamerané najmä na hydratáciu silikátov môžu vykazovať určité obmedzenia pre aditívne technológie, pretože na dosiahnutie dostatočne rýchleho nárastu pevnosti pri aditívnej výrobe by bolo potrebné veľmi vysoké množstvo, ktoré by mohlo narušiť reologické vlastnosti alebo trvanlivosť. Preto kategóriou urýchľovačov, ktorá vykazuje vhodné vlastnosti pre tlačiteľný betón, sú urýchľovače striekaného betónu. V prípade striekaného betónu sa zvyčajne pridávajú do trysky zariadenia počas striekania, čo umožňuje veľmi rýchle tuhnutie hneď po striekaní a nanesení betónu na povrch steny. Silikátové a hliníkové soli patria medzi najčastejšie používané typy urýchľovačov 3D tlačeneho betónu. Ako prvé sa začali používať silikáty, ktoré však majú nižšiu účinnosť ako výrobky na báze hliníka. Tie sa delia do dvoch tried: alkalické a bezalkalické výrobky. Bezalkalické urýchľovače svojou vysokou koncentráciou hliníka a síranov podporujú zrážanie etringitu, čo spôsobuje rýchlu flokulačnú reakciu systému a umožňuje ukladanie vrstiev. [24]

### ***Stabilizačné prísady***

Stabilizačné prísady sa využívajú najmä pre zabránenie bleedingu, a teda odmiešavanie vody zo suspenzie a sedimentácie tuhých častíc. Medzi hlavné požiadavky na stabilizačné prísady patrí pokles pevností betónu s prísadou maximálne na 80 % pevností referenčného betónu bez prísady. Zároveň musí dôjsť k redukcii minimálne 50 % odľučovanej vody. [22]

### ***Prísady upravujúce viskozitu a tixotropiu***

Prísady upravujúce viskozitu (viscosity modifying agents - VMA) sa bežne používajú v priemyselnej praxi na reguláciu presunu vody a pórovitej štruktúry v čerstvom aj stvrdnutom stave. Najčastejšie používanými VMA v cementových materiáloch sú deriváty celulózoového éteru, napríklad welanová guma a diutanová guma, označované tiež ako biopolyméry. Polyakrylamidy so záporným nábojom sa používajú v stavebníctve pre ich vysokú flokulačnú účinnosť. Takéto prímеси sú nevyhnutné na reguláciu rizika segregácie vysoko tekutých betónov, na zlepšenie zadržiavania vody a v niektorých prípadoch na podporu flokulácie častíc, napríklad pri aplikáciách striekaného betónu. VMA môžu zvýšiť medzu klzu cementových materiálov a účinne znížiť deformáciu materiálu pod vlastnou váhou, čo je kľúčové pre aditívnu výrobu betónu. [24]

Väčšina VMA je schopná sa súčasne adsorbovať na niekoľko častíc cementu a premostiť ich, čo do určitej miery zvyšuje makroskopickú medzu klzu suspenzie. Ich účinnosť ako flokulantov závisí od ich molekulovej hmotnosti a schopnosti spojiť sa s povrchom cementu. Napríklad VMA s nízkou molekulovou hmotnosťou nie sú schopné adsorbovať sa na viacerých časticiach a môžu byť príčinou zníženia medze klzu prostredníctvom sterického

odpuďzovania. Podľa Tadrosa [26] je povrch častíc pokrytý polymérom kľúčovým parametrom na reguláciu účinnosti polyméru. Konkrétne pri adsorpcii VMA sa optimálna premostňujúca flokulácia dosahuje pri polovičnom pokrytí povrchu. Aj Bessaies-Bey et al. [27] dokázali, že adsorpciu polyakrylamidu zvyšuje jeho záporný náboj, zatiaľ čo adsorpcia éteru celulózy klesá, keď sa zvyšuje priemerný počet substituovaných hydroxylových skupín na jednotku glukózy (t. j. stupeň substitúcie). V oboch skúmaných prípadoch v cementových pastách sa medza klzu zvyšuje s molekulovou hmotnosťou VMA. Okrem toho sa porovnaním začiatku toku cementových pást obsahujúcich polyakrylamid a celulóзовé étery zistilo, že pasty obsahujúce polyakrylamid vykazujú vyšší modul pružnosti. Polyakrylamid preto obmedzuje deformáciu uloženého materiálu pod vlastnou váhou, čím sa stáva najvhodnejším VMA pre tlačiarenský betón. [24][26][27]

### ***Odpeňovacie prísady***

Odpeňovacie prísady sú využívané na vytesnenie vzduchu z čerstvej betónovej zmesi v procese miešania, dopravy aj hutnenia. Odpeňovacie prísady majú viac dopadov na čerstvú betónovú zmes. Vytesnením vzduchu dochádza ku zvýšeniu hutnosti zatvrdnutého betónu, čo môže viesť k vyšším pevnostiam. Zvýšená hutnosť má za následok taktiež zvýšenú mrazuvzdornosť a odolnosť betónu. Najčastejšie sa však táto prísada používa pre dosiahnutie hladkého povrchu bez pórov, najlepšie sa použitie prísady prejaví pri betonáži zvislých vysokých stien, kde je vypudenie pórov náročné. Vyššia hutnosť a hladký povrch prispievajú k odolnosti proti tvorbe vápenných výkvetov. Ďalším benefitom odpeňovacej prísady je možnosť vysokorýchlostného miešania betónovej zmesi bez vnášania vzduchu vplyvom našľahania alebo napenenia.

Odpeňovacie prísady sa vyrábajú v práškovej alebo kvapalnej forme z látok na báze esterov minerálnych kyselín, polyglykolov a mastných kyselín. Odpeňovacie prísady nachádzajú najväčšie uplatnenie pri výrobe tekutých betónov, zvlášť pri použití plastifikátorov na báze polykarboxilátov. Pri miešaní plastifikovaných zmesí sa do nich vnáša veľké množstvo vzduchu, ktoré je nutné zo zmesi vytesniť. Odpeňovacie prísady taktiež vplyvajú na zníženie viskozity a bránia segregácií zmesi. [28]

## **3.2 Požadované vlastnosti**

### **3.2.1 Reologické vlastnosti**

Materiály vhodné pre tlač sa podobne ako iné cementové materiály správajú približne ako viskoplastické Binghamove materiály. Tečú len vtedy, keď sú vystavené vyššiemu napätiu ako kritická prahová hodnota  $\tau_c$ , ktorá sa nazýva medza klzu napätia. Keď tečú, vykazujú viskózne správanie a rýchlosť šmyku je úmerná napätiu presahujúcemu medzu klzu cez konštantu  $\mu_p$ , ktorá sa nazýva plastická viskozita. Pri väčšine tlačiarenských procesov tieto

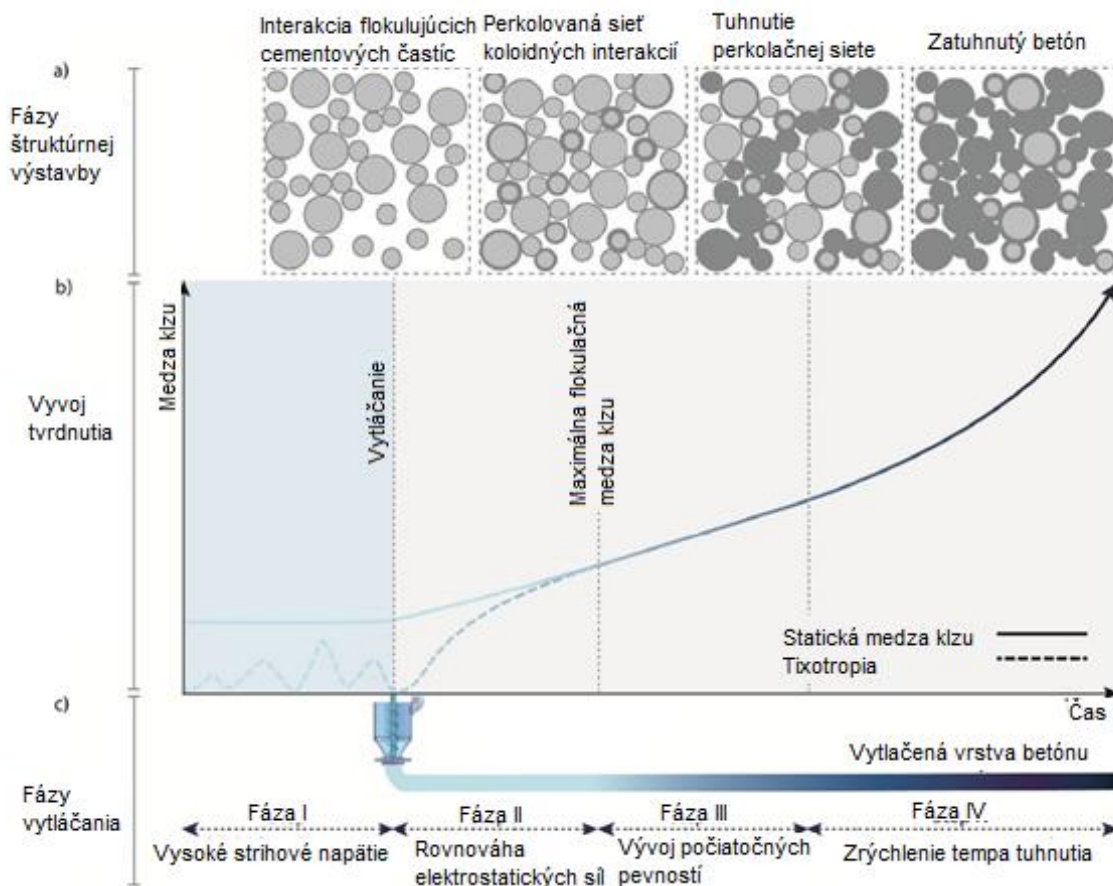
materiály tečú len krátko, počas fázy čerpania/podávania a ukladania. Viac ako ich viskoplastické správanie pri prúdeaní je preto dôležité ich elasto-plastické správanie. Pod medzou klzu tieto materiály vykazujú elastické správanie (pozri obrázok 7). Ich modul pružnosti v šmyku možno vyjadriť ako:

$$G = \tau C / \gamma C \quad (4)$$

Pričom  $\gamma_c$  je kritická šmyková deformácia pri začiatku toku. Tixotropia týchto materiálov a ich schopnosť vytvárať vnútornú štruktúru v pokoji je kľúčová vo väčšine tlačových aplikácií. V čase, keď je materiál ukladajú, vykazujú počiatočnú medzu klzu  $\tau_{c0}$ , počiatočnú kritickú šmykovú deformáciu  $\gamma_{c0}$  a počiatočný modul pružnosti v šmyku  $G_0$ . Tieto reologické parametre sa možné meniť a experimentálne výsledky ukazujú, že zatiaľ čo  $\tau_c(t)$  a  $G(t)$  sú rastúcou funkciou času,  $\gamma_c(t)$  sa znižuje s časom v pokoji. Materiál sa stáva nielen pevnejší (vyššia medza klzu), ale aj tuhší (vyšší modul pružnosti).

Schopnosť typického materiálu na báze cementu vykazovať medzu klzu a vytvárať štruktúru (pozri obrázok 7) pochádza z mikroštruktúrneho hľadiska a z jeho schopnosti zhlukovania (flokulácii) častíc cementu v dôsledku elektrostatického priťahovania kladne a záporne nabitých povrchov zrn cementu. V priestoroch medzi zrnami cementu je pritom zadržovaná časť zámesovej vody. Je to proces, pri ktorom dochádza k vytváraniu zárodkov skorých hydrátov v pseudokontaktných bodoch medzi zrnami cementu vo flokulačnej štruktúre vytvorenej cementovými zrnami. Na konci fázy miešania sú častice cementu rozptýlené v zmesi. V dôsledku koloidných príťažlivých síl častice cementu flokulujú a vytvárajú sieť vzájomne sa ovplyvňujúcich častíc schopných odolávať namáhaniu a vykazujú počiatočný modul pružnosti  $G_0$  a počiatočnú medzu klzu  $\tau_{c0}$ . Táto fáza sa označuje ako flokulácia. Pri nej sa prejavuje medza klzu a pružné správanie cementovej suspenzie v priebehu niekoľkých sekúnd po zastavení toku. Materiál sa ďalej reorganizuje počas niekoľkých desiatok až niekoľko stoviek sekúnd pred dosiahnutím konečnej konfigurácie siete vzájomne sa ovplyvňujúcich cementových častíc. Súčasne, v pseudo-kontaktných bodoch medzi časticami v rámci siete častíc dochádza k nukleácii hydrátov, hoci materiál je stále vo fáze pokoja. Táto nukleácia sa mení lokálne, mäkké koloidné interakcie medzi časticami cementu na interakcie s vyššou energiou, ktoré možno považovať za vodíkové mostíky. Častice cementu interagujú výlučne prostredníctvom hydrátových mostíkov. Ďalšie zvýšenie makroskopického modulu pružnosti a medze klzu pochádza z nárastu, veľkosti alebo počtu vodíkových mostíkov medzi perkolovanými časticami cementu. Táto fáza sa označuje ako štrukturalizácia. Ďalej sa nevratnou chemickou reakciou vytvárajú hydrátové väzby medzi časticami. Tieto väzby sú dostatočne slabé na to, aby mohli byť prerušené opätovným miešaním, zatiaľ čo nové väzby sa môžu spontánne znovu objaviť, pokiaľ je

zmes v pokoji. Tvorba týchto väzieb teda nie je nezlučiteľná s makroskopickým reverzibilným vývojom, ako sa očakáva z tixotropného správania. [24][27][29]



Obrázok 7 Vývoj medze klzu v priebehu tlače [24]

### 3.3.2 Tixotropia

Tixotropia je súhrnný termín pre sériu udalostí a možno ju definovať ako štruktúrny rozpad zmesi pri šmykovom zaťažení a prípadná reštrukturalizácia zmesi v pokoji. Tixotropné správanie cementových materiálov možno pokladať za koaguláciu častíc zmesi v prípade, že na ňu nepôsobí žiadne šmykové zaťaženie. Po pôsobení vonkajšieho strihového zaťaženia na zmes sa mikroštruktúry rozpadajú a častice sa separujú. Táto reverzibilná koagulácia, separácia a opätovná koagulácia cementovej zmesi sa meria ako tixotropný index vzoriek. [29]

### 3.3.3 Vytlačateľnosť

Vytlačateľnosť sa vysvetľuje ako schopnosť hmoty materiálu byť kontinuálne vytláčaný cez trysku (okružlu alebo hranatú) s prijateľnou kvalitou tlače, teda minimálnym množstvom prerušení/pretrhnutí a prasklín vytláčaného materiálu. Pri testovaní vytlačiteľnosti sa používa vizuálne hľadisko ukladaného materiálu, kde sa sleduje kvalita povrchu vrstvy a teda prítomnosť, množstvo a veľkosť trhlín a konštantná šírka tlačenej stopy. [8]

Zvyčajne sa uprednostňujú zmesi s menšou tuhosťou a zaoblenými časticami pre jednoduchý proces vytlačania, pretože príliš viskózne hmoty by mohli spôsobiť zablokovanie alebo upchatie počas tlače. Nedokonalosti vytlačiteľnosti sa dajú jednoducho upraviť, a to úpravou tixotropie a reológie zmesi s prihliadaním na vystaviteľnosť, pevnosť a postupné spájanie vrstiev, aby bola spätná väzba na zmeny v návrhu, a opakovaním procesu až po optimalizáciu zmesi. Okrem parametrov súvisiacich so zmesou môže byť proces vytlačania ovplyvnený aj vytlačovacím systémom, charakteristikami tlačovej hlavy a trysky, ako je rýchlosť trysky a tvar/veľkosť prierezu, ale aj adhéznym napätím trenia (medzi materiálom a vnútorným povrchom trysky) a kohéznymi obmedzeniami (v dôsledku tuhosti materiálu) počas tlače, ktoré môžu rozhodnúť o kvalite/presnosti tlače.

Dva najbežnejšie problémy s vytlačiteľnosťou sú segregácia zložiek zmesi a pauzy v procese tlače. K separácii materiálu by mohlo potenciálne dôjsť v hadici a spôsobiť zablokovanie materiálu, v dôsledku nedostatočného premiešania pred začatím fázy čerpania alebo v dôsledku nevhodného dávkovania zmesi. Pozastavenie procesu tlače môže byť rozhodujúce pre zmeny reologických vlastností materiálov a nedostatočné spojenie po sebe nasledujúcich vrstiev v dôsledku nedostatočnej povrchovej vlhkosti vo vrstvách zmesi. [11][30]

### **3.2.4 Čerpatelnosť**

Čerpatelnosť je jednou zo základných vlastností čerstvej zmesi vhodnej pre 3D tlač. Pri 3D tlačenej technológii pojem čerpatelnosť definuje schopnosť prenosu čerstvej zmesi hadicou medzi miešačkou a tlačnou hlavicou. V priebehu procesu môžu nastať rôzne problémy ako blokácia hadice, príliš veľký tlak pri tlačení, krvácanie zmesi a segregácia častíc. Tieto problémy môžu byť zapríčinené nevhodným návrhom zmesi a nesprávnym nastavením tlačiarne a mohli by byť odstránené testovaním čerpatelnosti. V súčasnej dobe však nie je žiadny podobný test kontrolujúci čerpatelnosť 3D tlačenej zmesi na báze cementu štandardizovaný. [8]

Vlastnosti 3DCP, podobne alebo dokonca viac ako vlastnosti liateho betónu, sú veľmi citlivé na pomer vody v zmesi. Optimalizácia vodného súčiniteľa sa zvyčajne vykonáva pomocou superplastifikátorov, VMA, urýchľovačov atď. Vyššia spotreba vody má vplyv na čerpatelnosť a tekutosť môže byť rozhodujúca pre vystaviteľnosť, čerstvú a mechanickú pevnosť, ako aj na pórovitosť a obsah dutín zatvrdnutého betónu, zatiaľ čo pridanie chemických látok môže na jednej strane veľmi znížiť potrebný vodný súčiniteľ a na druhej strane zlepšiť pevnosť a vystaviteľnosť. Krivka zrnitosti je ďalším dôležitým parametrom, ktorý ovplyvňuje tok, čerpatelnosť a reologické správanie zmesi. Lepšia tekutosť sa môže dosiahnuť lepším obalením matrice, ktoré sa dá udržať dobrou krivkou zrnitosti. Doplnkové

cementové materiály, vedľajšie priemyselné produkty, pucolány a podobne by mohli pomôcť pri zvyšovaní hustoty hmoty, vyplňaní medzier a pôsobiť ako bariéra medzi časticami cementu, zabráňovať vytváraniu chemických väzieb, a tým zlepšovať tok a čerpatelnosť zmesi. [11][30]

### **3.2.5 Vystaviteľnosť**

Dôležitou vlastnosťou čerstvého tlačeného betónu je vystaviteľnosť (buildability, shape stability). Vystaviteľnosť je opisovaná ako schopnosť odolávať deformáciám počas procesu kladenia vrstiev 3D tlačeného betónovej konštrukcie. Konkrétne sa jedná o schopnosť odolávať trom hlavným zdrojom deformácie, ktorými sú vlastná váha, váha nasledujúcej vrstvy a vytlačací tlak. Pomocou vhodne zvolenej receptúry by mali vznikáť vrstvy bez viditeľných poškodení, ktoré odolávajú vyššie spomenutým deformáciám. [8]

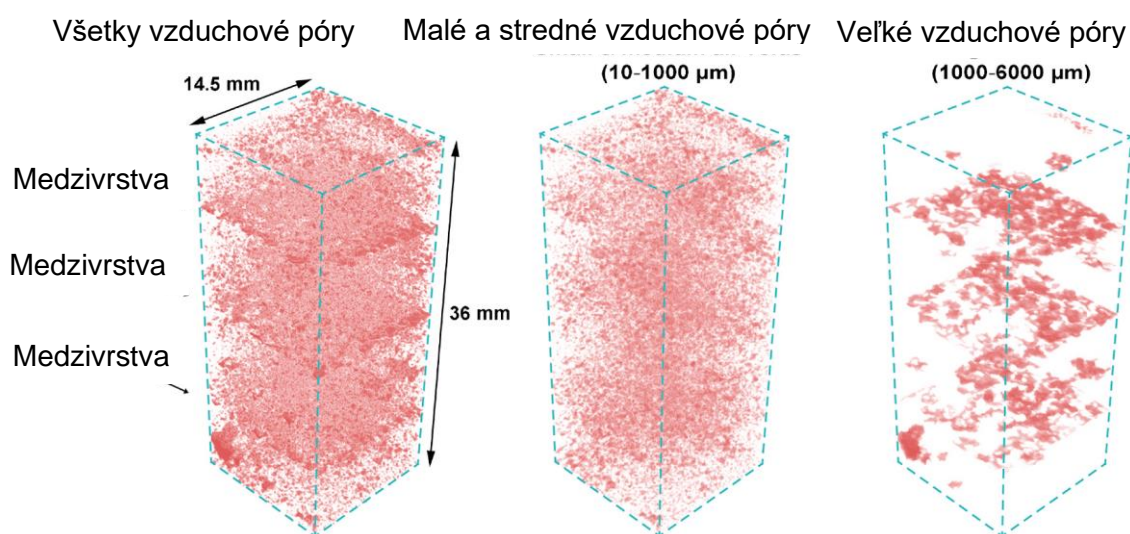
Rýchlosť pohybu trysky a dĺžka tlačených vrstiev sú dva kľúčové faktory, ktoré ovplyvňujú rýchlosť vytvárania a čas potrebný na dokončenie prvkov a štruktúr 3DCP. Rýchlosť pohybu trysky zvyčajne závisí od robotického systému tlačiarne, potrebného tlaku na vytlačanie zmesi, tuhosti vytlačených vrstiev počas času návratu trysky, zmien reologického správania materiálov, odolnosti vrstiev proti roztrhnutiu a rozštiepeniu počas vytlačania a usadzovania vrstiev v dôsledku deformácií spodnej vrstvy, ktoré by spôsobili zmeny v odstupovej vzdialenosti dýzy. Zväčšenie odstup trysky od spodnej vrstvy by viedlo k pádu extrudátu v určitej vzdialenosti, čo by spôsobilo geometrické deformácie tlačovej vrstvy a určitý druh nárazu, vibrácie alebo nestabilitu vrstiev zmesi. Preto sa táto výška odstup musí nakoniec upraviť na kontaktnú úroveň alebo druhým spôsobom je starostlivo kontrolovať rýchlosť budovania pomocou urýchľovačov, aby sa urýchlilo získavanie pevnosti uloženej hmoty. Okrem vlastnej váhy prekrývajúcich sa vrstiev a pôsobiaceho tlaku na vrstvy zmesi spôsobeného vytlačacím systémom možno v prípade vysoko stabilných zmesí pôsobiť ešte väčším tlakom prostredníctvom nastavenia výšky dýzy na menšiu vzdialenosť, ako je výška vrstiev, takže ústie trysky by bolo ponorené do tlačového betónu na niekoľko milimetrov. Tento tlak by mohol byť výrazne prospešný na spojenie po sebe nasledujúcich vrstiev a zvýšenie pevnosti spojenia.

Počas 3DP (3D printing – 3D tlač) vertikálne voľne stojacich častí alebo štruktúr podobných stene sa mechanické napätie na vrstvách zmesi postupne zvyšuje v dôsledku kumulatívneho zaťaženia vlastnou váhou. Toto zaťaženie pri určitej kritickej hranici spôsobuje poruchu buď pružným vybočením, alebo plastickým kolapsom. Výskumom sa zistilo, že strata geometrickej stability môže spôsobiť pružné vybočenie, zatiaľ čo k plastickému kolapsu dochádza, keď medzné napätie v spodnej vrstve prekročí medzu klzu materiálu. [22][23]

### 3.2.6 Obsah vzduchu

Napriek mnohým sľubným vyhladkam je niekoľko zásadných problémov pre odlišný proces výroby 3D tlačeneho betónu (3DCP) v porovnaní s tradičným liatym betónom:

- Bežný betón používa debnenie na podopretie čerstvého betónu a vibrácie na odstránenie zachyteného vzduchu a zhutnenie zmesi. Na druhej strane, 3DPC ich vytláča z trysiek a ukladá bez vibrácií. Niekoľko mikroštruktúrnych rozdielov teda môžu byť spôsobených absenciou vibrácií a debnenia.
- V porovnaní s homogénnou charakteristikou liateho betónu, proces výroby s ukladaním po vrstvách zvyčajne vytvára slabé spojenie medzi uloženými vrstvami, čo môže mať potenciálne negatívne dôsledky na vlastnosti tlačenej vrstvy.



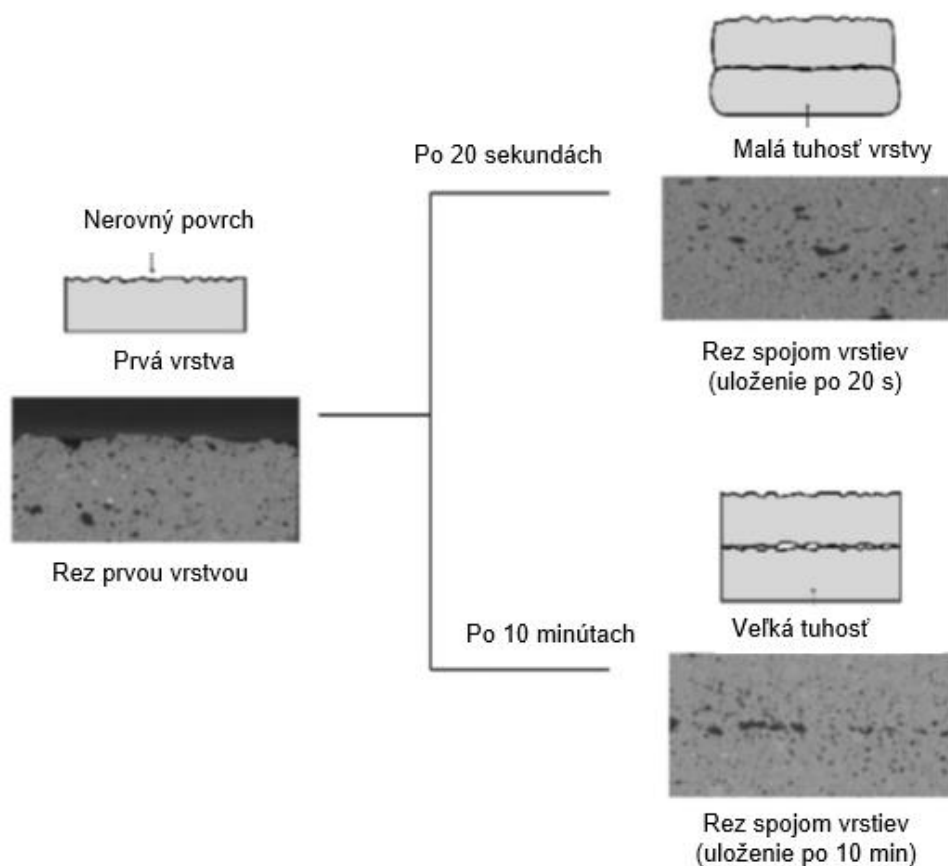
Obrázok 8 Distribúcia pórov a makro pórov v 3D tlačennom betóne [31]

Vzduchové póry v 3D tlačennom betóne teda možno charakterizovať ako malé a stredné vzduchové póry veľkosti 10 – 1000 µm obsiahnuté v tlačenej zmesi a veľké vzduchové póry veľkosti 1000 – 6000 µm, ktoré sú charakteristické tým, že sa vytvárajú medzi tlačnými vrstvami. [31]

### 3.2.7 Mechanické vlastnosti

Mechanické vlastnosti 3D tlačeneho betónu je veľmi náročné všeobecne zhodnotiť kvôli neexistujúcim normovým skúškam a rozdielnym skúšobným metódam, ktoré nie sú spoľahlivo porovnateľné. Ďalšími vlastnosťami ktoré značne ovplyvňujú mechanické vlastnosti sú spôsoby, akými bol betón uložený, spôsob ošetrovania, zhotovenie a veľkosť skúšobných telies, smer zaťaženia pri skúšaní pevnosti v tlaku, hrúbky jednotlivých vrstiev, a teda množstvo vrstiev vo vybranom skúšobnom telese. V súčasnej dobe teda nie je možné spoľahlivo porovnať mechanické vlastnosti rôznych tlačenej betónov. [11]

### 3.2.8 Medzi vrstvomá súdržnosť



Obrázok 9 Vplyv času na spoj po sebe nasledujúcich vrstiev [32]

Vzhľadom na proces tlače po vrstvách v 3DCP je medzivrstvové spájanie, známe aj ako medzivrstvomá súdržnosť, potenciálnym a nevyhnutným slabým miestom v 3D tlačenej štruktúre. Slabé medzi vrstvomé spojenie, ktoré sa tiež označuje ako "studený spoj", by mohlo mať za následok anizotropiu a ovplyvniť mechanické vlastnosti aj trvanlivosť vytlačeného prvku/štruktúry. Žiadúca je teda vysoká tixotropia/štruktúrna stavba tlačeného materiálu. Slabé rozhranie však môže vzniknúť z dôvodu vysokej tixotropie. Okrem tixotropie môžu mať vplyv na pevnosť medzivrstvomého spoja aj mnohé iné parametre tlače. [32]

## 3.3 Technológia výroby

### 3.3.1 3DCP Systémy

Systémov pre 3D tlačené technológie je mnoho. Medzi najznámejšie, najpoužívanejšie a najdostupnejšie patria portálové a robotické 3D tlačiarne.

### **Portálová 3D tlačiareň**

Konštrukciu portálovej tlačiarne tvorí žeriavová dráha so štyrmi stupňami voľnosti, pohyblivý nosník a hlavica, ktorá sa pohybuje pozdĺž nosníka, zatiaľ čo sa nosník hýbe v ďalších dvoch ortogonálnych smeroch. Vzďialenosť čerpadla od tlačnej hlavice je konštantná pre presnosť merania, čo umožňuje umiestnenie rôznych meracích zariadení a využitie pre výskumné účely. Priestor, v ktorom je možné tlačiť, je rozmerovo obmedzený konštrukciou tlačiarne. Pohyblivý portálový žeriav je ovládaný a kontrolovaný počítačom, čo vedie k vysokej efektívnosti a priestorovej presnosti. [33][34]



*Obrázok 10 Portálová tlačiareň [35]*

### **Robotická 3D tlačiareň**

U 3D robotických tlačiarní vhodných pre tlač cementových materiálov sleduje hlavica na robotickom ramene naprogramovanú dráhu tlače. Tieto robotické tlačiarne sa skladajú z 3-axiálneho robotického ramena, robotického kontrolóra, tlačnej hlavice, miešačky, pumpy a prípadne pohyblivej platformy. Surovinová zmes sa zmiešava s vodou v miešačke a následne je dopravovaná k tlačnej hlavici na robotickom ramene, ktoré sa pohybuje po naprogramovanej dráhe a vytvára vrstvy.



*Obrázok 11 Robotická tlačiareň*

V porovnaní s portálovou tlačiarňou má robotická tlačiareň menšie priestorové limitácie pre tlačný prvok. V prípade umiestnenia robota na pohyblivú platformu je tento druh tlače vhodný aj pre on-site tlačenie prvkov. V prípade synchronizácie viacerých robotov sú eliminované priestorové obmedzenia a celý proces tlače je zefektívnený. [33][34]

### **3.3.2 Metódy návrhu optimálneho tvaru a štruktúry**

Jednou z hlavných výhod aditívnej technológie (AM – additive manufacturing) je možnosť výroby dielov so zložitou geometriou na základe obmedzenia použitého materiálu, ktoré nepriamo prispieva k riešeniu udržateľnosti konštrukcie. Okrem toho 3DCP tiež pomáha minimalizovať odpad materiálu vďaka priamej tlači požadovaných štruktúr

Je všeobecne známe, že štruktúrna a tvarová optimalizácia sa zvyčajne používajú v stavebníctve a architektúre, resp. je kladený dôraz na vzťah medzi silami pôsobiacimi v konštrukcii a tvarom. Zatiaľ čo sa zvyšuje dopyt po zlepšení konštrukcií budov s cieľom zvýšiť bezpečnosť a ušetriť materiálové náklady, optimalizačný prístup vyvinutý pre konštrukcie možno použiť na maximalizáciu energetickej hospodárnosti budov a iných oblastí stavieb.

Optimalizácia konštrukcií sa vo všeobecnosti vykonáva pomocou matematických algoritmov na hľadanie optimálneho rozloženia materiálov konkrétnej konštrukcie. Na rozdiel od tradičného procesu navrhovania s jednoduchým porovnávaním numerických a praktických výsledkov sa optimálny návrh dosahuje pomocou tvaru, veľkosti, materiálu a optimalizácie topológie, ktorými nedisponuje pôvodný návrh. Topologická optimalizácia (TOP) je bežná cesta na získanie optimálneho návrhu najmä pre 3DCP. Existujú tri algoritmy vyvinuté pre štruktúrnu optimalizáciu vrátane homogenizácie, obojsmerného evolučnej štruktúrnej optimalizácie (BESO) a pevného izotropného modelovania s penalizáciou (SIMP).

Algoritmus SIMP bol prvýkrát navrhnutý pre optimalizáciu štruktúry s rôznymi návrhovými premennými. SIMP je tiež známy ako metóda topologickej optimalizácie na základe hustoty, pretože penalizačný faktor neumožňuje výskyt zlomkových hustôt počas procesu optimálneho návrhu. Niekoľko zložitých konkrétnych konštrukcií bolo úspešne vytlačených pomocou algoritmu SIMP. Bola vytvorená betónová doska s optimalizovanou topológiou tak, aby sa hmotnosť konštrukcie znížila o 70 % z pôvodnej plnej betónovej dosky, pričom bola zachovaná približne rovnaká nosnosť. Ďalším príkladom je nosník s rozpätím 4 m z 3DCP s predopnutým káblom, v ktorom bol objem betónu znížený o 20 %, pričom sa dosiahne podobný priebeh.

Okrem vyššie uvedených algoritmov pre štruktúrnu optimalizáciu existujú aj iné komerčné softvéry, ktoré dokážu optimalizovať konštrukčný návrh pre 3D tlač. Okrem toho môžu softvérové nástroje zohľadniť obmedzenia smeru vytlačania, minimálnej a maximálnej veľkosti, symetrie a integrovaného postprocesingu.

Spomedzi týchto nástrojov je možné použiť topologický program Abaqus, jeho optimalizačný modul (ATOM) patrí medzi špičkové komerčné softvérové balíky schopné optimalizovať konštrukciu pre problémy prenosu tepla a prúdenia kvapalín. Softvér OptiStruct bežiaci na platforme Hyperworks možno použiť na konštrukčnú optimalizáciu pre návrh AM s ohľadom na veľkosť častí, hrúbky a ďalších faktorov, ako sú obmedzenia vytlačania a smery ťahu. Ďalej bol vyvinutý optimalizačný algoritmus založený na propagácii, známy ako nástroj Grasshopper – komerčný softvérový vyvinula spoločnosť Robert McNeel & Associates. Tento softvér sa ukázal ako vhodný nástroj pri riešení spojitých optimalizačných problémov, avšak štruktúrnu optimalizáciu pre binárne problémy nie je možné riešiť priamo.

V posledných rokoch sa bioinšpirované koncepčné metódy bežne používajú v oblasti 3DCP na výrobu niektorých nových štruktúr, napr. bunkový včelí (voštinový) panel a Bouligandove tvary, ktoré boli vytlačené pomocou cementových materiálov, čo nielenže zlepšilo problémy

s trhlinami, ale tiež znížili nepružnú deformáciu v konštrukcii o viac ako 50 % v porovnaní s tradičným odlievaním komponentmi. Okrem toho bioinšpirované bunkové cementové bloky, ktoré sú prirodzene inšpirované súvislými, nesamostatne sa pretínajúcimi povrchmi známymi ako trojnásobne periodický minimálny povrch (TPMS) štruktúra boli skúmané s cieľom preukázať ich výnimočné mechanické vlastnosti v porovnaní s tradičnými blokmi s tradičnou mriežkou s rovnakým objemovým podielom. Takéto druhy štruktúr však zvyčajne obsahujú previsnuté časti alebo zakrivené povrchy, ktoré je ťažké vytlačiť bežným spôsobom pomocou technológie 3DCP. [25]

### **3.3.3 Rýchlosť tuhnutia/rýchlosť tlače**

Otvorený čas spracovateľnosti alebo vytlačiteľnosti je ďalšou dôležitou vlastnosťou čerstvej betónovej zmesi. Vzťahuje sa na časový úsek, počas ktorého by sa tlačová zmes mohla vytlačiť tryskou s prijateľnou kvalitou, pričom sa berie do úvahy strata spracovateľnosti, ku ktorej dochádza v priebehu času. Je to veľmi dôležité z hľadiska načasovania dodávky materiálu do trysky a prevádzky stavebnej tlačiarne. Sú používané dve časové hranice na definovanie okna tlačiteľnosti zmesi:

- Hranica tlačiteľnosti: Čas, keď je kvalita vytlačenej vrstvy ovplyvnená v dôsledku straty spracovateľnosti.
- Hranica blokácie: Čas, keď betón vôbec nemožno vyvieť z tlačovej trysky a ďalšie oneskorenie by viedlo k stuhnutiu zmesi a poškodeniu trysky. [25]

### **3.3.4 Interval kladenia vrstiev**

Časový interval medzi dvoma po sebe nasledujúcimi vrstvami môže byť jedným z najkritickejších parametrov tlače ovplyvňujúcich vystaviteľnosť a pevnosť medzivrstvy. Predĺžením časového intervalu medzi vrstvami by sa mohla zvýšiť tvarová stabilita nanesených vrstiev, zatiaľ čo pevnosť medzivrstvového spoja sa môže výrazne znížiť. V literatúre sa časový interval pohybuje v rozmedzí od niekoľko sekúnd/minút až po viac ako 24 h. V prípade krátkych časových intervalov (do 1 h) má správanie sa nanášaných materiálov pri vytváraní štruktúry značný vplyv na adhéziu vrstiev. Je uvádzaná dobrá korelácia medzi pevnosťou medzi vrstvovej väzby a vývojom modulu ukladateľnosti materiálu v sérii krátkych časových intervalov (1 – 20 min). Bolo taktiež poukázané na to, že maximálny čas prevádzky (časový interval) na vyhnutie sa studenému spoju závisí predovšetkým od rýchlosti štrukturalizácie a na plastickej viskozite tlačových cementových materiálov, a to pri pevne stanovených parametroch tlače, ako sú rýchlosť, vzdialenosť medzi tryskami a iné.

V prípade niektorých tlačiteľných cementových materiálov by predĺženie časového intervalu medzi vrstvami mohlo zvýšiť pravdepodobnosť vzniku vzduchových dutín v oblasti

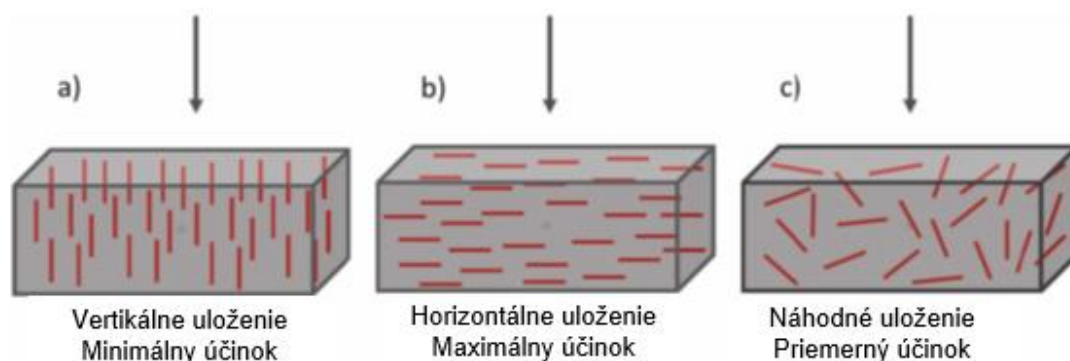
rozhrania, čo možno považovať za hlavný dôvod zníženia pevnosti medzivrstvy. Na druhej strane sa zdá, že tvorba vzduchovej dutiny závisí najmä od tuhosti spodnej vrstvy. V prípade relatívne dlhej časovej medzery (desiatky minút, ale v rámci hodiny) sa deformácia zmesi po nanosení vrchnej vrstvy znižuje v dôsledku vývoja tuhosti materiálu, ktorý možno pripísať procesu schnutia materiálu a nukleácii medzi časticami cementu. V dôsledku toho je menej účinné vzájomné prepojenie medzi jednotlivými vrstvami materiálu. Medzi vzájomne prepojenými oblasťami spojov sa vytvárajú dutiny a zostáva veľa nevyplnených oblastí, čo má za následok široké makropóry a vzduchové dutiny. Po dlhších časových intervaloch, ako je niekoľko hodín alebo dokonca desiatky hodín, môže dominovať pevnosti medzivrstvy namiesto tixotropie materiálu. [32]

### 3.3.4 Nanášacia vzdialenosť

Deformácii nanosených vrstiev sa nedá vyhnúť a je ťažké nepretržite dodržiavať štandardné nastavenie odstupovej vzdialenosti trysky počas procesu tlače. Vzdialenosť odstup trysky sa zväčšuje s rastom deformácie substrátu. Zväčšovanie vzdialenosti trysky sa zvyšuje možnosť nepresného nanášania vrstiev, mení sa kontaktná plocha a tlaky medzi vrstvami. Preto môže dôjsť k ovplyvneniu medzivrstvového spojenia. Zväčšením vzdialenosti medzi tryskou a poslednou vrstvou je možné dosiahnuť výrazné zníženie väzby o viac ako 30 %, alebo len štandardné odchýlky výsledkov výšky trysky a jej vzdialenosti od povrchu poslednej vrstvy. Rozdielne účinky medzi jednotlivými testmi možno pripísať premenným zložením materiálov, nastavením tlače a najmä typov trysiek. [32]

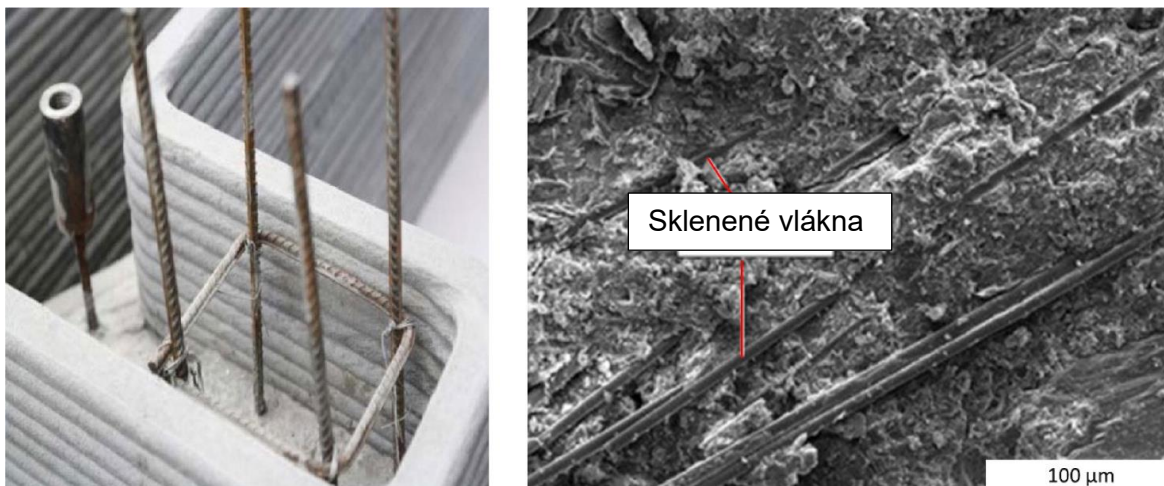
### 3.3.5 Možnosti vystuženia

S cieľom zlepšiť mechanické vlastnosti 3DPC bez pridania nadmerného množstva portlandského cementu, boli použité rôzne prístupy k vystužovaniu, ktoré sa dajú rozdeliť na dve hlavné kategórie. Prvým spôsobom je použitie mikrovýstužných materiálov, konkrétne sklenených, uhlíkových a ocelových vlákien, ktoré sa pridávajú do betónovej zmesi s cieľom zlepšiť materiálových vlastností 3DPC.



Obrázok 12 Rozloženie vlákien vo vrstvách [36]

Druhým spôsobom je použitie makrovýstuže, ako sú oceľové a polymérové, ktoré sa vkladajú do vrstvy vytlačaného betónu počas výrobného procesu alebo pred ním. V prvom prístupe sa štruktúra a geometria výplne kontinuálne tlačeneho 3D betónu vystuženého vláknami riadi vlastnosťami tlačeného materiálu, pevnosti a vlastností medzivrstvy. Vysoká pórovitosť a mikrotrhliny sú potenciálne problémy spojené s použitím mikro výstuží v betóne. [36]

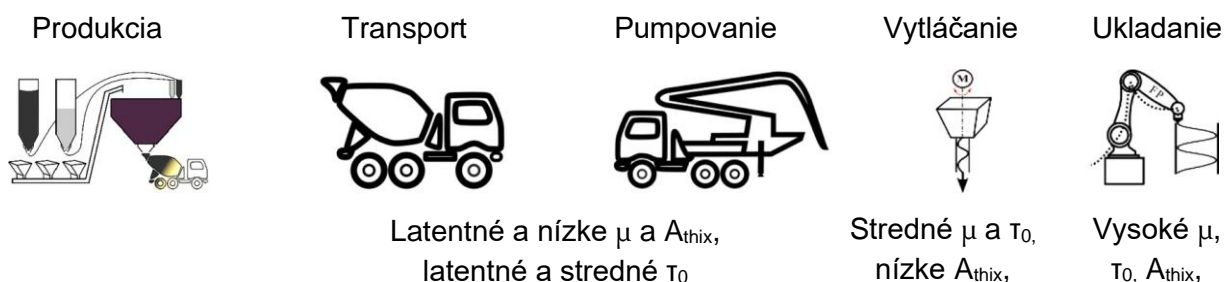


Obrázok 13 Možnosti vystuženia, vľavo tyčová výstuž, vpravo výstuž sklenenými vláknami [36]

### 3.4 On-site printing

On-site tlač alebo inak tlač na mieste výstavby prichádza ako prirodzený presun 3D tlačenej technológie do praxe v širšom merítku. 3D tlač na mieste si vyžaduje využitie veľkých portálových tlačiarní, prípadne viacero robotických ramien, ktoré kontinuálne a synchronizovane vytlačujú betón či malty na báze cementu.

Vytlačiteľnosť, vystaviteľnosť, spracovateľnosť a otvorený čas sú kľúčové požiadavky na betóny určené na on-site 3D tlač betónu. Rôzne fázy procesu počas veľkoplošného tlačenia na mieste sú výroba, transportácia, čerpanie, vytlačanie, nanášanie vrstiev a kontrola kvality. Kontrola kvality sa ďalej delí na kontrolu čerstvého betónu a zatvrdnutého betónu. V podstate ide o úspešnosť všetkých po sebe nasledných fáz procesu a dosiahnuté vlastnosti vytvrdnutých konštrukcií závisiacich od reologických vlastnostiach 3PC, ktoré sa nastavujú, testujú a upravujú. Konkrétne ide o časovo závislú statickú medzu klzu  $\tau_{0,s}$ , dynamickú medzu klzu  $\tau_0$ , rýchlosť štrukturalizácie  $A_{thix}$  (flokulácie cementových častíc) a plastickú viskozitu  $\mu$ , ktoré splňujú požiadavky pre dané fázy, teda pre čerpanie, vytlačanie a ukladanie 3PC. Okrem týchto vlastností sa na začiatku veku (prvé tri hodiny) v polotuhom (tvrdnúcom) stave, ako sú pevnosť v tlaku a modul pružnosti je potrebné charakterizovať, aby sa zabezpečilo kontinuálne usadzovanie bez výraznej deformácie vytlačeneho materiálu prvku.



Obrázok 14 Celkový proces tlače [30]

Medzi ďalšie výzvy 3D tlačeného betónu na mieste výstavby patrí:

- Vplyv klimatických podmienok ako teplota, vietor, slnečné žiarenie.
- Prispôsobenie betónovej 3D tlače dnešnej architektúre a konštrukčnému dizajnu (ostré rohy, geometria priamych línií, široká monolitické prierezy).
- Maximálne využitie bežných stavebných strojov, ako napr. autodomiešavač s čerpadlom.
- Zloženie betónu a vlastnosti zatvrdnutého betónu v rámci existujúcich noriem pre betón.
- Tlačová hlava, ktorá umožňuje kvalitu povrchu a presnosť/tolerancie podľa existujúcich noriem.
- Využitie väčšej frakcie kameniva. [30]

### 3.5 Ďalšie udržateľné materiály vhodné pro 3D tlač

#### 3.5.1 Geopolymérne materiály

Alkalicky aktivovaný materiál je širšou klasifikačnou skupinou, ktorá v podstate zahŕňa akékoľvek spojivo získané reakciou medzi zdrojom alkalického kovu (pevným alebo rozpustným) a silikátovým práškom. Tieto pevné látky môžu byť hlinito kremičitany bohaté na vápnik alebo chudobné na vápnik, ako napr. vysokopecná troska, popolček, kalcinované íly alebo zmesi týchto surovín. Medzi alkalické zdroje môžu patriť alkalické hydroxidy, kremičitany, uhličitan, sírany, hlinitan alebo oxidy. V podstate akákoľvek rozpustná látka, ktorá môže poskytnúť kationy alkalických kovov, zvýšiť pH reakcie a urýchliť roztok tuhej látky prekursora. Slovo geopolymér sa často vzťahuje na podskupinu alkalicky aktivovaných materiálov. Najbežnejšími prekursorami používanými pri syntéze geopolymérov sú popolček s nízkym obsahom vápnika a kalcinované íly (napr. metakaolín). Je potrebné zdôrazniť, že termín geopolymér bol zavedený v 70. rokoch 20. storočia francúzskym vedcom a inžinierom Josephom Davidovitsom. [37]

Z hľadiska udržateľnosti môžu alkalicky aktivované/geopolymérne materiály nahradiť bežný betón, a tým pomôcť minimalizovať globálne emisie CO<sub>2</sub>. V súčasnosti si 3D tlač geopolymérnych materiálov v porovnaní s ostatnými materiálmi na báze cementu získava medzi výskumníkmi čoraz väčšiu popularitu. [25]

### 3.5.2 Zemité materiály

Ekonomické aspekty a otázky udržateľnosti v kombinácii s vplyvom materiálov na životné prostredie sú v popredí diskusií o budúcnosti výstavby budov a infraštruktúry. Medzi najudržateľnejšie a najšetrnejšie k životnému prostrediu patrí materiál na báze zeminy alebo pôdy. Zemina je jedným z najstarších stavebných materiálov, ktorý sa používal už pred tisíckami rokov, a ešte stále možno vidieť množstvo pôdnych konštrukcií po celom svete. Počas posledných troch desaťročí bolo uverejnených niekoľko praktických predpisov a návodov týkajúcich sa výstavby na báze zeminy. Pomocou tejto technológie je možná výstavba nízko nákladových domov, stavieb s nízkou energetickou náročnosťou a taktiež oprava už existujúcich degradovaných hlinených stavieb. Medzi hlavné suroviny pre tento spôsob výstavby teda patrí ílovitá zemina so slamou, ktorá je stabilizovaná hydrogelmi. Ako technológia tlače sa používa vytlačanie. K negatívnym vlastnostiam zemných materiálov vo všeobecnosti patria:

- proces tvrdnutia vyvolaný vysychaním bez hydraulikkej spojivovej fázy, čo spôsobuje trhliny v materiáli,
- vysoká citlivosť na vlhkosť.

Tieto nevýhody zemných materiálov predstavujú výzvu pre jeho použitie v 3D tlačenej technológii. [38]

### 3.5.3 Keramické materiály

Výroba biomateriálov a tkanivové inžinierstvo sa nachádzajú na popredných miestach v zozname priemyselných odvetví, ktoré majú najväčší záujem o keramickú aditívnu výrobu prostredníctvom 3D tlače. Výstuž pre zuby, zlomené kosti a podobne. Keramický materiál má vysokú mechanickú pevnosť, zvýhodnenú dlhodobú trvanlivosť, vysokú tepelnú odolnosť a má schopnosť fluidizácie, vďaka ktorej je možné ho adaptovať do rôznych požadovaných tvarov pred nastavením a vytvrnutím. Avšak, relatívne nižšie rozlíšenie tlače a vrstvený vzhľad sú dve špecifické výzvy pre tento materiál. Následné spracovanie vytlačenej keramiky pri vytváraní priaznivých geometrií by mohlo byť nákladné, zvyšuje čas výrobného cyklu na položky a znižuje hodnotu plnoautomatizácie. Medzi hlavné suroviny použité v tejto technológii patrí karbid kremíku, porcelán, kremík, sklo a keramické vlákna. Technológie používané pri tlači keramiky sú vytlačanie, tryskanie spojiva a foto-polymerizácia. Optimalizáciou reologických vlastností keramiky a zvýšením konkrétnej

homogenity možno taktiež vytlačiť voštinovú štruktúru (štruktúra včelích plastov) so zlepšeným mechanickým správaním a geometrickou presnosťou, zlepšenou mikroštruktúrou a kontrolou trhlín. [38]

### 3.5.4 Drevné materiály

Medzi ďalšie materiály využívané pre aditívne technológie sa začala využívať aj drevná hmota. Jedná sa o zmes škrobu, ligninosulfátu a drevných častíc, z ktorých je následne vyrábaný granulát. Následne vznikajúce vrstvy sú kropené vodou (prípadne vodou a spojivom) a lisované pomocou teplého valca. Medzi výhody tejto technológie patrí schopnosť využívania čerstvo pomletého dreva bez potreby sušenia a taktiež nenáročné podmienky na skladovanie. Naopak, vlhkosť dreva prispieva k menšej spotrebe vody pri výrobe. Celý proces tlače je technologicky jednoduchý. Medzi možné výzvy tejto technológie patrí znehodnotenie mletého dreva pri skladovaní alebo transporte plesňami. V prípade použitia veľkého množstva vody dochádza k nedostatočnému stlačovaniu. [39]

## 3.6 Zásady cirkulárnej ekonomiky v stavebníctve



Obrázok 15 Fázy cirkulárnej ekonomiky [40]

Zastavané prostredie má významný vplyv na mnohé odvetvia hospodárstva, ale aj na miestnu zamestnanosť a kvalitu života. Odvetvie stavebníctva prispieva k HDP EÚ približne 9 %. Európsky stavebný sektor spotrebuje až 1,6 Gt materiálu ročne, pričom sa očakáva, že spotreba bude rásť. Vyžaduje si obrovské množstvo zdrojov a predstavuje približne 50 % všetkých vyťažených materiálov. Sektor stavebníctva zohráva úlohu aj z hľadiska environmentálnych vlastností budov a infraštruktúry počas celého ich životného cyklu.

Oblasť stavebníctva a demolácií je jedným z najväčších zdrojov odpadu v Európe a je zodpovedný za viac ako 35 % celkovej produkcie, tým pádom produkuje oveľa viac odpadu ako ktorýkoľvek iný sektor. Správne nakladanie so stavebným a demolačným odpadom a recyklovanými materiálmi – vrátane správneho nakladania s nebezpečným odpadom – môže mať veľký prínos z hľadiska udržateľnosti a kvality života. Môže však priniesť aj významné výhody pre toto odvetvie stavebníctva a recyklácie v EÚ tým, že zvyšuje dopyt po recyklovanom stavebnom a demolačnom materiáli.

Hlavnými príležitosťami obehového hospodárstva v oblasti stavebníctva sú:

- recyklácia materiálov - recyklácia materiálov z vyradených stavieb a demontáž stavieb s cieľom umožniť kvalitnú recykláciu;
- efektívnosť stavebných materiálov - zníženie množstva spotrebovaných materiálov, ktoré znižuje množstvo následne vyprodukovaného odpadu;
- využívanie druhotných surovín;
- predĺženie životnosti budov, zvýšenie využitia priestoru.

Rastúca digitalizácia stavebného procesu bude kľúčovým faktorom pre využívania modelovania a postupnej automatizácie stavebného procesu. Prístupy ako BIM (Building Information Modelling) môžu pomôcť zjednodušiť a podporiť výstavbu stavieb a budov s lepšou energetickou hospodárnosťou. [41]

### **3.7 Požiadavky pre dopravné stavby**

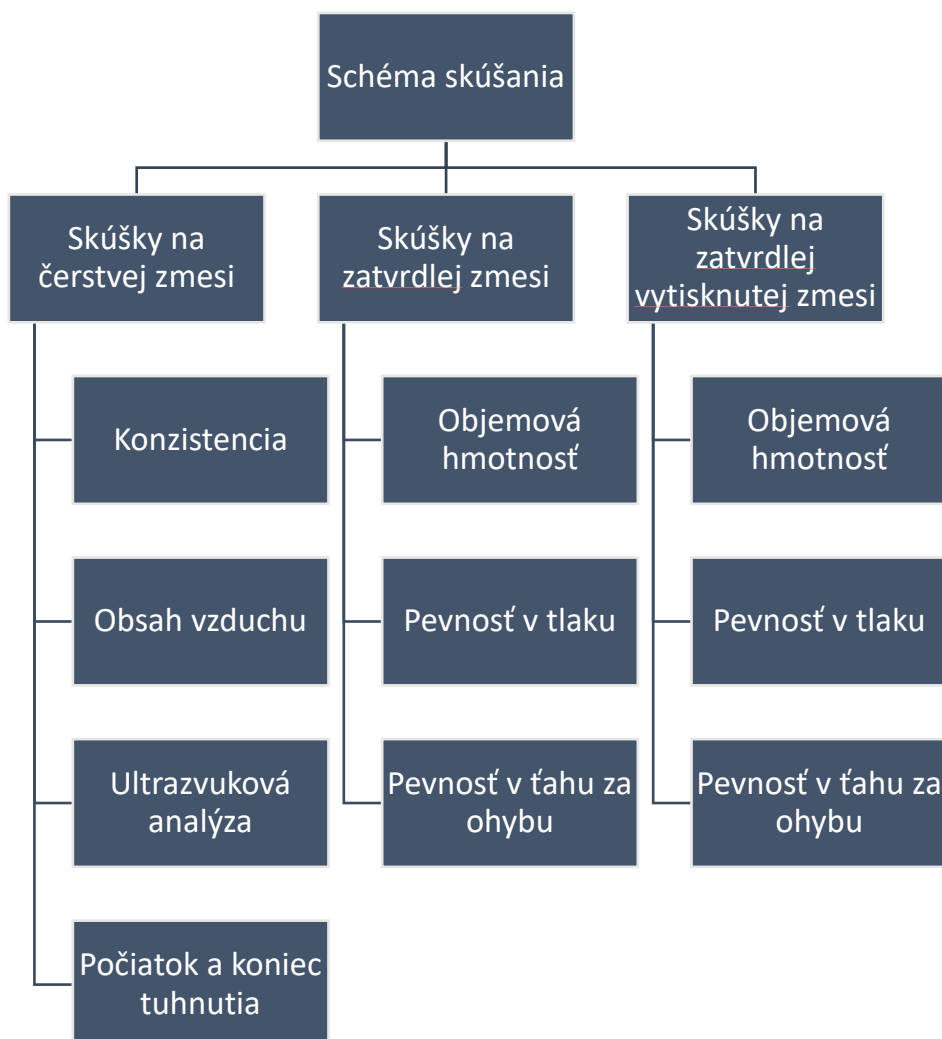
Dopravné stavby musia podľa „Technické kvalitatívne podmienky staveb pozemných komunikácií - Kapitola 18 Betonové konstrukce a mosty (TKP 18)“, ČSN EN 206 + A2:2021 a ČSN P 73 2404 spĺňať dané požiadavky.

Požiadavky pre nosné konštrukcie bez vodotesnej izolácie a ríms:

- Životnosť: 100 rokov
- Trieda prostredia:
  - XF4
  - XF3 + XD3
- Pevnostná trieda: C 30/37
- Minimálne krytie: 45 mm
- CHRL: A/100/1000, C/75/1000
- Prevzdušnenie: minimálne 4 %
- Vodotesnosť: 35 mm (XF4), 20 mm (XF3 + XD3)
- Vodný súčiniteľ: maximálne 0,45 [42][43][44]

## 4 Praktická časť

### 4.1 Schéma skúšania



Obrázok 16 Schéma skúšania

## 4.2 Skúšobné metódy

### 4.2.2 Konzistencia

ČSN EN 1015-3: Stanovenie konzistencie čerstvej malty (s použitím striasacieho stolíka)

Podstata: Hodnota rozliatia sa stanoví zmeraním priemerov rozliatej skúšobnej vzorky čerstvej malty na predpísanej doske striasacieho stolíka pomocou predpísaného kovového kuželu po predpísanom počte zvislých pádov, pri ktorých sa doska stolíku zdvíha a následne volne padá z predpísanej výšky.

Pomôcky: Striasací stolík, kovový kužel, dusadlo, vhodné meradlo, špachtľa

Postup: Pred každou skúškou sa doska a vnútorný povrch kužeľa očistí vlhkou handričkou a utrie sa dosucha. Ich povrch sa potom natrie tenkou vrstvou minerálneho oleja s veľmi nízkou viskozitou.

Kovový kužeľ sa umiestni do stredu dosky striasacieho stolíku a naplní sa maltou vo dvoch vrstvách. Každá vrstva sa rozprestrie pomocou najmenej 10 úderov dusadla tak, aby bol kužeľ rovnomerne naplnený. Behom plnenia sa kužeľ jednou rukou pritláča k doske stolíka.

Prebytočná malta sa zotrie špachtľou a voľná plocha dosky sa dôkladne otrie handričkou, aby bola čistá a suchá, pričom sa dbá na odstránenie vody od spodného okraja kužeľa. Asi po 15 sekundách sa kovový kužeľ zľahka zdvihne kolmo nahor a malta sa na doske rozleje 15 nárazmi s konštantnou frekvenciou jedného zdvihu za jednu sekundu.

Priemer koláču sa zmeria v dvoch na seba kolmých smeroch pomocou vhodného meradla. Výsledok sa udáva v mm s presnosťou 1 mm.

Vyhodnotenie: Vypočíta sa priemerná hodnota z dvoch meraní. Táto priemerná hodnota je hodnotou rozliatia skúšobnej vzorky. Pokiaľ sa jednotlivé hodnoty líšia o menej ako 10 %, považuje sa táto hodnota za hodnotu rozliatia malty. Pokiaľ sa ale výsledky líšia o viac ako 10 %, potom sa skúška opakuje. Pokiaľ je stále rozdiel väčší ako 10 %, potom je skúška vyhodnotená ako nevyhovujúca a musí sa opakovať s novou dávkou malty. [45]



Obrázok 17 Spôsob merania priemeru vzorky na striasacom stolíku [46]

#### 4.2.3 Ultrazvuková analýza

Sledovanie rýchlosti šírenia ultrazvukového impulzu čerstvej malty v čase z meraní pomocou ultrazvukového impulzu sa používa na meranie počiatočných štádií hydratácie skúšaných zmesí. Meracie zariadenie pozostáva z dvoch sond umiestnených v čelných plochách kubickej formy s rozmermi 80x80x150 mm. Priebeh rýchlosti šírenia

ultrazvukového impulzu sa stanovuje metódou ultrazvukových impulzov. Metodika na meranie rýchlosti šírenia ultrazvukového impulzu vychádzala z normy EN 12504-4. Uvedená norma je ale určená na skúšanie zatvrdnutého betónu. Meranie sa vykonáva priamym prenosom.

Pri skúšaní čerstvej malty bol postup merania pomocou ultrazvukovej impulznej metódy modifikovaný takto. Čerstvá malta sa umiestni do formy s otvormi s priemerom 50 mm, ktoré sú vytvorené v jej čelách, do ktorých sa umiestnili sondy s priemerom 50 mm. Meranie sa vykonáva pomocou prístroja PUNDIT LAB. Stanovenie času prechodu je s presnosťou 0,1  $\mu$ s a sondou s vlastnou frekvenciou 54 kHz. Vzďialenosť medzi sondami bola nastavená pomocou etalónu na 145 mm (dĺžka meracej základne). [46]



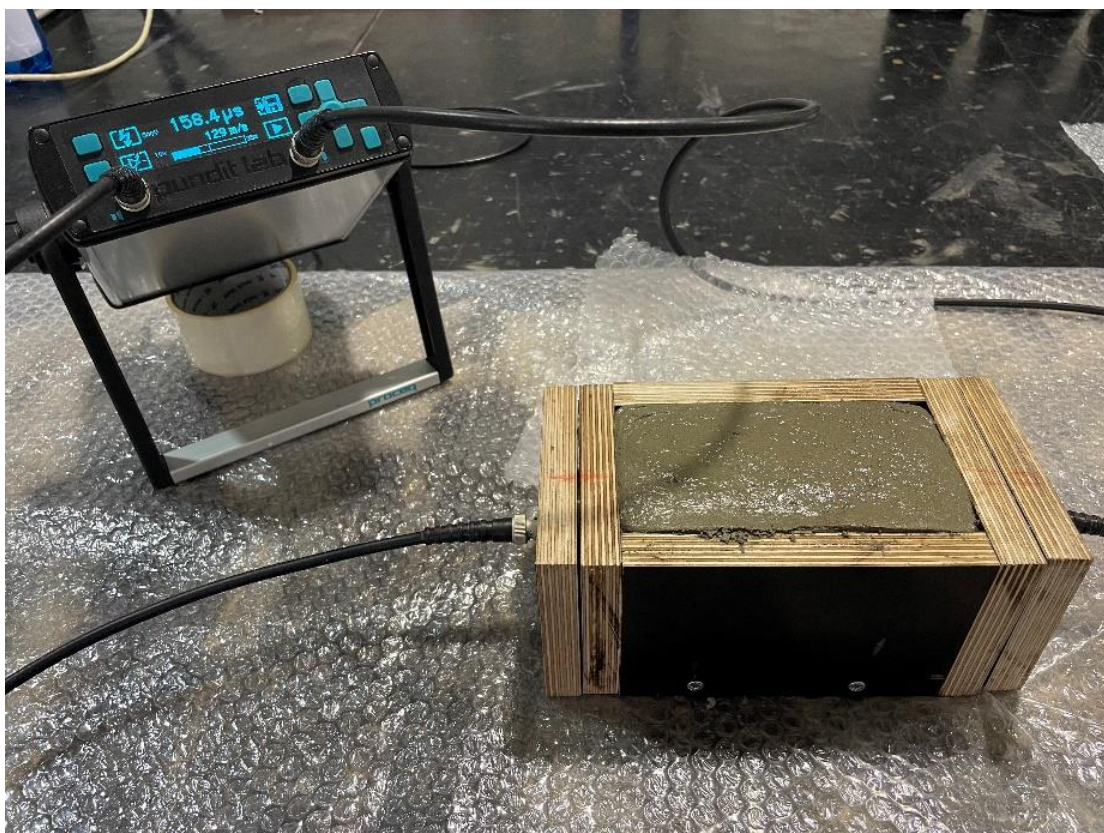
Obrázok 18 Schéma ultrazvukového meradla [46]



Obrázok 19 Zariadenie pre meranie doby prechodu ultrazvukového impulzu v čerstvej malte [46]

Na dosiahnutie dobrého akustického spojenia sa použila technická vazelína, ktorá sa naniesla na povrch sond. Následne sa forma vyplnila čerstvou maltou, ktorá sa zhutnila utláčaním, aby sa dosiahlo dobré akustické spojenie, horný povrch malty sa vyrovnal a začalo meranie času prechodu ultrazvukových impulzov. Postup merania bol nasledovný: Prvé meranie sa uskutočnilo 6 – 10 minút po kontakte cementu s vodou v zmesi. Nasledujúce merania sa realizovali po 15 min. intervaloch (vzťahovalo sa na kontakt cementu s vodou v zmesi).

Meranie sa ukončilo, keď 3 hodnoty času prechodu ultrazvukového impulzu boli vyššie ako minimálna dosiahnutá hodnota (hodnoty sa buď od seba nelíšili alebo mali vzrastajúcu tendenciu). [46]



Obrázok 20 Naplnené ultrazvukové meradlo [46]

Rýchlosť šírenia ultrazvukového impulzu bola vypočítaná z času prechodu ultrazvukového impulzu:

$$V = \frac{L}{T} \quad (5)$$

Kde:

V - rýchlosť ultrazvukového impulzu [km/s]

L - dĺžka meranej základne [mm]

T - čas prechodu [s] [46]

#### 4.2.3 Obsah vzduchu

ČSN EN 12350-7: skúšky čerstvého betónu – Časť 2: Obsah vzduchu – Tlakové metódy

Pomôcky: Tlakomerný prístroj, vibračný stôl/prepichovacia tyč, lopatka, hladítko/lžíce, lopata, nádoba na premiešanie, strička, palička, plniaci nástavec, vlhká handra

Postup: Nádobu naplníme a zhutníme v 3 vrstvách na vibračnom stole alebo pomocou prepichovacej tyče. Zhutňovaním odstránime iba veľké póry. Zhutnený betón v nádobe sa zarovná prepichovacou tyčou a povrch sa uhladí oceľovým hladítkom. Príruba nádoby a veka sa dôkladne očistí. Veko sa pripevní k nádobe svorkami. Je treba zaistiť, aby veko bolo k nádobe vzduchotesne pripevnené. Hlavný ventil pre prívod vzduchu sa uzavrie a otvoria sa ventily A a B. Prístroj sa naplní vodou tak, že sa voda vstrikava stričkou do ventilu A alebo B tak dlho, pokiaľ nevyteká z druhého ventilu. Paličkou sa ľahko poklepe na prístroj, aby sa odstránili vzduchové bubliny. Ventil na vypustenie vzduchu zo vzduchovej komory sa uzavrie a do vzduchovej komory sa pumpuje vzduch, pokiaľ ručička tlakomeru neukazuje počiatočnú hodnotu tlaku. Vzduch sa ponechá na niekoľko sekúnd stlačený, aby sa vyrovnala jeho teplota s teplotou okolia. Pokiaľ je to nutné, nastaví sa poloha ručičky tlakomeru na počiatočnú hodnotu tlaku vypustením alebo pripumpovaním vzduchu, pričom sa na tlakomer ľahko poklepáva. Ventily A a B sa uzatvoria a otvorí sa hlavný ventil vzduchu. Ostro sa poklepe na bočné steny nádoby. Za ľahkého poklepávania na tlakomer sa odčíta hodnota tlaku na tlakomere, ktorá odpovedá objemu obsahu vzduchu A1 v percentách, zaokrúhlených na najbližších 0,1 %. Pred zložením veka sa otvoria ventily A a B, aby sa uvoľnil tlak.

Obsah vzduchu v betóne v nádobe, AC, sa vypočíta zo vzorca:

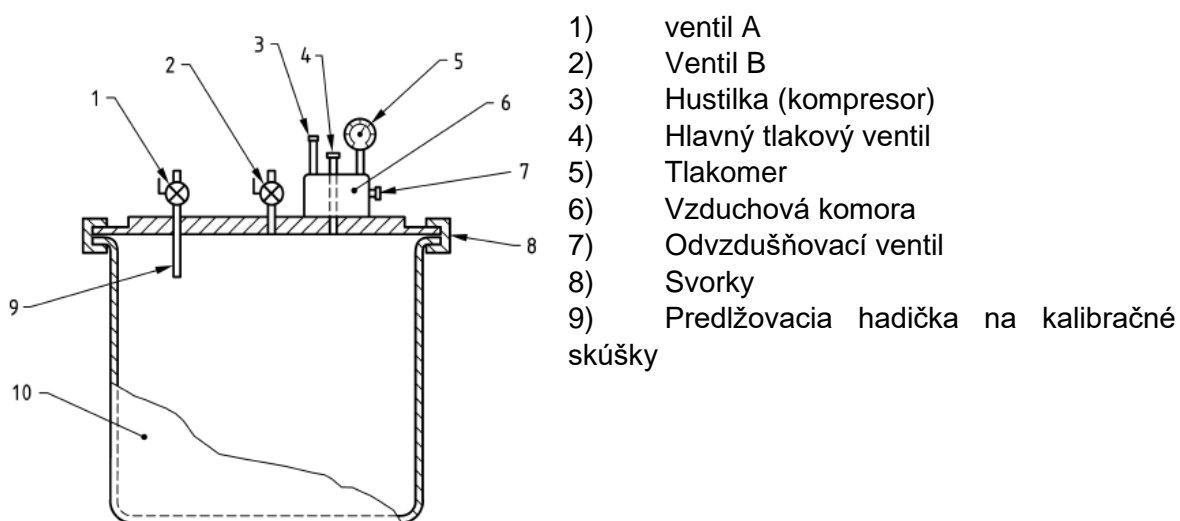
$$AC = A1 - G \quad (6)$$

kde je

A1 obsah vzduchu v skúšanom vzorku betónu;

G opravňový súčiniteľ pro kamenivo.  $G = 0$  pokiaľ nie je zmeraný alebo uvedený v NA.

Obsah vzduchu sa vyjadrí v percentách, zaokrúhlených na najbližších 0,1 %. [47]



Obrázok 21 Schéma prístroja na meranie obsahu vzduchu v čerstvej zmesi [47]

#### 4.2.4 Určenie času tuhnutia

ČSN EN 196-3: Stanovenie dôb tuhnutia a objemovej stálosti

Podstata: Skúška je modifikovaná pre potreby hmoty 3D tlačenej technológie. Namiesto cementovej kaše je použitá zmes pre 3D tlač konzistencie vhodnej pre tlač miešanej podľa návodu v norme.

Pomôcky: Vicatov prístroj s penetračnou ihlou, pozri obrázok 22, Vicatov prstenec, podložná doštička, nádoba na ponorenia naplneného prstenca do vody.

##### **Stanovenie počiatku tuhnutia**

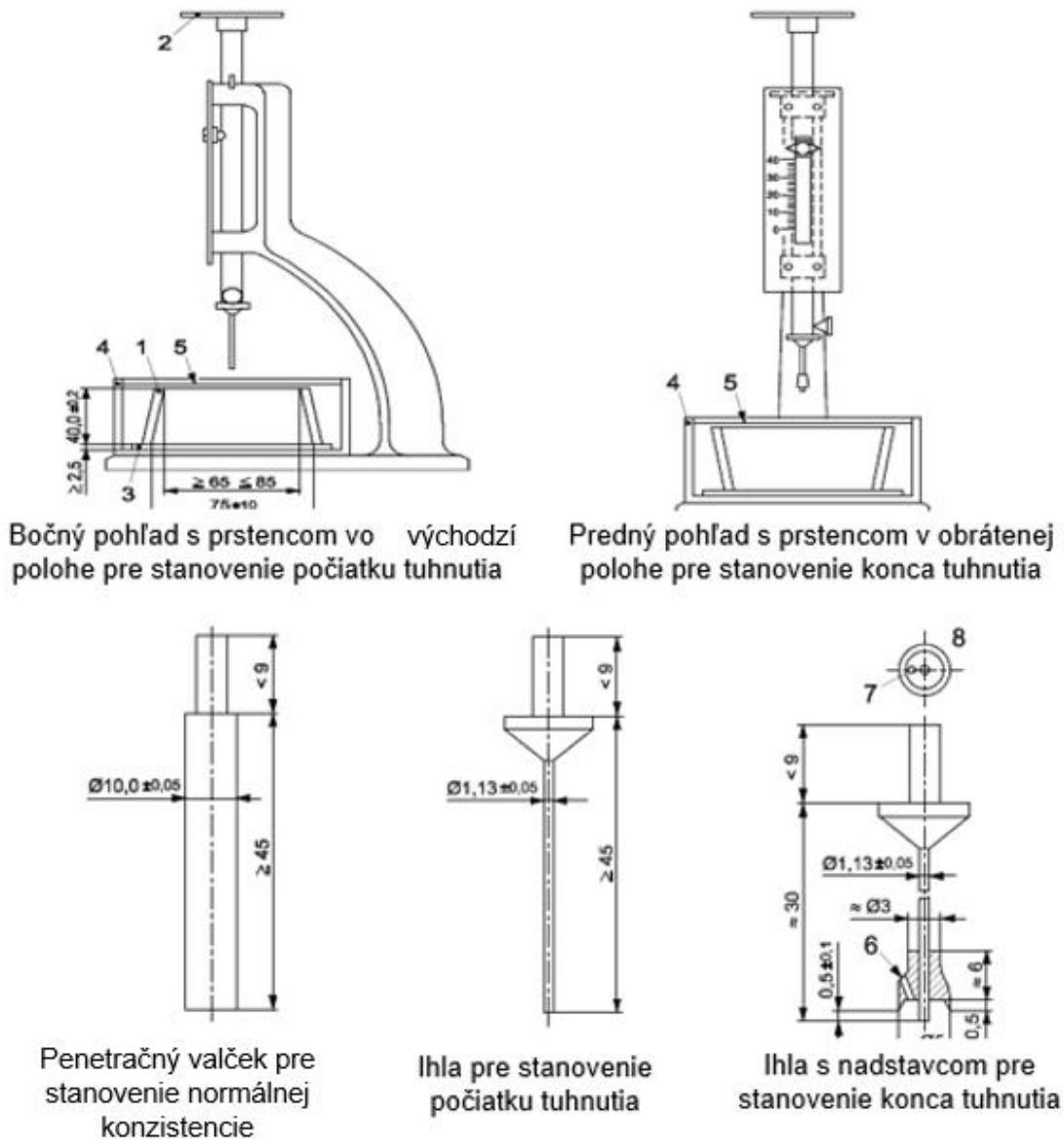
Postup: Podložná doštička, na ktorej je umiestnený Vicatov prstenec sa ľahko potrie olejom a bez nadmerného hutnenia alebo otrasov sa naplní s prebytkom. Vzduch je zo zmesi odstránený jemným poklepaním prstenca o päť ruky. Prebytok je odstránený jemným pilovitým pohybom vhodnej rovnej pomôcky a povrch zahladený do roviny.

Naplnený prstenec sa uloží s podložnou doštičkou do nádoby a doplní sa voda tak, aby povrch kaše bol minimálne 5 mm pod hladinou a vloží sa do prostredia s kontrolovanou teplotou  $(20,0 \pm 1,0)$  °C. Pri skúšaní sa nádobka s podložnou doštičkou a prstencom umiestni pod ihlu Vicatovho prístroja. Ihla sa posunie dolu tak, aby bola v styku s povrchom cementovej kaše. V tejto polohe zostane 1 alebo 2 sekundy, aby sa zabránilo počiatkovej rýchlosti alebo väčšiemu zrýchleniu pohyblivej časti. Potom sa pohyblivá časť rýchlo uvoľní a ihla sa nechá vnikat' zvislo do stredu kaše. Odpočet na stupnici sa uskutoční po ustálení polohy ihly alebo po 30 sekundách, podľa toho, čo nastane skôr.

Vpichy ihlou sa opakujú na rovnakej kaši v prstenci na rôznych miestach, najmenej však 8 mm od okraja prstenca a 5 mm od seba a najmenej 10 mm od predchádzajúceho vpichu vo vhodne zvolených časových intervaloch. Medzi vpichmi sa nádoba uloží do prostredia s kontrolovanou teplotou. Ihla sa po každom vpichu okamžite očistí.

Doba, ktorá uplynie od "nulového času" do doby, kedy vzdialenosť medzi ihlou a podložnou doštičkou je  $(6 \pm 3)$  mm, je počiatkom doby tuhnutia cementu s presnosťou na 1 minútu.

Rozmery v milimetroch



Obrázok 22 Schéma Vicatovho prístroja [48]

### Stanovenie konca tuhnutia

Postup: Naplnený Vicatov prstenec použitý pre stanovenie počiatku tuhnutia sa na podložnej doštičke obráti tak, aby vpichy pre stanovenie konca tuhnutia boli uskutočnené na strane, ktorá pôvodne priliehala k podložnej doštičke. Prstenec na podložnej doštičke sa potom ponorí do nádoby s vodou a uchováva sa v prostredí s kontrolovanou teplotou.

Pri skúšaní sa prstenec s nádobkou umiestni pod ihlu Vicatovho prístroja, ktorá sa potom opatrne posunie dolu tak, aby bola v styku s povrchom. V tejto polohe zostane 1 až 2 sekundy a následne sa ihla rýchlo uvoľní a nechá sa vniknúť do kaše. Odpočet na stupnici sa uskutoční po ustálení polohy ihly alebo po 30 sekundách podľa toho, čo nastane skôr.

Vpichy ihlou sa opakujú na rovnakej kaši v prstenci na rôznych miestach, najmenej však 8 mm od okraja prstenca a 5 mm od seba a najmenej 10 mm od predchádzajúceho vpichu vo vhodne zvolených časových intervaloch. Medzi vpichmi sa nádoba uloží do prostredia s kontrolovanou teplotou. Ihla sa po každom vpichu okamžite očistí.

Zaznamenáva sa čas, za ktorý ihla po prvýkrát vnikne iba 0,5 mm do kaše spolu s dobou, ktorá uplynula od „nulového času“. Za koniec tuhnutia sa považuje doba, kedy kruhový nástavec ihly po prvýkrát nezanechal kružnicový obrys na povrchu tvrdnúcej kaše. Väčšej presnosti môže byť dosiahnuté tak, že časové odstupy vpichov v blízkosti konca tuhnutia sú bližšie. Koniec tuhnutia musí byť potvrdený ďalšími dvoma vpichmi na rôznych miestach. [48]

#### 4.2.5 Stanovenie objemovej hmotnosti – zjednodušený postup

Skúšobné teleso: trámec 40 x 40 x 160 mm

Pomôcky: váhy, posuvne meradlo

Postup: Skúšobné telesá zväžia s presnosťou 0,001 kg a následne sa zmerajú posuvným meradlom s presnosťou 0,01 mm.

Vyhodnotenie: Objemová hmotnosť [kg/m<sup>3</sup>] sa vypočíta zo vzťahu:

$$\rho = \frac{m}{l \times b \times d} \quad (7)$$

Kde:

- $\rho$  objemová hmotnosť v kg/m<sup>3</sup>
- $m$  hmotnosť skúšobného telesa v kg
- $l$  dĺžka skúšobného telesa v m
- $b$  šírka skúšobného telesa v m
- $d$  výška skúšobného telesa

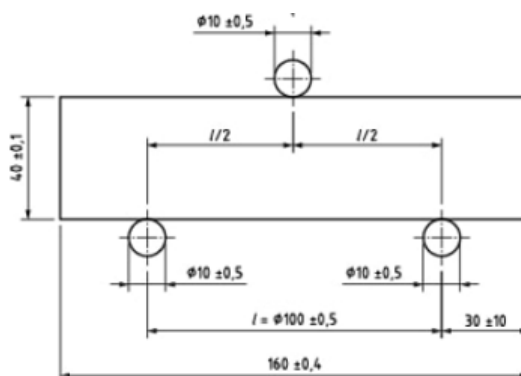
#### 4.2.6 Stanovenie pevnosti v ťahu a ohybu

ČSN EN 1015 – 11: Skúšobné metódy pre murivo – Časť 11: Stanovenie pevnosti zatvrdnutých v ťahu za ohybu a v tlaku

Skúšobné teleso: trámec 40 x 40 x 160 mm

Skúšobné zariadenie: Skúšobný prístroj umožňujúci vyvolať zaťaženie v požadovanom rozsahu. Prístroj je tvorený dvoma oceľovými podpory o dĺžke 45 – 50 mm a o priemere

( $10 \pm 0,5$ ) mm, vo vzdialenosti ( $100,0 \pm 0,05$ ) mm. Tretí oceľový valček o rovnakej veľkosti a priemere je umiestnený uprostred medzi oboma podpornými valcami (pozri obrázok 23). Tri zvislé roviny prechádzajúce tromi valcami musia ostať rovnobežné, rovnako vzdialené a kolmé k polohe skúšobného telesa počas celého priebehu skúšky.



Obrázok 23 Schéma skúšobného zariadenia pre skúšku ťahu za ohybu

**Postup:** Skúšobné teleso sa umiesti medzi valce kolmo na smer, akým bolo uložené vo forme. Následne je vyvodzované zaťaženie bez rázov rovnomernou rýchlosťou v rozsahu 10 – 50 N/s tak, aby došlo k porušeniu v intervale 30 – 90 sekúnd. Maximálne vynaložené zaťaženie (v N) sa zaznamená.

**Vyhodnotenie:** Pevnosť v ťahu za ohybu  $f$  (N/mm<sup>2</sup>) sa vypočíta ako:

$$f = 1,5 \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (8)$$

Kde:

- F maximálne vynaložené zaťaženie v N
- l vzdialenosť medzi podpornými valcami v mm
- b šírka skúšobného telesa v mm
- d výška skúšobného telesa v mm

Pevnosť v ťahu za ohybu sa zaznamená pre každé skúšobné teleso s presnosťou 0,05 N/mm<sup>2</sup>, priemerná hodnota sa vypočíta s presnosťou 0,1 N/mm<sup>2</sup>. [49]

#### 4.2.7 Stanovenie pevnosti v tlaku

ČSN EN 1015 – 11: Skúšobné metódy pre murivo – Časť 11: Stanovenie pevnosti zatvrdnutých v ťahu za ohybu a v tlaku

Skúšobné telesá: zlomky trámcov zo 4.2.5

Skúšobné zariadenie: Skúšobný prístroj umožňujúci vyvinúť zaťaženie v požadovanom rozsahu. Dve úložne doštičky šírky  $40,0 \pm 0,1$  mm, dĺžky  $40,0 \pm 0,1$  mm a hrúbky  $10,0 \pm 0,1$  mm. Tolerancia rovnosti dotkových plôch je 0,01 mm.

Postup: Zlomky trámcov sa vložia medzi doštičky kolmo na smer, akým boli uložené vo forme. Následne je vyvíjaný tlak bez rázov a zvyšuje sa rovnomerne, pokiaľ nedôjde k porušeniu telesa. Maximálne vyvinuté zaťaženie sa zaznamená ako  $F_{max}$ .

Vyhodnotenie: Pevnosť v tlaku sa vypočíta ako:

$$f_c = \frac{F_{max}}{1600} \quad (9)$$

Pevnosť v tlaku sa zaznamená pre každé skúšobné teleso s presnosťou  $0,05 \text{ N/mm}^2$ , priemerná hodnota sa vypočíta s presnosťou  $0,1 \text{ N/mm}^2$ . [49]

### 4.3 Vstupné suroviny a návrh zloženia

Navrhnuté boli štyri receptúry, ktoré možno vidieť v tabuľke 1, s použitím rôzneho množstva polymérnej prísady EVA a Bio-polyméru a rôznou dávkou vody pre docielenie vhodnej konzistencie. Tieto receptúry boli porovnávané s dvoma referenčnými zmesami, ktoré boli namiešané s rôznou dávkou zámesovej vody.

Tabuľka 1 Receptúry

Suroviny na 1000g	Receptúry			
	5E0B	5E5B	10E5B	15E5B
Cement CEM II	350	350	350	350
Piesok PR 31/30	389	389	389	389
Piesok PR 1-2	161	161	161	161
Kremenná múčka	97,65	97,65	97,65	97,65
Superplastifikátor	0,35	0,35	0,35	0,35
Odpeňovač	2	2	2	2
Polymérna prísada (EVA)	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>
Bio-polymér	<b>0</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>	<b>0,05</b>
Celkom	1005	1005,05	1010,05	1015,05

#### 4.3.1 Spojivo

Ako spojivo bol použitý portlandský zmesný cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, výrobcom je Českomoravský cement, a.s. – Závod Mokrý. Jedná sa o cement so stredne rýchlym

nárastom pevností, nízkou počiatočnou pevnosťou, stredne rýchlym vývojom hydratačného tepla a stredne vysokým celkovým hydratačným teplom. Chemické zloženie bolo určené podľa EN 196 – 2, pozri tabuľka č. 2. [50]

*Tabuľka 2 Chemické vlastnosti podľa EN 196-2 [48]*

Chemické vlastnosti podľa EN 196-2	
Látka	[%]
CaO	58,3
SiO <sub>2</sub>	19,8
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,6
MgO	2,1
SO <sub>3</sub>	2,86
Cl <sup>-</sup>	0,07
K <sub>2</sub> O	0,71
Na <sub>2</sub> O	0,14
Nerozpustný zbytok	1,35
Strata žíhaním	8,54

*Tabuľka 3 Fyzikálne vlastnosti cementu*

Parameter	Charakteristická hodnota	Norma
Normálna konzistencia [%]	29,5	EN 196-3
Počiatok tuhnutia [min]	241	EN 196-3
Koniec tuhnutia [min]	322	EN 196-3
Objemová stálosť [mm]	0,9	EN 196-3
Merný povrch [m <sup>2</sup> /kg]	511	EN 196-6
Merná hmotnosť [kg/m <sup>3</sup> ]	3020	EN 196-6
Sypná hmotnosť v autocisterne [kg/m <sup>3</sup> ]	920	
Sypná hmotnosť v sile [kg/m <sup>3</sup> ]	1200 - 1600	
Hydratačné teplo 7 dní [J/g]	274	EN 196-8

#### 4.3.2 Plnivo

Ako kamenivo do receptúr (pozri tabuľku 1) bol použitý piesok PR 31/30, PR 1 – 2 a kremenná múčka. Tieto kameniva s rôznou zrnitosťou zabezpečujú vhodnú krivku zrnitosti.

### ***Piesok PR 31/30***

Piesok PR 31/30 zaraďuje spoločnosť Provoďínske písky a.s. medzi zlievarenské piesky, piesky pre stavebníctvo, stavebnú chémiu a šport. Jedná sa o piesky, ktoré sú upravované triedením a vyznačujú sa štandardizovanými chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami, obsahom  $\text{SiO}_2$  99%. Dodávajú sa v vlhké po praní alebo sušené. Deklarovanú zrnitosť v rozsahu 0.3 – 1 mm. [51]

### ***Piesok PR 1 – 2***

Piesok PR 1 – 2 zaraďuje spoločnosť Provoďínske písky a.s. do kategórie filtračné piesky a piesky pre stavebníctvo a stavebnú chémiu. Jedná sa o surovinu so štandardizovanými chemickými a fyzikálnymi vlastnosťami, vyznačujú sa vysokou chemickou čistotou s obsahom  $\text{SiO}_2$  až 99 %. Rozsah zrnitosti piesku PR 1 – 2 je 1 – 2 mm.

Finálnemu výrobku predchádza náročný výrobný postup od rozpojovania spevneného pieskovca až po následnú úpravu (odkalenie, presievanie a triedenie) a prípadne aj sušenie. Piesok je dodávaný vlhký alebo sušený. [52]

### ***Kremenná múčka***

Kremenná múčka výroby Sklopísek střeleč, a.s. je vyrábaná suchým mletím kremenného piesku v neželeznom prostredí a následným vzduchovým roztriedením. Obsah  $\text{SiO}_2$  je podľa technického listu 99,6 %. Typický obsah  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  je 0,05 % a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  0,2 %. Vďaka chemickej čistote je tento piesok vynikajúcou surovinou pre výrobu špeciálnych maltových zmesí, v sklárskom a zlievarenskom priemysle. Kremenné múčky sa dodávajú voľne ložené v cisternách. Merná hmotnosť charakteristicky predstavuje hodnotu  $2,65 \text{ g/cm}^3$ . [53]

### ***Prísady***

Bola použitá superplastifikačná prísada na báze polykarboxylátov od výrobcu BASF.

Odpeňovacia prísada od výrobcu Evonik umožňuje miešanie zmesi bez vnášania vzduchu vplyvom napnenia v dôsledku použitia polymérnej prísady.

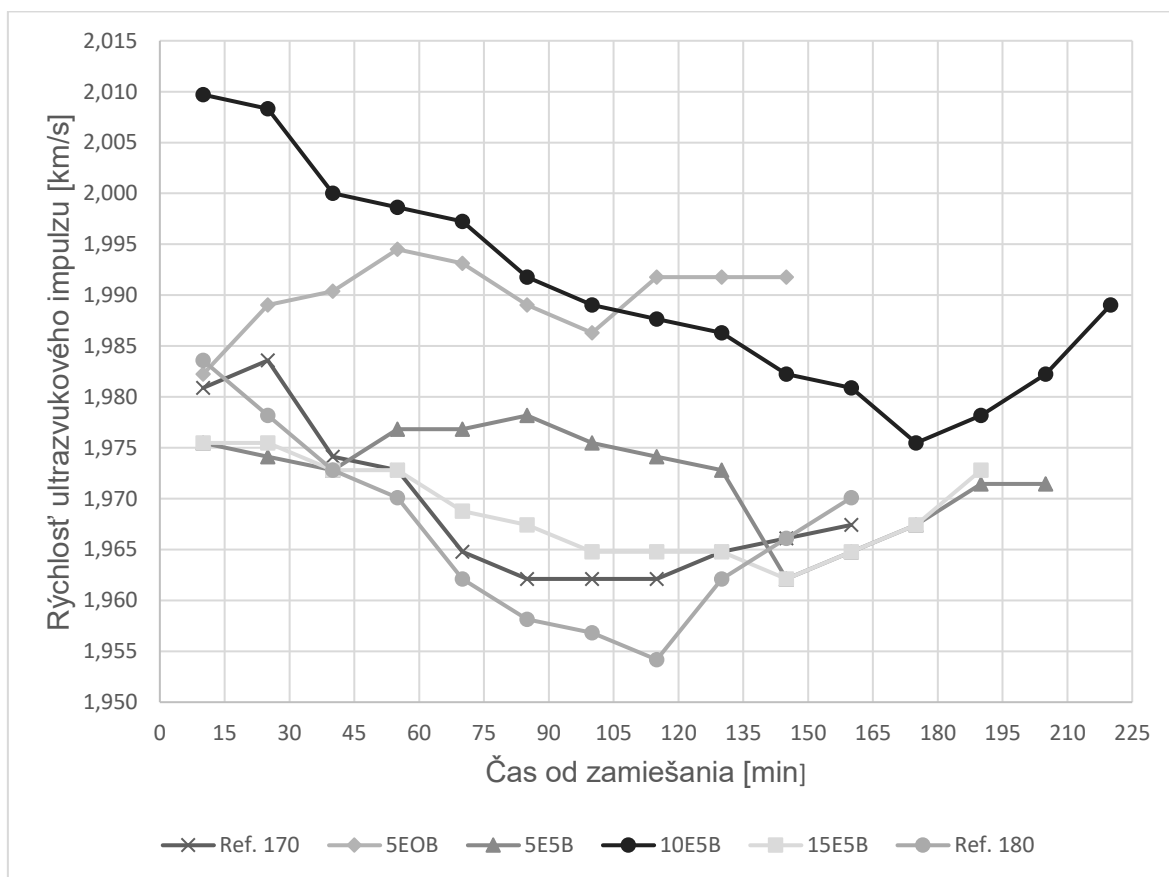
Polymérna prísada bola použitá Vinnapas 4240 N od výrobcu Wecker. Jedná sa o viacúčelový dispergovateľný polymér do suchých maltových zmesí, je založený na veľmi pružnom kopolymére vinylacetátu a etylénu. Má taktiež neutrálny vplyv na reológiu a poskytuje základné vlastnosti priľnavosť a pružnosť. [50]

Bio-polymérna prísada bola použitá pre úpravu reologických vlastností zmesi.

## 4.4 Vyhodnotenie

### 4.4.1 Ultrazvuková analýza

Hodnoty namerané pomocou ultrazvukovej analýzy boli vyhodnotené na základe postupu uvedeného v kapitole 4.2.3. Z vyhodnotených výsledkov boli zhotovené grafy (pozri Graf 1 a 2).

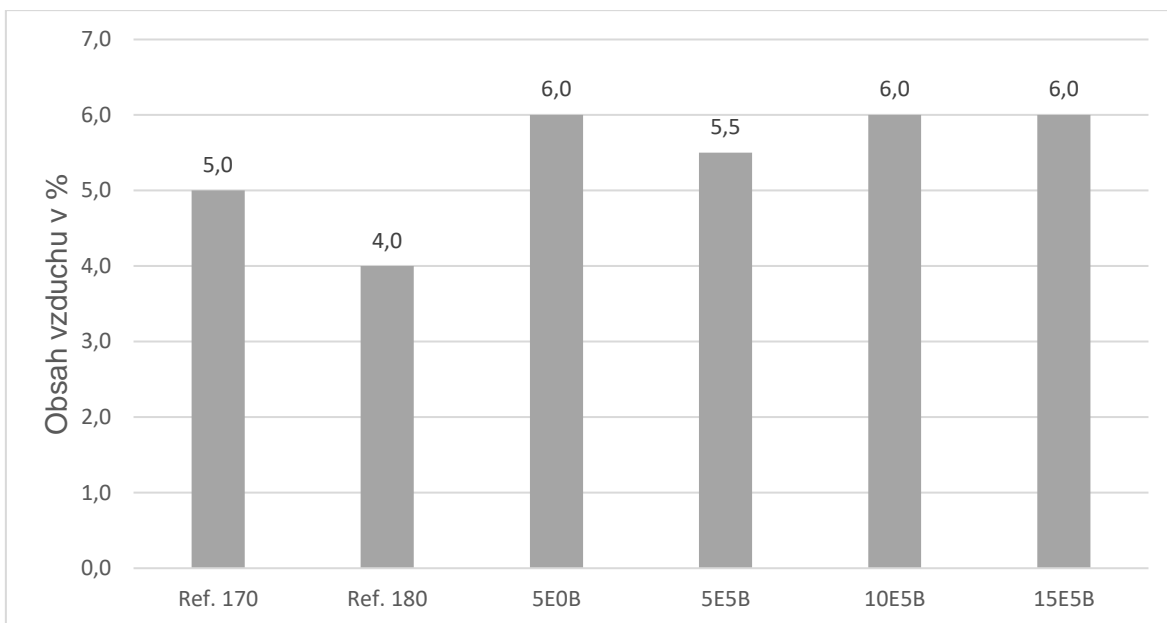


Graf 1 Rýchlosť ultrazvukového impulzu v čase pre použité receptúry

Podľa Grafu 1 najvyšších rýchlostí ultrazvukových impulzov v štádiu počiatkovej hydratácie dosiahla zmes 10E5B s použitím 10 g polyméru a 0,05 g bio-polyméru na 1kg suchej zmesi. Z nameraných hodnôt taktiež možno určiť počiatok tuhnutia skúšaných zmesí. Pomocou ultrazvukovej technológie bol určený počiatok tuhnutia referenčnej zmesi 170 ml vody na 1kg suchej zmesi na 115 min, referenčnej s použitím 180 ml vody na 1 kg suchej zmesi na 115 min, navrhutej zmesi 5E0B na 100 min, 5E5B na 145 min, 10E5B na 175 min a 15E5B na 145 min.

### 4.4.2 Obsah vzduchu

Obsah vzduchu v čerstvej zmesi bol stanovovaný tlakovou metódou, s postupom opísaným v kapitole 4.2.3. V Grafe 3 možno vidieť vyhodnotené namerané hodnoty.

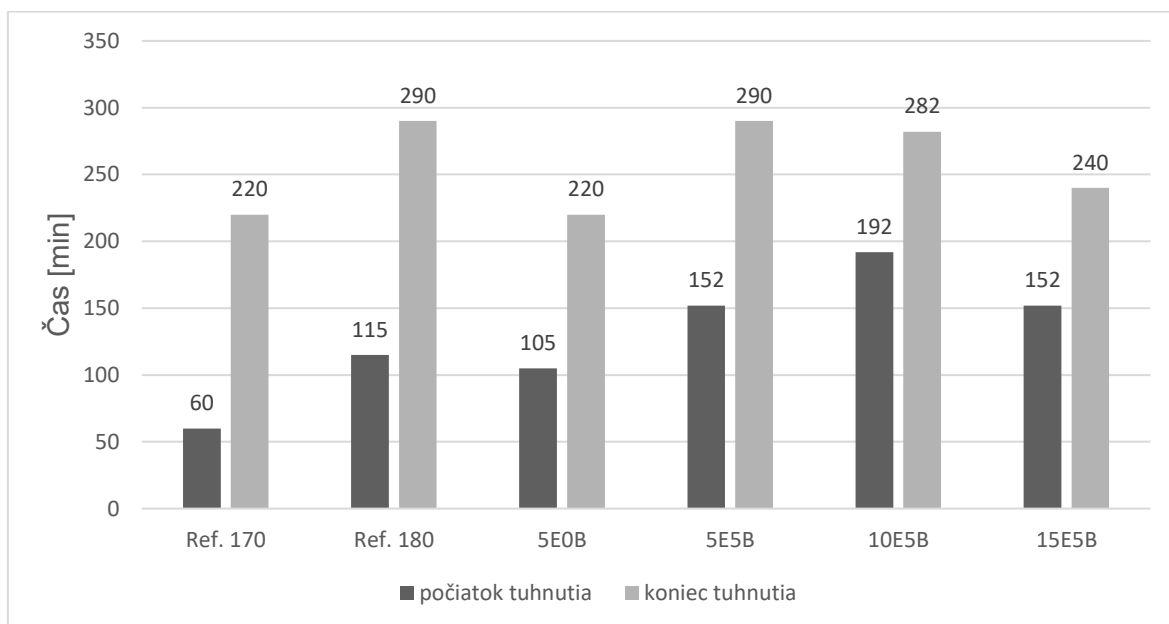


*Graf 2 Obsah vzduchu v čerstvej zmesi použitých receptúr*

Najmenšia hodnota objemu vzduchu v čerstvej zmesi bola nameraná u referenčnej zmesi s použitím 180 ml vody na 1kg suchej zmesi a to 4 %, nasledovala referenčná zmes s použitím 10 ml vody na 1 kg suchej zmesi s hodnotou 5 %. Najmenšiu hodnotu z navrhnutých zmesí bola 5,5 % u zmesi 5E5B, na ostatných navrhnutých zmesiach bola nameraná hodnota 6 % vzduchu.

#### 4.4.3 Určenie času tuhnutia

Počiatok a koniec tuhnutia referenčných a navrhnutých zmesí bol stanovený na základe postupu opísanom v kapitole 4.2.4. Vyhodnotený výsledky možno vidieť v Grafe 4.

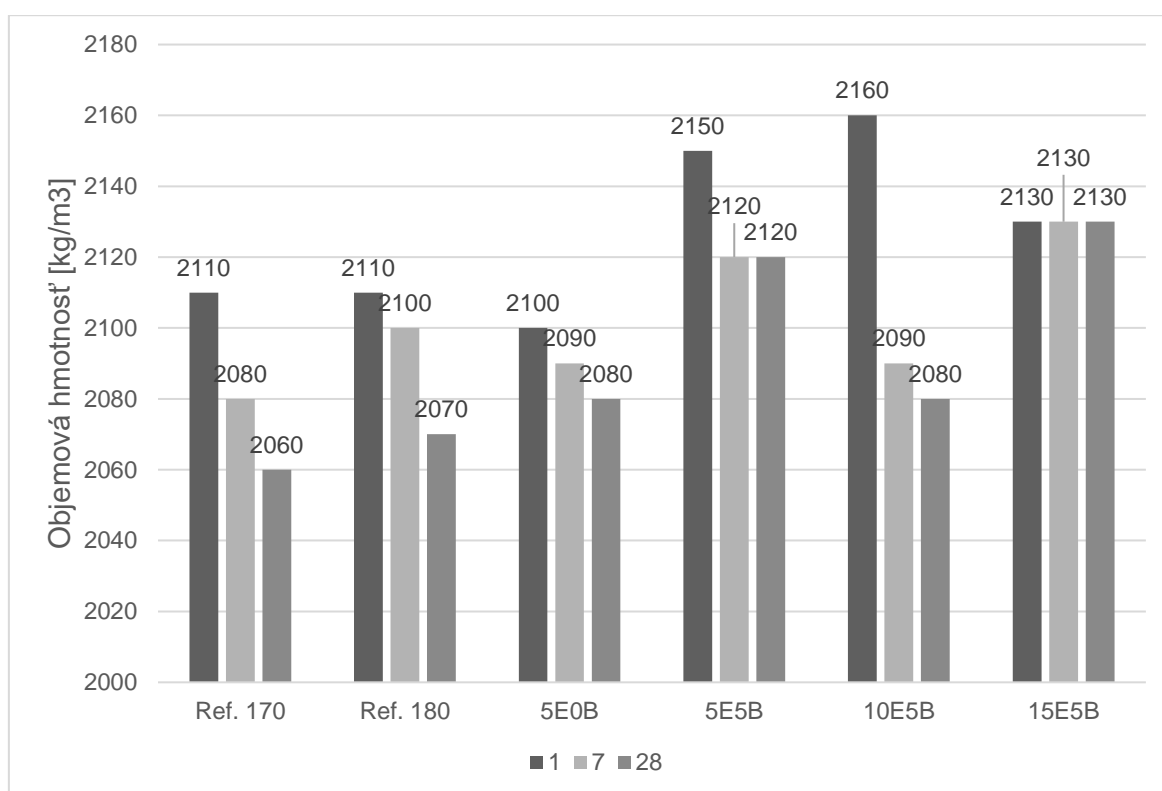


*Graf 3 Počiatky a konce tuhnutia použitých receptúr*

Najrýchlejší počiatok (60 min) aj koniec (220) tuhnutia bol nameraný u referenčnej zmesi s použitím 170 ml vody na 1 kg suchej zmesi. Nasledovala navrhnutá zmes 5E0B s použitím 5 g polymérnej prísady a bez použitia bio-polyméru (počiatok 105 min, koniec taktiež 220 min). Najpomalší počiatok tuhnutia bol nameraný u zmesi 10E5B a to až 192 min, koniec tuhnutia u tejto zmesi bol nameraný ako 282 min.

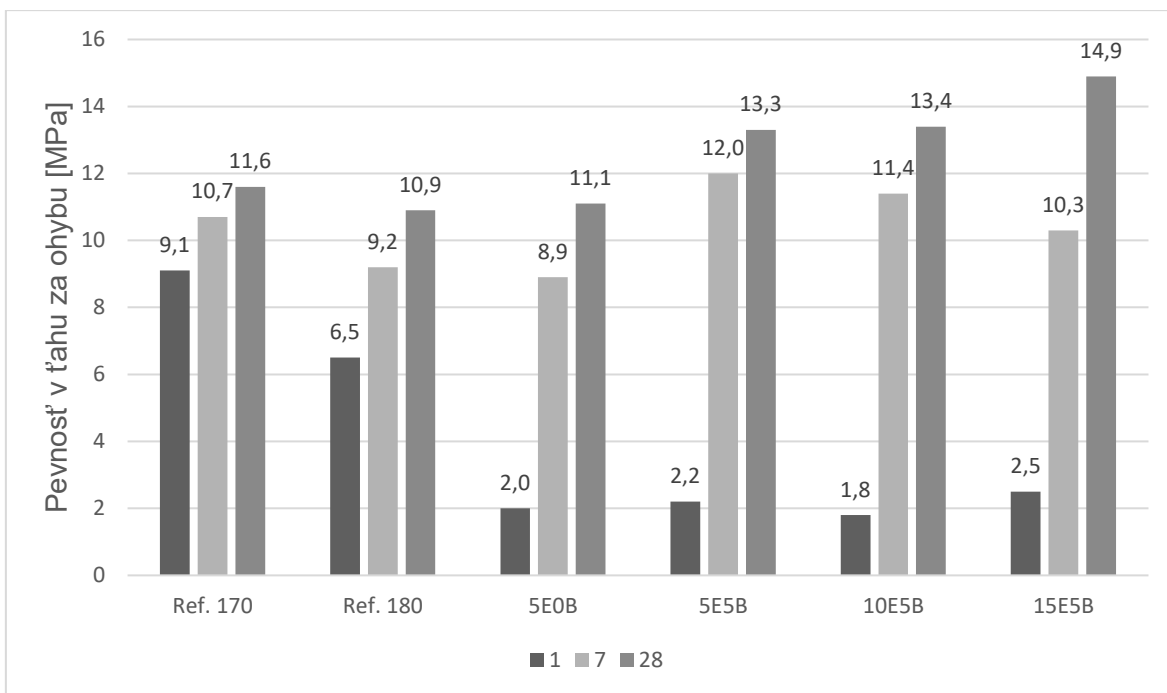
#### 4.4.7 Stanovenie objemovej hmotnosti, pevnosti v ťahu za ohybu a pevnosti v tlaku

Postup stanovenia objemovej hmotnosti je objasnený v kapitole 4.2.5, pevnosť v ťahu za ohybu v kapitole 4.2.6 a pevnosť v tlaku v kapitole 4.2.7. Vypočítané a vyhodnotené výsledky sú znázornené v Grafoch 5, 6, 7.



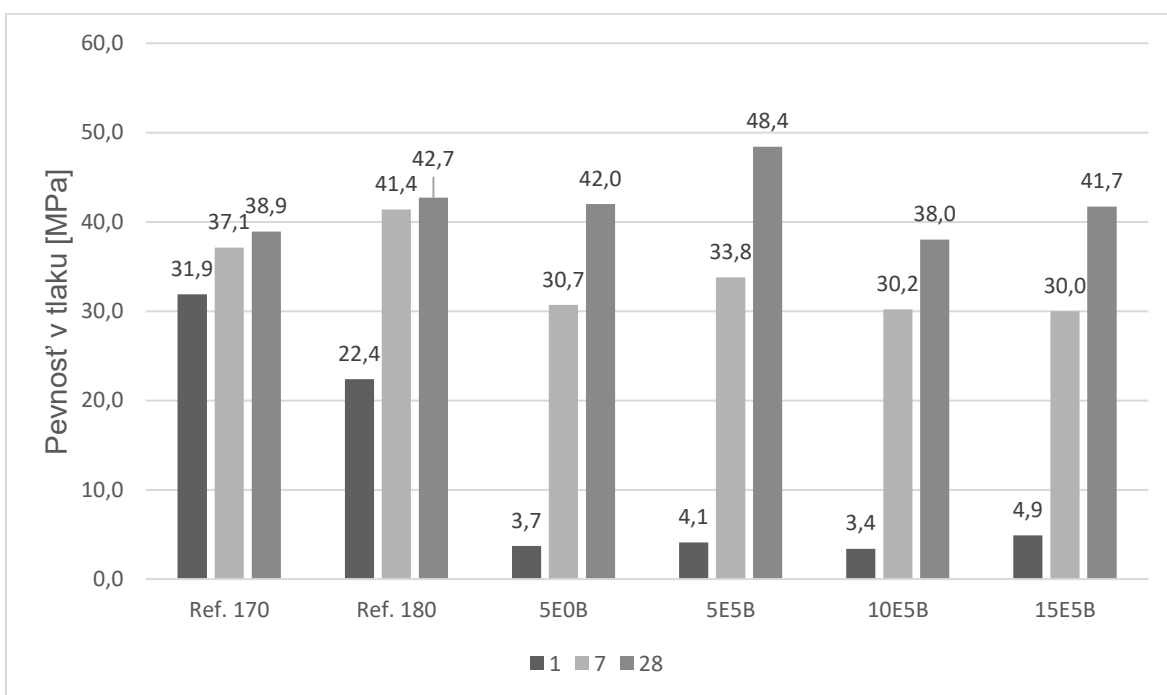
Graf 4 Porovnanie objemových hmotností použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia

Najvyššia objemová hmotnosť po 1 dni zrenia bola stanovená u zmesi 5E5B, naopak najnižšia u referenčnej s použitím 180 ml vody na 1 kg suchej zmesi. Najvyššia objemová hmotnosť po 28 dňoch bola stanovená u zmesi 15E5B a to 2130 kg/m<sup>3</sup>. U tejto zmesi sa objemová hmotnosť v priebehu času nemenila. Najnižšia objemová hmotnosť po 28 dňoch bola stanovená u referenčnej zmesi s použitím 170 ml vody na 1 kg suchej zmesi a s hodnotou 2060 kg/m<sup>3</sup>. Najnižšia hodnota objemovej hmotnosti u navrhnutých zmesí bola dosiahnutá po 28 dňoch u zmesi 10E5B s použitím 10 g polyméru a 0,05 g bio-polyméru a 5E0B s použitím 5 g polyméru a bez použitia bio-polyméru.



*Graf 5 Porovnanie pevností v ťahu za ohybu použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia*

Najvyššie pevnosti v ťahu za ohybu po 1 dni dosiahla referenčná zmes s použitím 170 ml vody na 1 kg suchej zmesi s hodnotou až 9,1 MPa, druhá referenčná zmes vykazovala taktiež vysokých hodnôt a to 6,5. Navrhnuté zmesi vykazovali nižších hodnôt 1,8 – 2,5 MPa. U navrhnutých zmesí bol pozorovaný vzrast pevností v ťahu za ohybu a najvyšších pevností dosiahli navrhnuté zmesi po 28 dňoch. Najvyššiu pevnosť v ťahu za ohybu po 28 dňoch dosiahla zmes 15E5B a to 14,9 MPa.



*Graf 6 Porovnanie pevností v tlaku použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia*

Pevnosti v tlaku všetkých zmesí podľa očakávania rástli vplyvom času. Najvyššie počiatočné pevnosti po 1 dni dosiahla referenčná zmes s použitím 170 ml vody na 1 kg suchej zmesi s hodnotou až 31,9 MPa, vysokú hodnotu dosiahla taktiež druhá referenčná zmes. Naopak navrhnuté zmesi vykazovali nízke pevnosti po 1 dni a to 3,4 – 4,9 MPa. Najvyššie pevnosti po 28 dňoch však dosiahla navrhnutá zmes 5E5B s hodnotou 48,4 MPa.

## 5 Diskusia výsledkov

V praktickej časti boli na základe zadania bakalárskej práce overené základné vlastnosti referenčných a navrhnutých zmesí. Navrhnuté zmesi sa líšili množstvom polyméru v dávkach 5, 10 a 15 gramov a v prítomnosti bio-polyméru.

Pomocou ultrazvukovej analýzy bola stanovená rýchlosť ultrazvukového impulzu v km/s i referenčných a skúmaných zmesí. Na základe vývoja rýchlostí bolo možné určiť počiatok tuhnutia zmesí. Ako počiatok tuhnutia je označený bod, kedy rýchlosť impulzu prestane klesať a začne stúpať. Najrýchlejší počiatok tuhnutia bol stanovený pre referenčnú hmotu s použitím 170 ml vody na 1 kg suchej zmesi s časom 85 min od zamiešania. Pridaním viac vody (o 10 ml) bolo docielené predĺženie počiatku tuhnutia. Navrhnuté zmesi dosahovali rýchlostí počiatkov tuhnutia 100 – 185 min. Zmena rýchlosti počiatku tuhnutia bola spôsobená rozdielnou dávkou polyméru. Zvyšovaním dávky kopolyméru vinylacetátu a etylénu do 10 g na 1kg suchej zmesi bolo dosiahnuté predĺženie počiatku tuhnutia, pri použití 15 g bolo už pozorované skrátenie doby počiatku tuhnutia. Dlhšie počiatky tuhnutia môžu mať za následok dlhšie otvorené časy tuhnutia, čo umožňuje pevné spojenie vrstiev v procese tlače aj pri dlhších intervaloch kladenia vrstiev a prípadnom prerušení tlače. Namerané hodnoty počiatku tuhnutia boli overené taktiež pomocou Vicatovho prístroja. Namerané hodnoty sa mierne líšili s maximálnou odchýlkou 17 minút.

Obsah vzduchu v čerstvých zmesiach bol stanovený tlakovou metódou. Všetky navrhnuté testované zmesi vyhoveli požiadavke TKP 18 na minimálne prevzdušnenie 4 % s hodnotami 5,5 – 6 %. Jedine referenčná zmes s použitím 180 ml vody na 1 kg suchej zmesi vykazovala hraničné 4 %. A tieto hodnoty boli ovplyvnené pomocou pridania odpeňovacej prísady, ktorá obmedzila vnášanie vzduchových bublín do objemu čerstvej zmesi v procese miešania vplyvom superplastifikačnej prísady.

Z navrhnutých receptúr a referenčných zmesí boli vyhotovené skúšobné telesá v rozmeroch 40 x 40 x 160 mm, ktoré boli odformované po 1 – 3 dňoch podľa normy ČSN EN 1015. Na skúšobných telesách v zatvrdnutom stave bola meraná objemová hmotnosť, pevnosť v ťahu za ohybu a pevnosť v tlaku po 1, 7 a 28 dňoch. Nameraná objemová

hmotnosť skúšobných telies zodpovedala predpokladu, že by mala vplyvom času a vyparovania vody klesať. Hodnoty pevností v ťahu za ohybu a v tlaku sa naopak vplyvom doby zrenia a štádia hydratácie podľa očakávania zvyšovali. U referenčných zmesí bol pozorovaný veľmi rýchly nárast počiatočných pevností (po 1 dni), naopak navrhnuté zmesi sa pohybovali len v zlomkoch pevností referenčných zmesí, po 28 dňoch už nebol nárast pevností až taký výrazný. Naopak pevnosti po 28 dňoch u navrhnutých zmesí boli dosiahnuté výrazne vyššie ako počiatočné. A taktiež vyššie v porovnaní s referenčnými zmesami bolo dosiahnutých vyšších pevností. Najvyššiu pevnosť v ťahu za ohybu po 28 dňoch dosiahla zmes 15E5B, a teda s použitím najväčšieho množstva polyméru a najvyššiu pevnosť v tlaku dosiahla 5E5B s použitím najmenšieho polyméru, čo by mohlo znamenať, že nie je nutné pridávať väčšie množstvo polyméru pre dosiahnutie požadovaných pevností. U referenčných zmesí bolo taktiež pozorované, že vplyvom väčšieho množstva vody bolo dosiahnutých vyšších pevností, čo môže byť spôsobené dostatočnou dávkou vody potrebnou pre hydratáciu. Navrhnuté zmesi možno na základe pevností zatriediť do pevnostnej triedy podľa ČSN EN 206 + A2 do triedy C 30/37, čo spĺňa cieľovú požiadavku TKP – 18. Zmes 5E5B možno dokonca zaradiť do triedy C 35/45.

## 6 Záver

Úlohou teoretickej časti tejto bakalárskej práce bolo spracovať rešerš súčasného stavu cementových kompozitov 3D tlačených technológií zameraných na zníženie uhlíkovej stopy pomocou zníženia spotreby portlandského cementu, ktorý je celosvetovo veľkým producentom CO<sub>2</sub>, a teda jeho náhradou vhodnými druhotnými surovinami na základe zásad cirkulárnej ekonomiky. V úvode boli rozobraté základné suroviny vstupujúce do výroby a taktiež suroviny, ktoré sú využívané ako náhrada portlandského cementu. Boli charakterizované a definované základné vlastnosti, ktoré je nutné sledovať a kontrolovať u aditívnych technológií. Následne boli rozobraté parametre a systémy charakteristické pre aditívne technológie. V závere boli charakterizované požiadavky cirkulárnej ekonomiky a požiadavky stanovené v Technických kvalitatívnych podmienkach stavieb pozemných komunikácií – kapitola 18.

V praktickej časti boli na základe získaných informácií experimentálne overené základné vlastnosti navrhnutých receptúr vhodných pre 3D tlač betónu, ktoré boli navrhnuté s prihliadnutím na zásady cirkulárnu ekonomiku, teda využitím druhotných surovín ako náhrady portlandského cementu a vybraných požiadaviek TKP – 18. Bakalárska práca sa zaoberá splnením konkrétnej hodnoty prevzdušnenia (nad 4 %), pevnostnej triedy (C 30/37) a vodného súčiniteľa (max. 0,45). Všetky navrhnuté receptúry tieto požiadavky spĺňajú. Bol sledovaný vplyv množstva polyméru a bio-polyméru na výsledné hodnoty receptúr, kde bolo odsledované, že pre dosiahnutie maximálnej pevnosti v tlaku je postačujúca dávka polyméru 5 g na 1 kg suchej zmesi, čo môže mať za následok aj najnižšie hodnoty prevzdušnenia pri tejto dávke. So zvyšujúcou sa dávkou boli dosiahnué nižšie pevnosti. S ohľadom na pevnosť v ťahu sa javila ako lepšia dávka až 15 g. Preto je pri návrhu receptúry nutné prihliadať na konečné požiadavky tlačeného objektu. Pridaním väčšieho množstva polymérnej prísady bolo taktiež docielené predĺženie doby počiatku tuhnutia, čo otvára priestor pre dlhšie intervaly kladenia vrstiev, ale taktiež to môže viesť k nedostatočnej únosnosti následných vrstiev pri kratšom intervale. Tento parameter je teda nutné zohľadniť pre konkrétny tlačený objekt a technológiu ukladania vrstiev. Vzhľadom na získané výsledky sa ako ideálna receptúra javila 5E5B, kde bola polymérna prísada dávkovaná v množstve 5 g na 1 kg suchej zmesi.

Bakalárska práca bola spracovaná v rámci projektu TAČR č. CK03000240 s názvom „Vývoj cementových kompozitů a procesních parametrů pro 3D tisk prvků splňujících požadavky dopravních staveb“. Otvára priestor pre následné pokračovanie ako diplomovej práce s možnosťami zamerať sa na ďalšie požiadavky TKP – 18, vplyv konkrétnych náhrad portlandského cementu na dlhodobé pevnosti, ktoré nie sú v štúdiách spracované.

## 7 Zdroje

- [1] DEY, Dhruvman, Dodda SRINIVAS, Biranchi PANDA, Prannoy SURANENI a T.G. SITHARAM. Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2022, **340**, 130749. ISSN 0959-6526
- [2] SCHULDT, Steven J., Jeneé A. JAGODA, Andrew J. HOISINGTON a Justin D. DELORIT. A systematic review and analysis of the viability of 3D-printed construction in remote environments. *Automation in Construction*. 2021, **125**, 103642. ISSN 0926-5805
- [3] KHAN, M.A. Mix suitable for concrete 3D printing: A review: A review. *Materials Today: Proceedings*. 2020, **32**, 831-837. ISSN 2214-7853
- [4] IVANOVA, Irina, Egor IVANIUK, Sameercharan BISETTI, Venkatesh N. NERELLA a Viktor MECHTCHERINE. Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2022, **156**, 106764. ISSN 0008-8846
- [5] IVANOVA, Irina, Egor IVANIUK, Sameercharan BISETTI, Venkatesh N. NERELLA a Viktor MECHTCHERINE. Comparison between methods for indirect assessment of buildability in fresh 3D printed mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*. 2022, **156**, 106764. ISSN 0008-8846
- [6] Druhy cementu: Aké druhy cementu poznáme?. *Ebeton: Encyklopedie* [online]. 1 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: doi:<https://www.ebeton.cz/pojmy/druhy-cementu/>
- [7] NÁJDENÁ, Iveta a Milan ZAJÍČEK. *Betóny: Príručka technológa 1*. Bratislava: Slovenská asociácia výrobcov transportbetónu, 06/2008n. I., 184 s. [cit. 2023-04-15]. 1. vydanie. ISBN 978-80-969940-0-7.
- [8] CHEN, Yu, Shan HE, Yidong GAN, Oğuzhan ÇOPUROĞLU, Fred VEER a Erik SCHLANGEN. A review of printing strategies, sustainable cementitious materials and characterization methods in the context of extrusion-based 3D concrete printing. *Journal of Building Engineering*. 2022, **45**, 103599. ISSN 2352-7102
- [9] NODEHI, Mehrab, Togay OZBAKKALOGLU a Aliakbar GHOLAMPOUR. Effect of supplementary cementitious materials on properties of 3D printed conventional and alkali-activated concrete: A review: A review. *Automation in Construction*. 2022, **138**, 104215. ISSN 0926-5805
- [10] SCRIVENER, Karen L. Options for the future of cement. *Indian Concr. J*, 2014, 88.7: 11-21.
- [11] AHMED, Ghafur H., Nasih H. ASKANDAR a Ghazi B. JUMAA. A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. *Structures*. 2022, **43**, 508-532. ISSN 2352-0124

- [12] NÁJDENÁ, Iveta a Milan ZAJÍČEK. *Betóny: Průručka technologa 1*. Bratislava: Slovenská asociácia výrobcov transportbetónu, 06/2008n. I., 184 s. [cit. 2023-04-15]. 1. vydanie. ISBN 978-80-969940-0-7.
- [13] AVET, François, Ruben SNELLINGS, Adrian ALUJAS DIAZ, Mohsen BEN HABA a Karen SCRIVENER. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*. 2016, **85**, 1-11. ISSN 0008-8846. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- [14] AVET, François, Ruben SNELLINGS, Adrian ALUJAS DIAZ, Mohsen BEN HABA a Karen SCRIVENER. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research*. 2016, **85**, 1-11. ISSN 0008-8846. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.02.015>
- [15] ALUJAS, Adrian, Rodrigo FERNÁNDEZ, Rafael QUINTANA, Karen L. SCRIVENER a Fernando MARTIRENA. Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration: Influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration. *Applied Clay Science*. 2015, **108**, 94-101. ISSN 0169-1317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.01.028>
- [16] ROVNANÍK, Pavel a Pavla ROVNANÍKOVÁ, ed. *METAKAOLÍN*. Brno: Vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-80-214-4438-6.
- [17] CLAVERIE, M., F. MARTIN, J.P. TARDY, M. CYR, P. DE PARSEVAL, O. GRAUBY a C. LE ROUX. Structural and chemical changes in kaolinite caused by flash calcination: Formation of spherical particles: Formation of spherical particles. *Applied Clay Science*. 2015, **114**, 247-255. ISSN 0169-1317. doi:<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.031>
- [18] AKHLAGHI, Omid, Tunahan AYTAS, Buse TATLI, et al. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement. *Cement and Concrete Research*. 2017, **101**, 114-122. ISSN 0008-8846. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.028>
- [19] NAIR, Sooraj AO, et al. Linking fresh paste microstructure, rheology and extrusion characteristics of cementitious binders for 3D printing. *Journal of the American Ceramic Society*, 2019, 102.7: 3951-3964.
- [20] CHEN, Mingxu, Lei YANG, Yan ZHENG, et al. Yield stress and thixotropy control of 3D-printed calcium sulfoaluminate cement composites with metakaolin related to structural build-up. *Construction and Building Materials*. 2020, **252**, 119090. ISSN 0950-0618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119090>
- [21] BOHUCHVAL, M., et al. Effect of metakaolin, and natural fibres on rheological properties of 3D printing concrete. *Proc. Inst. Civ. Eng.-Constr. Mater*, 2020, 19.6: 1-34.
- [22] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: BJ04 Technologie betonu 1*. Brno, 2005. Opory. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební.
- [23] LU, Bing, Yiwei WENG, Mingyang LI, Ye QIAN, Kah Fai LEONG, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019, **207**, 477-490. ISSN 0950-0618

- [24] MARCHON, Delphine, Shiho KAWASHIMA, Hela BESSAIES-BEY, Sara MANTELLATO a Serina NG. Hydration and rheology control of concrete for digital fabrication: Potential admixtures and cement chemistry: Potential admixtures and cement chemistry. *Cement and Concrete Research*. 2018, **112**, 96-110. ISSN 0008-8846. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.014>
- [25] JUNLI Liu, Vuong Nguyen-Van, Biranchi Panda, Kate Fox, Anton du Plessis, and Phuong Tran. Additive Manufacturing of Sustainable Construction Materials and Form-finding Structures: A Review on Recent Progresses. *3D Printing and Additive Manufacturing*. Feb 2022. 12-34.
- [26] TADROS, Tharwat F. (ed.). *Dispersion of powders: in liquids and stabilization of suspensions*. John Wiley & Sons, 2012.
- [27] BESSAIES-BEY, Hela, Robert BAUMANN, Marc SCHMITZ, Michael RADLER a Nicolas ROUSSEL. Effect of polyacrylamide on rheology of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*. 2015, **76**, 98-106. ISSN 0008-8846. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.012>
- [28] VETCHÝ, Jan. Přísady do betonů a malt III: Odpěňovací přísady. *Www.mct.cz* [online]. 2015 [cit. 2023-05-04]. <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>
- [29] ROUSSEL, Nicolas. Rheological requirements for printable concretes. *Cement and Concrete Research*. 2018, **112**, 76-85. ISSN 0008-8846
- [30] AHMED, Ghafur H., Nasih H. ASKANDAR a Ghazi B. JUMAA. A review of largescale 3DCP: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies: Material characteristics, mix design, printing process, and reinforcement strategies. *Structures*. 2022, **43**, 508-532. ISSN 2352-0124
- [31] CHEN, Yuning, Yamei ZHANG, Yudong XIE, Zedi ZHANG a Nemkumar BANTHIA. Unraveling pore structure alternations in 3D-printed geopolymer concrete and corresponding impacts on macro-properties. *Additive Manufacturing*. 2022, **59**, 103137. ISSN 2214-8604
- [32] CHEN, Yu, Ze CHANG, Shan HE, Oğuzhan ÇOPUROĞLU, Branko ŠAVIJA a Erik SCHLANGEN. Effect of curing methods during a long time gap between two printing sessions on the interlayer bonding of 3D printed cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2022, **332**, 127394. ISSN 0950-0618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127394>
- [33] LU, Bing, Yiwei WENG, Mingyang LI, Ye QIAN, Kah Fai LEONG, Ming Jen TAN a Shunzhi QIAN. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019, **207**, 477-490. ISSN 0950-0618
- [34] ROUPEC, Josef. *Technologie 3D tisku konstrukcí z betonu*. Brno, 2020. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [35] ŠTADLER, Marek. *První česká portálová 3D tiskárna* [online]. 10.3.2022 [cit. 2023-05-18]. Dostupné z: doi:[https://www.ebeton.cz/clanky/2022\\_1\\_12-prvni-ceska-portalova-3d-tiskarna/](https://www.ebeton.cz/clanky/2022_1_12-prvni-ceska-portalova-3d-tiskarna/)

- [36] NODEHI, Mehrab, Togay OZBAKKALOGLU a Aliakbar GHOLAMPOUR. Effect of supplementary cementitious materials on properties of 3D printed conventional and alkali-activated concrete: A review: A review. *Automation in Construction*. 2022, **138**, 104215. ISSN 0926-5805
- [37] CARRASCO, Manuel a F. PUERTAS. Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: Alkali activated cements or geopolymers: Alkali activated cements or geopolymers. *Revista Ingenieria de Construccion*. 2017/08/01, **32**, 5-12
- [38] AHMED, Ghafur H. A review of "3D concrete printing": Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*. 2023, **66**, 105863. ISSN 2352-7102.
- [39] KROMOSER, B., S. REICHENBACH, R. HELLMAYR, R. MYNA a R. WIMMER. Circular economy in wood construction – Additive manufacturing of fully recyclable walls made from renewables: Proof of concept and preliminary data: Proof of concept and preliminary data. *Construction and Building Materials*. 2022, **344**, 128219. ISSN 0950-0618. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128219>
- [40] *Inštitút cirkulárnej ekonomiky: cirkulárna ekonomika* [online]. Bratislava [cit. 2023-05-18]. <https://www.incienc.sk/cirkularna-ekonomika/>
- [41] Strategický rámec cirkulární ekonomiky České Republiky 2040: Maximálně cirkulární Česko v roce 2040 [online]. In: . 2021, s. 160 [cit. 2023-05-18]. [https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cirkularni\\_cesko/\\$FILE/OODP-Cirkularni\\_Cesko\\_2040\\_web-20220201.pdf](https://www.mzp.cz/C1257458002F0DC7/cz/cirkularni_cesko/$FILE/OODP-Cirkularni_Cesko_2040_web-20220201.pdf)
- [42] TKP 18. *Technické kvalitatívni podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 18 BETONOVÉ KONSTRUKCE A MOSTY*. Praha: Ministerstvo dopravy odbor dopravních komunikací, 2016.
- [43] ČSN EN 206 + A2. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [44] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2021.
- [45] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo - Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [46] Melichar J, Žižková N, Brožovský J, Mészárosová L, Hermann R. Study of the Interaction of Cement-Based Materials for 3D Printing with Fly Ash and Superabsorbent Polymers. *Buildings*. 2022; 12(11):2008. <https://doi.org/10.3390/buildings12112008>
- [47] ČSN EN 12350-7. *Zkoušení čerstvého betonu - Část 7: Obsah vzduchu - Tlakové metody*. Praha: Evropský výbor pro normalizaci, 2019.
- [48] ČSN EN 196-3. *Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

- [49] ČSN EN 1015-11. *Zkušební metody pro zdivo - Část 11: Stanovení pevnosti zatvrdlých malt v tahu za ohybu a v tlaku*. Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [50] *CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R: Portlandský směsný cement* [online]. In: . 04/2021, s. 2 [cit. 2023-05-18]. doi:<https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/volne-lozeny-cement/cemiibmsll325r>
- [51] *Provodínske písky a.s.: Slévárenské písky PR 30 - PR 33* [online]. In: . 02/2012, s. 1 [cit. 2023-05-18]. doi:[https://www.element-shop.cz/user/related\\_files/tl\\_pr\\_32.pdf](https://www.element-shop.cz/user/related_files/tl_pr_32.pdf)
- [52] *Provodínske písky: Produkty* [online]. Provodín [cit. 2023-05-18]. <https://www.pisky.cz/>
- [53] *Mikromleté písky: Katalóg produktu* [online]. Újezd pod troskami: Sklopísek Střeleč, 2022 [cit. 2023-05-22]. <https://glassand.eu/getFile/case:show/id:437676??>
- [54] *VINNAPAS® 4240 N: Dispersible polymer powder* [online]. Allentown, PA United states, 2023 [cit. 2023-05-18]. <https://www.wacker.com/h/en-us/dispersible-polymer-powders/vinnapas-4240-n/p/000008939>

## Zoznam obrázkov

Obrázok 1 Porovnanie zloženia obyčajného a 3D tlačeneho betónu [1].....	12
Obrázok 2 Zloženie tried cementov [6].....	14
Obrázok 3 Mikroskopicky 1000 x zväčšené zrná popolčeku [1].....	15
Obrázok 4 Mikroskopicky zväčšené zrná trosky [1].....	16
Obrázok 5 Mikroskopicky zväčšené zrná mikrosiliky [1].....	17
Obrázok 6 Reaktivita kalcinovaných ílov vplyvom teploty [15].....	20
Obrázok 7 Vývoj medze klzu v priebehu tlače [24].....	25
Obrázok 8 Distribúcia pórov a makro pórov v 3D tlačennom betóne [31].....	28
Obrázok 9 Vplyv času na spoj po sebe nasledujúcich vrstiev [32].....	29
Obrázok 10 Portálová tlačiareň [35].....	30
Obrázok 11 Robotická tlačiareň.....	31
Obrázok 12 Rozloženie vlákien vo vrstvách [36].....	34
Obrázok 13 Možnosti vystuženia, vľavo tyčová výstuž, vpravo výstuž sklenenými vláknami [36].....	35
Obrázok 14 Celkový proces tlače [30].....	36
Obrázok 15 Fázy cirkulárnej ekonomiky [40].....	38
Obrázok 16 Schéma skúšania.....	40
Obrázok 17 Spôsob merania priemeru vzorky na striasacom stolíku [46].....	41
Obrázok 18 Schéma ultrazvukového meradla [46].....	42
Obrázok 19 Zariadenie pre meranie doby priechodu ultrazvukového impulzu v čerstvej malte [46].....	42
Obrázok 20 Naplnené ultrazvukové meradlo [46].....	43
Obrázok 21 Schéma prístroja na meranie obsahu vzduchu v čerstvej zmesi [47].....	44
Obrázok 22 Schéma Vicatovho prístroja [48].....	46
Obrázok 23 Schéma skúšobného zariadenia pre skúšku ťahu za ohybu.....	48

## Zoznam grafov

Graf 1 Rýchlosť ultrazvukového impulzu v čase pre použité receptúry.....	52
Graf 2 Obsah vzduchu v čerstvej zmesi použitých receptúr .....	53
Graf 3 Počiatky a konce tuhnutia použitých receptúr .....	53
Graf 4 Porovnanie objemových hmotností použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia.	54
Graf 5 Porovnanie pevností v ťahu za ohybu použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia .....	55
Graf 6 Porovnanie pevností v tlaku použitých receptúr po 1, 7 a 28 dňoch zrenia.....	55

## Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 Receptúry .....	49
Tabuľka 2 Chemické vlastnosti podľa EN 196-2 [48].....	50
Tabuľka 3 Fyzikálne vlastnosti cementu .....	50

## Zoznam skratiek

3DCP	3D concrete printing - 3D tlač betónu
3DP	3D printing - 3D tlač
TKP - 18	Technické kvalitatívne podmienky stavieb pozemných komunikácií - kapitola 18
ČSN	Česká technická norma
ČSN EN	Česká technická harmonizovaná norma
EN	Európska norma
PCE	Polykarboxylát
VMA	Viscosity modifying agents - prísady upravujúce viskozitu
AM	Additive manufacturing
TOP	Topologická optimalizácia
BESO	Obojsmerná štruktúrna optimalizácia
ATOM	Optimalizačný modul
TPMS	Trojnásobne periodicky optimalizovaný povrch
HDP	Hrubý domáci produkt
EÚ	Európska únia
BIM	Building Information Modelling