



SLOVENSKÁ TECHNICKÁ UNIVERZITA V BRATISLAVE
Stavebná fakulta

Ing. Diana Fil'arská

Autoreferát dizertačnej práce

Materiály pre 3D tlač domov

na získanie akademického titulu:	„philosophiae doctor“, v skratke „PhD.“
v doktorandskom študijnom programe:	3659 Technológia stavieb
v študijnom odbore:	35. Stavebníctvo
Forma štúdia:	denná
Miesto a dátum:	Bratislava, 31.5.2022



Dizertačná práca bola vypracovaná na:

Katedre materiálového inžinierstva a fyziky, Stavebnej fakulty STU v Bratislave

Predkladateľ:

Ing. Diana Filárska

Katedra materiálového inžinierstva a fyziky

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Školiteľ:

prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.

Katedra materiálového inžinierstva a fyziky

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

Oponenti:

prof. Dr. Ing. Martin Tchingnabé Palou

Ústav stavebníctva a architektúry SAV, v. v. i.

Dúbravská cesta 9, 845 03 Bratislava

prof. RNDr. Igor Medved', PhD.

Katedra materiálového inžinierstva a fyziky

Stavebná fakulta STU v Bratislave

Radlinského 11, 810 05 Bratislava

doc. Ing. Jiří Litoš, PhD.

Experimentální centrum

Fakulta stavební ČVUT v Praze

Thákurova 7, 166 29 Praha 6 - Dejvice

Autoreferát bol rozoslaný: 15.6.2022

Obhajoba dizertačnej práce sa bude konať dňa o h na Katedre
materiálového inžinierstva a fyziky Stavebnej fakulty STU v Bratislave, Radlinského 11, 810 05
Bratislava

.....
prof. Ing. Stanislav Unčík, PhD.
Dekan stavebnej fakulty

Obsah

1. Úvod.....	4
2. Ciele a metodika dizertačnej práce.....	4
2.1 Ciele práce.....	4
2.2 Metodika práce.....	4
3. Materiály používané v experimentálnej časti.....	5
3.1 Cement	5
3.2 Kamenivo a voda.....	5
3.3 Prísady	6
4. Experimentálna časť	8
4.1 Zmesi modifikované prísadami Walocel, Casucol a Silipon	8
4.1.1 Skúška spracovateľnosti – zmena konzistencie	10
4.1.2 Skúška pevnosti v tlaku (28 dňová)	12
4.2 Zmesi modifikované prísadami Berament a Beradur.....	13
4.2.1 Vplyv typu prísad na vlastnosti zmesi.....	13
4.2.2 Vplyv dávky prísady na vlastnosti zmesi.....	15
4.2.3 Vplyv vodného súčiniteľa na vlastnosti zmesi.....	16
4.3 Zmesi modifikované kombináciou prísad Walocel, Casucol a Berament.....	18
5. Teoretické a praktické prínosy dizertačnej práce	19
6. Závery.....	20
Zoznam vybranej literatúry	20
Zoznam publikovaných prác a ohlasov autora	21

1. Úvod

3D tlač je technológia aditívnej výroby, ktorá si postupne razí cestu do všetkých významných odvetví. Aj keď sa môže zdať, že ide o novodobú technológiu, vznikla už v osemdesiatych rokoch minulého storočia. Na dennej báze sa využíva v zdravotníctve, leteckom, automobilovom alebo strojárskom priemysle. Odvetvím, ktoré túto technológiu doposiaľ nevyužíva v bežnej praxi je stavebníctvo.

Pri výstavbe budov a stavebných konštrukcií sa ešte stále používajú konvenčné technológie, akými sú napríklad murovanie a betonáž s použitím debniacich konštrukcií. Práve stavebný priemysel produkuje až 35 % pevného odpadu vo svete [1]. Väčšina odpadu vytvoreného pri výstavbe je odvezená na skládky, kde následne dochádza ku znečisteniu podzemnej vody. Iným spôsobom likvidácie je spaľovanie, ktoré naopak spôsobuje znečistenie ovzdušia. Použitím 3D tlače by mohlo dôjsť ku optimalizácii spotreby materiálu, čo má priamy dopad aj na zníženie tvorby odpadu. Aj to je jedným z mnohých dôvodov, prečo je potrebné v stavebníctve začať využívať nové technológie. Vo svete sa už postupne realizujú mnohé projekty, ktoré využívajú 3D tlač. Firmy, ktoré sa venujú 3D tlači stavebných konštrukcií si však nechávajú zloženia zmesí ako svoje „know-how“. Výskumníci na celom svete sa snažia prísť na optimálne zloženie zmesi, ktorá by spĺňala všetky požiadavky pre úspešnú tlač. V práci sú zhrnuté doterajšie poznatky, ktoré priniesol výskum 3D tlače v stavebníctve, ako vplývajú jednotlivé zložky cementových mált na vlastnosti zmesi. V experimentálnej časti sa sledoval vplyv zmeny vodného súčiniteľa, rôznych prísad a ich dávok na vlastnosti čerstvej a zatvrdnutej zmesi.

2. Ciele a metodika dizertačnej práce

2.1 Ciele práce

Cieľom dizertačnej práce bolo overiť možnosti modifikovania cementových kompozitov vybranými prísadami a prímiesami tak, aby sa dosiahli parametre kompozitov vhodné pre technológiu 3D tlače budov. Práca je zameraná hlavne na reologické vlastnosti čerstvej maltovej zmesi. Konkrétne sa sledovala konzistencia zmesi a zmena konzistencie v čase, čo sú pre túto technológiu kľúčové vlastnosti. Cieľom dizertácie je tiež overiť vplyv modifikácií na pevnostné charakteristiky a ich možnosti zmeny v závislosti od požiadaviek na statiku daného objektu. Na dosiahnutie cieľov práce sa zmesi modifikovali prísadami a to prísadami na báze škrobov, celulózy, prevzdušňovacími prísadami a tiež plastifikačnými prísadami. Východzia konzistencia cementových mált sa modifikovala tiež zmenou vodného súčiniteľa mált.

2.2 Metodika práce

Na základe prehľadu danej témy v tejto dizertačnej práci bol realizovaný nasledovný postup výskumu:

1. Vytvorenie viacerých zmesí s rôznym vodným súčiniteľom s použitím rôznych prísad, prímies a ich pomerov.
2. Vykonanie skúšky spracovateľnosti na všetkých vzorkách s použitím Haegermannovho rozlevového stolíka. Sledovala sa zmena priemeru rozliatia v čase. Skúška sa vykonala po 5, 20, 40 a 60 min. od zamiešania mált
3. Vyradenie vzoriek, ktoré neboli vhodné na ďalší výskum na základe výsledku skúšky spracovateľnosti.
4. Výber najvhodnejších zámesí.
5. Vykonanie skúšky pevnosti v tlaku – použitie hydraulického lisu.

Pokiaľ sa niektoré zo zmesí ukázali na základe výsledkov skúšok počas výskumu ako nevhodné, boli navrhnuté ďalšie modifikácie zloženia respektíve sa zmenil vodný súčiniteľ zmesi. Na základe navrhnutého postupu sa na záver určila optimálna zmes zo skúšaných.

3. Materiály používané v experimentálnej časti

V rámci experimentálnej časti dizertačnej práce boli vytvárané receptúry na báze cementových kompozitov, ktoré spravidla pozostávali zo základných surovín – cement, piesok a voda. Na modifikáciu vlastností zmesí sa používali prísady. Všetky zložky a ich charakteristiky sú uvedené nižšie.

3.1 Cement

Na výrobu všetkých skúšaných maltových zmesí bol použitý cement CEM I 42,5 R vyrobený v závode Rohožník. Ide o portlandský cement s rýchlym nárastom pevností a vyznačuje sa výbornou kompatibilitou s použitými plastifikačnými prísadami, nízkymi objemovými zmenami, vysokým vývinom hydratačného tepla a vysokými konečnými pevnosťami v tlaku. Používa sa pri priemyselnej výrobe omietok a mált a stavebných konštrukciách, kde je potrebná vyššia počiatková pevnosť. Obsahuje 90 – 100% slinku a 0 – 5% doplnujúcich zložiek V tabuľke 3.1 sú uvedené jeho vlastnosti [82].

Tab. 3.1: Vlastnosti cementu CEM I 42,5 R [82]

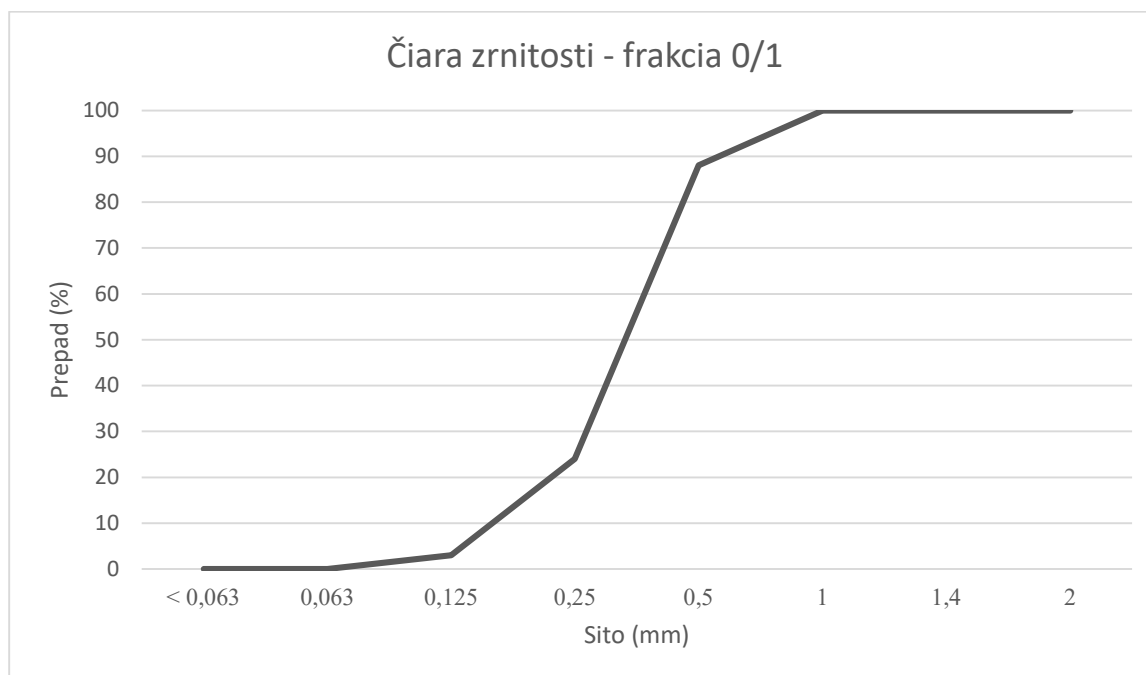
Fyzikálne a mechanické vlastnosti	Priemerná hodnota
Pevnosť v tlaku po 2 dňoch	28 MPa
Pevnosť v tlaku po 28 dňoch	56 MPa
Začiatok tuhnutia	165 min
Objemová stálosť	0,8 mm
Obsah SO ₃	2,9 % hm.
Obsah Cl-	0,06 % hm.

3.2 Kamenivo a voda

Vo všetkých zmesiach bol na účel **plniva** použitý kremenný piesok frakcie 0/1 z ťažobne Šaštín – Stráže. Prevládajúcou zložkou je kremeň SiO₂, ktorý tvorí 95 – 98% a ostatné zložky tvoria alkálie a železo. Primárne sa využíva na výstavbu budov, ciest, inžinierskych stavieb ako kamenivo do betónu a kamenivo do mált. V grafe 3.1 je zobrazená čiara zrnitosti konkrétne používaného kameniva a v tabuľke 3.2 sú zhrnuté jeho vlastnosti.

Tab. 3.2: Vlastnosti kameniva [84]

Vlastnosti	Hodnota
Obsah uhličitanov	< 2 %
Obsah organických látok STN EN 1744-1	bez obsahu
Nasiakavosť	2,5±0,5%
Objemová hmotnosť	2,43±0,4 Mg/m ³
Celkový obsah síry	≤ 1 %
Obsah chloridov	≤ 0,01 %



Graf 3.1: Čiara zrnitosti používaného kameniva

Ako **zámesová voda** sa používala pitná voda z verejného vodovodu Bratislava. Pred použitím bola odstáta 24 hodín. Na našom území je pitná voda vhodná na použitie do betónov a mált bez skúšania.

3.3 Prísady

Pri experimente boli použité prísady plastifikačné, prevzdušňovacie a slúžiace na spomalenie a urýchlenie tuhnutia a tvrdnutia mált. Nižšie sú uvedené v poradí, v akom boli vo výskume použité.

a) **Walocel M 20-20** – prášková prísada bielej farby, bez zápachu, na báze modifikovanej hydroxymetylovej celulózy (HEMC), používa sa na predĺženie doby spracovania, zvýšenie adhézie a hustoty. [85]

Tab. 3.3: Vlastnosti prísady Walocel M 20-20 [85]

Vlastnosti	Hodnota
pH	5 - 8
Obsah vlhkosti	$\leq 7 \%$
Objemová hmotnosť	300 – 500 g/l
Koncentrácia zložiek	
Metylhydroxyetylcelulóza	$\geq 54.0 - \leq 100.0 \%$
Modifikovaný karbohydrát	$> 20.0 - < 30.0 \%$
Akrylátový kopolymér	$< 10.0 \%$
Chlorid sodný	$\geq 0.0 - \leq 3.0 \%$
Štandardná dávka	0,2 – 0,7 % hm.

b) **Casucol 301** – prášková prísada bielej farby na báze škrobu, zlepšuje spracovateľnosť, oddiaľuje hydratáciu cementu, modifikuje reológiu zmesi. Najčastejšie sa pridáva do maltových zmesí na ručné aj strojové spracovanie, lepidiel a štukatérskych mált. [86]

c) **Silipon RN 6031 air** – prášková prevzdušňovacia prísada bielej farby, vytvára v zmesi mikroskopické vzduchové bubliny, znižuje hustotu, zlepšuje spracovateľnosť zmesi [87]

Tab. 3.4: Vlastnosti prísady Silipon RN 6031 air [87]

Vlastnosti	Hodnota
pH	9 – 10,5
Bod varu	> 100 °C
Objemová hmotnosť	6001

d) **Beradur E2** – bezchloridový, vysoko účinný urýchľovač tvrdnutia na báze vodného roztoku anorganických solí čírej až nažltkastej farby. Zvyšuje počiatočnú pevnosť bez toho, aby negatívne ovplyvnil 28 dňové pevnosti. Používa sa pri výrobe rôznych betónov (transportbetón, prefabrikovaný betón, predpätý betón) a mált (hlavne v zimnom období), kde je potrebné dosiahnuť vysoké začiatkové pevnosti. [88]

Tab. 3.5: Vlastnosti prísady Beradur E2 [88]

Vlastnosti	Hodnota
pH	6
Objemová hmotnosť	1400 g/l
Obsah chloridov	Max. 0,05 % hm.
Obsah alkálií	Max. 5,0 % hm.
Štandardná dávka	0,4 – 1,0 % hm.

e) **Berament HT 28** – superplastifikátor vo forme tekutého roztoku tmavohnedej farby na báze polykarboxylátu, výrazne predlžuje čas spracovateľnosti (60 – 90 minút) bez zásadného vplyvu na priebeh tuhnutia a tvrdnutia. Používa sa na výrobu bežných transportbetónov, ľahkozhutiteľných, vodotesných a pohľadových betónov. S jeho pridaním sa dosahuje vysoká tekutosť a pohyblivosť zmesi bez jej segregácie[89].

Tab. 3.6: Vlastnosti prísady Berament HT 28 [89]

Vlastnosti	Hodnota
pH	6
Objemová hmotnosť	1080 g/l
Obsah chloridov	Max. 0,05 % hm.
Obsah alkálií	Max. 5,0 % hm.
Štandardná dávka*	0,55 – 0,75 % hm.

* Uvedená dávka je orientačná. Optimálna dávka závisí od typu betónu, druhu konštrukcie a podmienok betonáže.

f) **Berament HT 171** - superplastifikátor vo forme tekutého roztoku tmavohnedej farby na báze polykarboxylátu. Predlžuje čas tuhnutia a tvrdnutia bez zásadného vplyvu na pevnosti. Používa sa na výrobu transportbetónov, pohľadových a vodotesných betónov a realizáciu priemyselných podláh. Zmes s obsahom tejto prísady dosahuje vysokú trvanlivosť, tekutosť a pohyblivosť. [90]

Tab. 3.7: Vlastnosti prísady Berament HT 171 [90]

Vlastnosti	Hodnota
pH	5,5
Objemová hmotnosť	1130 g/l
Obsah chloridov	Max. 0,10 % hm.
Obsah alkálií	Max. 5,0 % hm.
Štandardná dávka*	0,85 – 1,6 % hm.

* Uvedená dávka je orientačná. Optimálna dávka závisí od typu betónu, druhu konštrukcie a podmienok betonáže.

g) **Berament N** – superplastifikátor, sodná soľ kondenzačného produktu naftalénsulfonovej živice vo forme vodného roztoku tmavohnedej farby. Už pri nízkych dávkach výrazne zlepšuje konzistenciu čerstvých betónov. Konzistencia sa prvých 60 minút po zamiešaní mení v malom rozsahu. Prispieva k rýchlemu nárastu pevností a zvyšuje dlhodobé pevnosti. Zabezpečuje vodotesnosť a trvanlivosť betónovej konštrukcie. Používa sa na výrobu vibrolisovaných tvárnic, pre konštrukcie priemyselných podláh, prefabrikáty, rôzne typy betónových konštrukcií. [91]

Tab. 3.8: Vlastnosti prísady Berament N [91]

Vlastnosti	Hodnota
pH	6
Objemová hmotnosť	1195 g/l
Obsah chloridov	Max. 0,05 % hm.
Obsah alkálií	Max. 6,0 % hm.
Štandardná dávka*	0,6 – 1,4 % hm.

* Uvedená dávka je orientačná. Optimálna dávka závisí od typu betónu, druhu konštrukcie a podmienok betonáže.

4. Experimentálna časť

4.1 Zmesi modifikované prísadami Walocel, Casucol a Silipon

V prvej časti výskumu mali všetky maltové zmesi vodný súčiniteľ 0,7. Najskôr sa vyhotovila referenčná malta, ktorá slúžila na porovnanie zmeny vlastností zmesí prísadami. Následne sa do referenčnej malty pridávali prísady Walocel, Casucol a Silipon v rôznych množstvách a kombináciách. Konkrétne zloženia cementových mált sú uvedené nižšie.

a) Referenčná malta w/c 0,7

Tab. 4.1: Zloženie referenčnej malty w/c 0,7

Zložka	Hmotnosť
Cement CEM I 42,5 R	240 g
Piesok frakcia 0/1	720 g
Voda	168 ml
Vodný súčiniteľ	0,7
Označenie zmesi	RM w/c 0,7

b) Modifikovaná malta w/c 0,7 prísadami v rôznom množstve

Tab. 4.2: Zloženie modifikovanej malty 0,7 prísadami rôznej dávky

Názov prísady	Označenie zmesi	Dávka prísady (% hm.)	Dávka prísady (g)
Walocel M 20-20	W 0,15 (0,7)	0,15	1,44
	W 0,20 (0,7)	0,20	1,98
	W 0,25 (0,7)	0,25	2,40
Casucol 301	C 0,05 (0,7)	0,05	0,48
	C 0,10 (0,7)	0,10	0,96
	C 0,15 (0,7)	0,15	1,44
Silipon RN 6031 air	S 0,10 (0,7)	0,10	0,96
	S 0,20 (0,7)	0,20	1,92
	S 0,30 (0,7)	0,30	2,88

c) Modifikovaná malta w/c 0,7 s kombináciou prísad (W+C+S)

Tab. 4.3: Zloženie modifikovanej malty 0,7 s prísadami W+C+S

Názov prísady	Označenie zmesi	Dávka prísady (% hm.)	Dávka prísady (g)
Walocel M 20-20	WCS (0,7)	0,15	1,44
Casucol 301		0,05	0,48
Silipon RN 6031 air		0,1	0,96

d) **Modifikovaná malta w/c 0,7 s kombináciou prísad (W+C)**

Tab. 4.4: Zloženie modifikovanej malty 0,7 s prísadami W+C

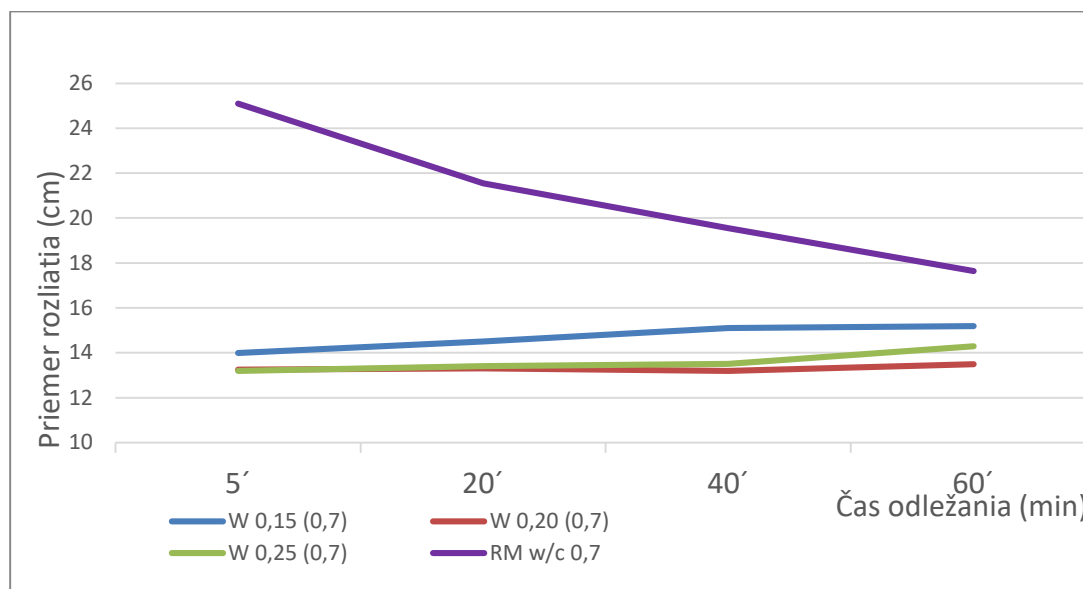
Názov prísady	Označenie zmesi	Dávka prísady (% hm.)	Dávka prísady (g)
Walocel M 20-20	WC (0,7)	0,15	1,44
Casucol 301		0,05	0,48

V druhej časti výskumu sa pre úpravu vlastností cementových kompozitov pridávali zvyšné prísady. Konkrétne išlo o Beradur, Berament HT28, Berament HT171 a Berament N. Okrem závislosti rozliatia a pevnosti zmesi od dávky prísady sa skúmala aj závislosť od vodného súčiniteľa, ktorý sa medzi meraniami menil na základe dosiahnutých výsledkov.

4.1.1 **Skúška spracovateľnosti – zmena konzistencie**

a) Zmesi s pridaním **Walocelu M 20-20** v rôznych dávkach

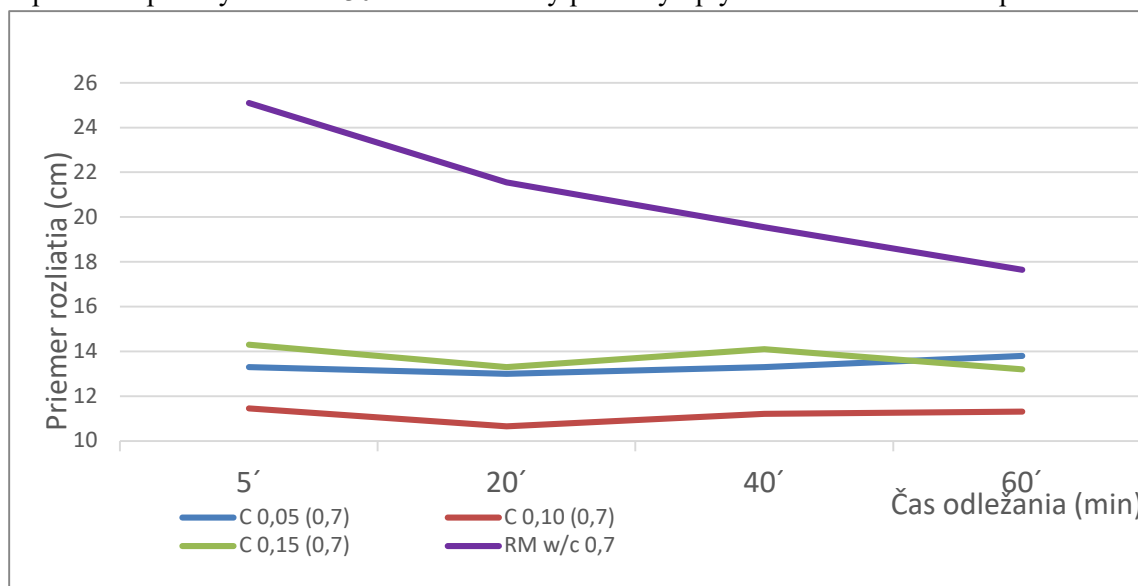
Na grafe 4.2 sú znázornené zmeny konzistencie mált, kde bola ako prísada použitá Walocel M 20-20 v rôznych dávkach. Z kriviek je viditeľné, že s pridaním prísady sa spracovateľnosť znížila a konzistencia zmesi bola počas sledovania stabilizovaná.



Graf 4.2: Priemer rozliatia v čase cementových mált s prísadou Walocel v dávkach 0,15 až 0,25 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

b) Zmesi s pridaním **Casucolu 301** v rôznych dávkach

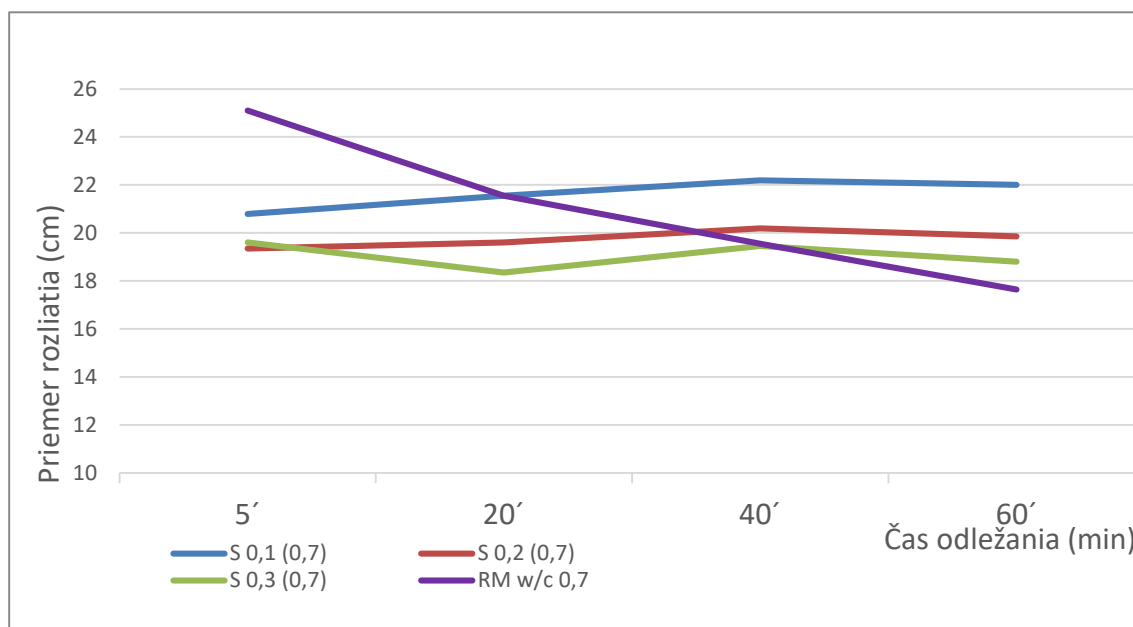
S pridaním prísady Casucol 301 bol sledovaný podobný vplyv na konzistenciu ako pri Walocel M 20-20.



Graf 4.3: Priemer rozliatia v čase cementových mált s prísadou Casucol v dávkach od 0,05 do 0,15 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

c) Zmesi s pridaním **Siliponu RN 6031 air** v rôznych dávkach

V prípade prísady Silipon bol pozorovaný opačný vplyv na konzistenciu v porovnaní s predošlými prísadami. Keďže ide o prevzdušňovaciu prísadu, tak priemer rozliatia sa pohybuje vo väčších hodnotách.



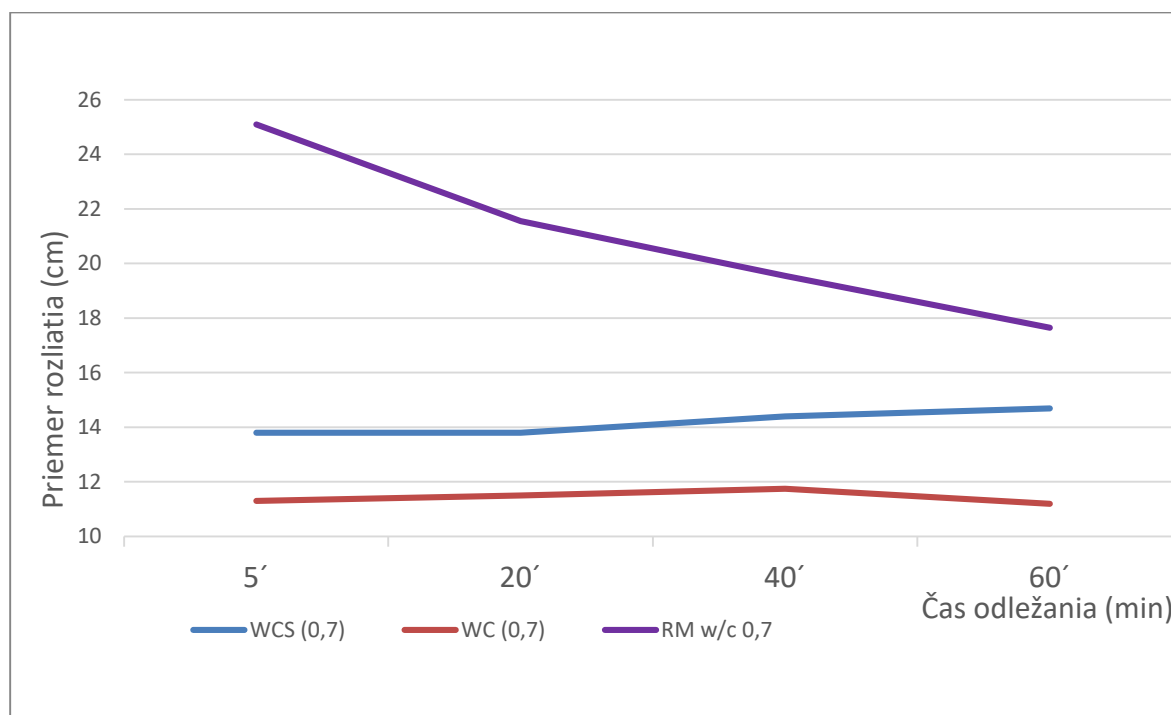
Graf 4.4: Priemer rozliatia v čase cementových mált s prísadou Silipon v dávkach od 0,1 do 0,3 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

d) Zmesi s kombináciou prísad W+C+S a W+C

Na základe dosiahnutých výsledkov pri použití jedného typu prísady sa navrhli v ďalšom kroku kombinácie prísad. Všetky prísady sa použili v najmenšej dávke vid'. tabuľka 4.9. Po vykonaní skúšky rozliatím sa stanovilo, že zmes má príliš riedku konzistenciu a preto sme sa rozhodli ďalej pokračovať bez prevzdušňovacej prísady Silipon RN 6031 air. Navrhla sa zmes s názvom WC (0,7) so zložením uvedeným taktiež v tabuľke 4.9. Po vynechaní prevzdušňovacej prísady sa priemer rozliatia znížil a zlepšila sa aj jej stálosť z hľadiska konzistencie.

Tab.4.9: Dávky a kombinácie prísad použitých v cementových maltách WCS (0,7) a WC (0,7)

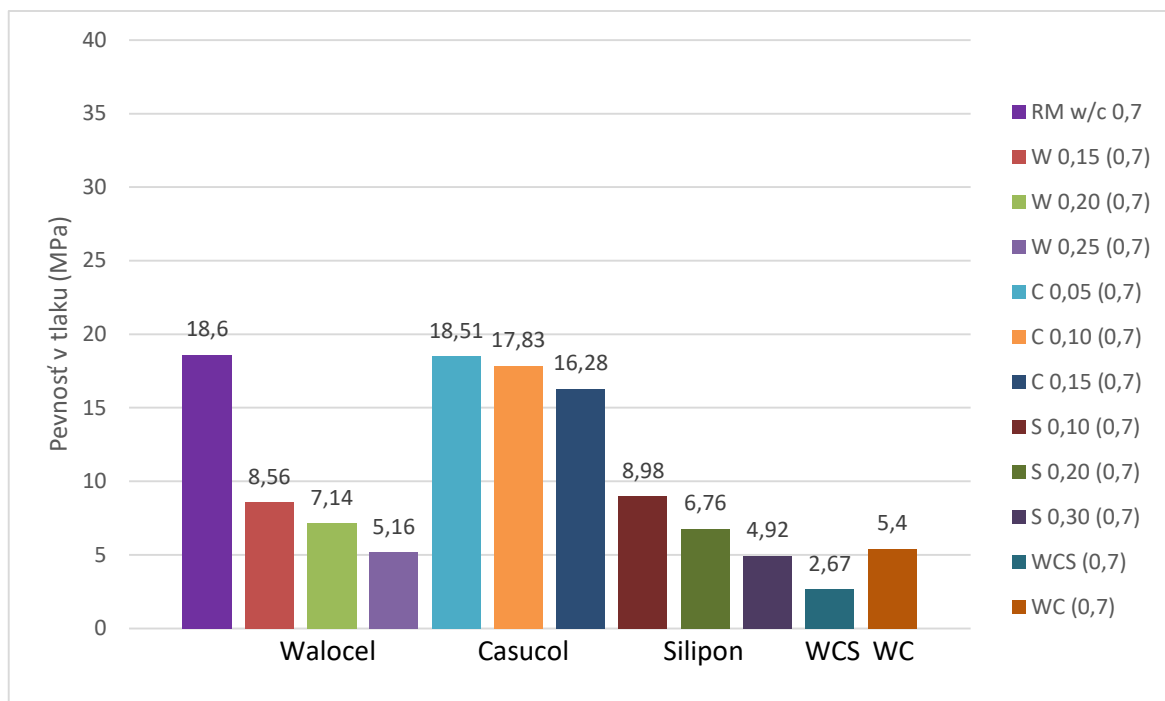
Označenie zmesi	Názov prímеси	Dávka (% hm.)
WCS (0,7)	Walocel M 20-20	0,15
	Casucol 301	0,05
	Silipon RN 6031 air	0,10
WC (0,7)	Walocel M 20-20	0,15
	Casucol 301	0,05



Graf 4.5: Priemer rozliatia v čase cementových malt s kombináciou prísad Walocel, Casucol, Silipon a Walocel, Casucol v najnižších dávkach a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ malt 0,7

4.1.2 Skúška pevnosti v tlaku (28 dňová)

V grafe 4.6 sú zobrazené 28 dňové pevnosti v tlaku všetkých doteraz skúšaných cementových malt. Najnižšie hodnoty pevnosti v tlaku dosiahli zmesi, ktoré obsahovali prevzdušňovacu prísadu Silipon a prísadu Walocel. Naopak najvyššie pevnosti boli dosahované s použitím prísady Casucol. Pri kombinácii prísad Walocel, Casucol a Silipon bola pevnosť v tlaku iba 2,67 MPa. Po odstránení Siliponu zo zmesi sa táto hodnota navýšila na 5,4 MPa.



Graf 4.6: Pevnosti v tlaku (28 dní) cementových mált s obsahom prísad Walocel, Casucol a Silipon a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

4.2 Zmesi modifikované prísadami Berament a Beradur

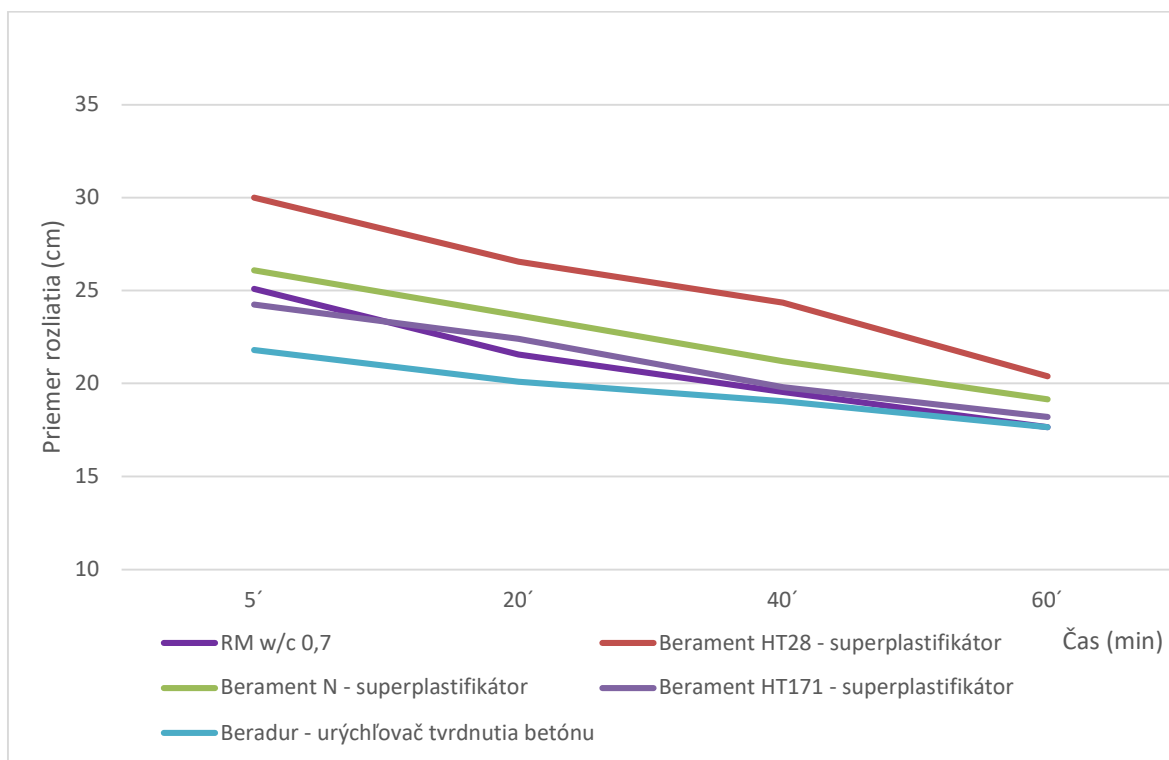
4.2.1 Vplyv typu prísad na vlastnosti zmesi

V úvode druhej časti výskumu sa uvažovalo naďalej s vodným súčiniteľom 0,7 a použili sa rovnaké základné zložky na výrobu cementových mált, ako v prvej časti.

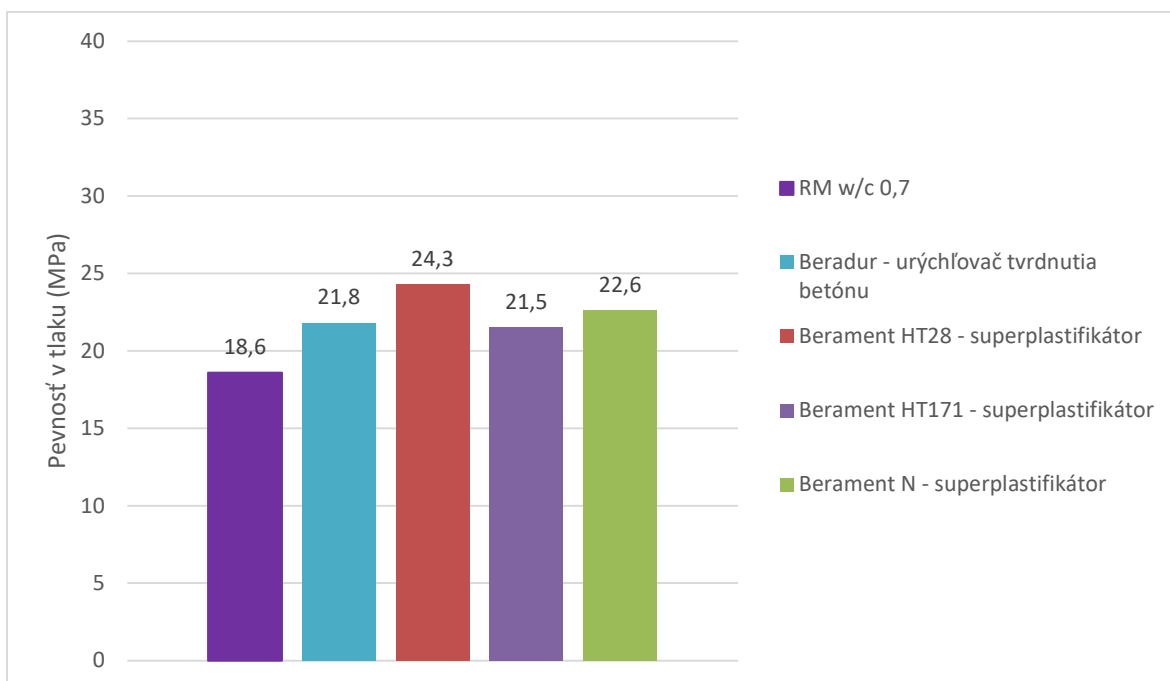
V rámci experimentu sa najskôr vyskúšal vplyv jednotlivých prísad na konzistenciu malty resp. priemer rozliatia v čase a 28 dňovú pevnosť v tlaku. Pre tento účel sa uvažovalo s rovnakou dávkou všetkých prísad a to konkrétne 0,5% hm. Po zamiešaní zmesi sa ako prvé vykonala skúška rozliatím v rôznych časoch odležania a následne sa naplnili formy, pre vytvorenie vzoriek. Na týchto vzorkách sa vykonala po 28 dňoch skúška pevnosti v tlaku na skúšobnom lise pre skúšanie pevnosti v tlaku. Lis vyhovuje požiadavkám stanoveným normou STN EN 12390-4. Rovnaký postup bol zvolený pri všetkých zmesiach.

Výsledky skúšky rozliatím a skúšky pevnosti v tlaku sú uvedené v grafoch nižšie.

V grafe 4.7 sú znázornené výsledky skúšky rozliatím pre zmesi s jednotným vodným súčiniteľom = 0,7. V grafe je fialovou farbou vyznačená referenčná malta, ktorá neobsahuje žiadne prísady. Všetky ostatné zmesi obsahujú vždy iba jednu z prísad – Beradur resp. jeden z typov prísady Berament. Prísady sú dávkované v rovnakej dávke = 0,5 % hm. V grafe 4.8 sú uvedené 28 dňové pevnosti v tlaku.



Graf 4.7: Priemer rozliatia v čase cementových mált s prísadami typu Berament a Beradur v dávke 0,5 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

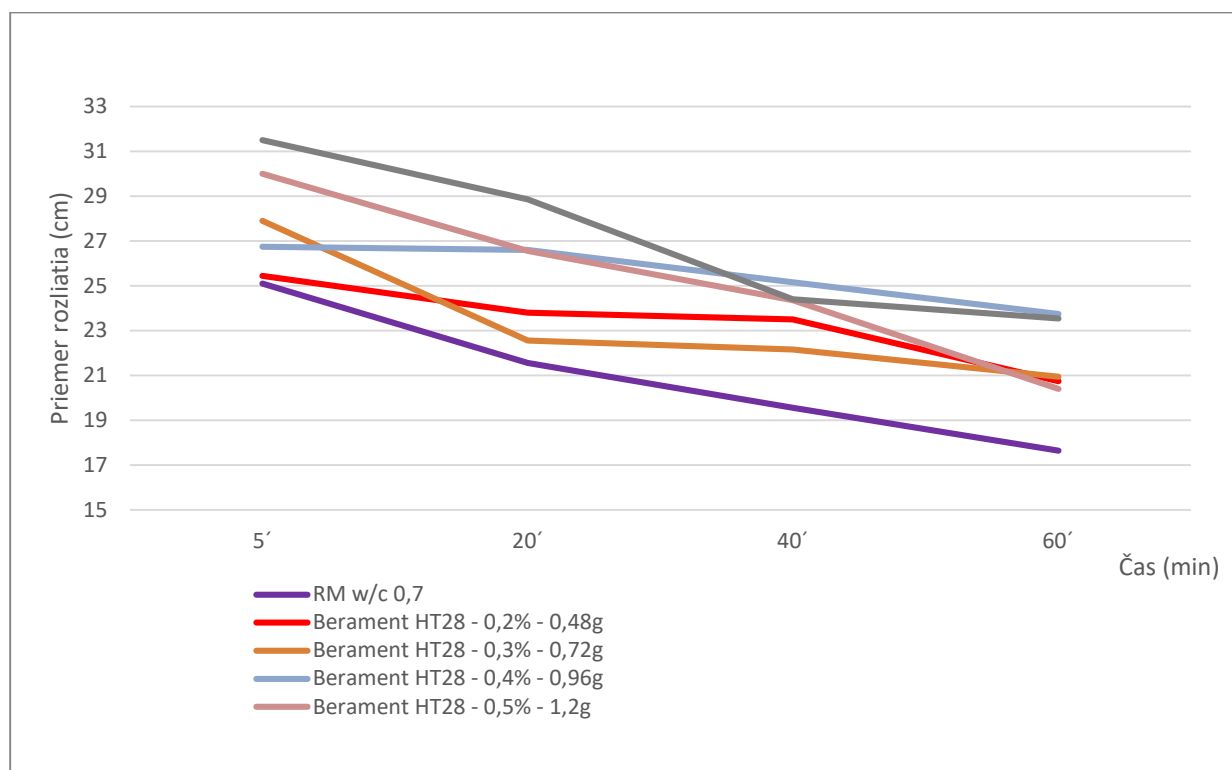


Graf 4.8: Pevnosť v tlaku (28 dní) cementových mált s prísadami typu Berament a Beradur v dávke 0,5 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

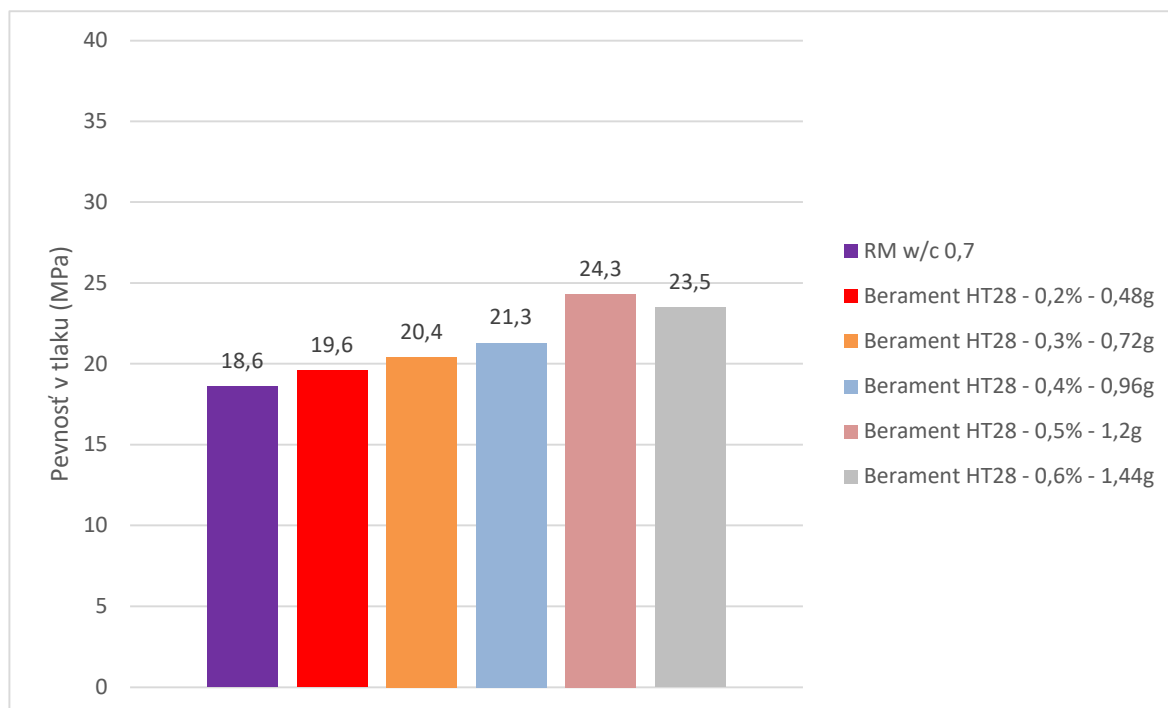
Zmes s obsahom superplastifikátora **Berament HT28** vykazuje počas skúmaného času najväčšiu zmenu v priemere rozliatia. Po zamiešaní bol priemer rozliatia najvyšší možný merateľný = 30 cm a po 60 minútach klesol na 20,4 cm. Táto zmes zároveň dosiahla aj najvyššie pevnosti zo všetkých skúšaných vzoriek. Z toho dôvodu sme sa ďalej rozhodli pokračovať vo výskume práve s týmto superplastifikátorom.

4.2.2 Vplyv dávky prísady na vlastnosti zmesi

V ďalšom meraní sa pokračovalo s vodným súčiniteľom 0,7. Ako prísada bol použitý Berament HT28 rôznej dávky. Zamiešalo sa celkom 5 zmesí s dávkami prísady 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 a 0,6 % hm. Sledoval sa vplyv dávky prísady na priemer rozliatia (graf 4.9) a pevnosť v tlaku (graf 4.10). Na grafe pozorujeme, že všetky zmesi mali väčší priemer rozliatia ako referenčná malta. Ako sme aj predpokladali, najvyšší priemer rozliatia dosiahla cementová malta, do ktorej bola pridaná najvyššia dávka plastifikátora. Zmes s obsahom prísady 0,5% dosiahla najnižší priemer rozliatia. Čo sa týka pevností v tlaku, s pridávaním dávky prísady sa hodnota pevnosti zvyšovala. Zmena nastala pri najvyššej dávke = 0,6%, kedy došlo ku poklesu pevnosti v porovnaní s dávkou 0,5%. **Na základe výsledkov skúšok rozliatia a pevnosti v tlaku sme vyhodnotili ako najoptimálnejšiu zo skúšaných mált zmes s obsahom 0,5% hm.**



Graf 4.9: Priemer rozliatia v čase cementových mált s prísadou Berament HT28 v dávkach od 0,2 do 0,6 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

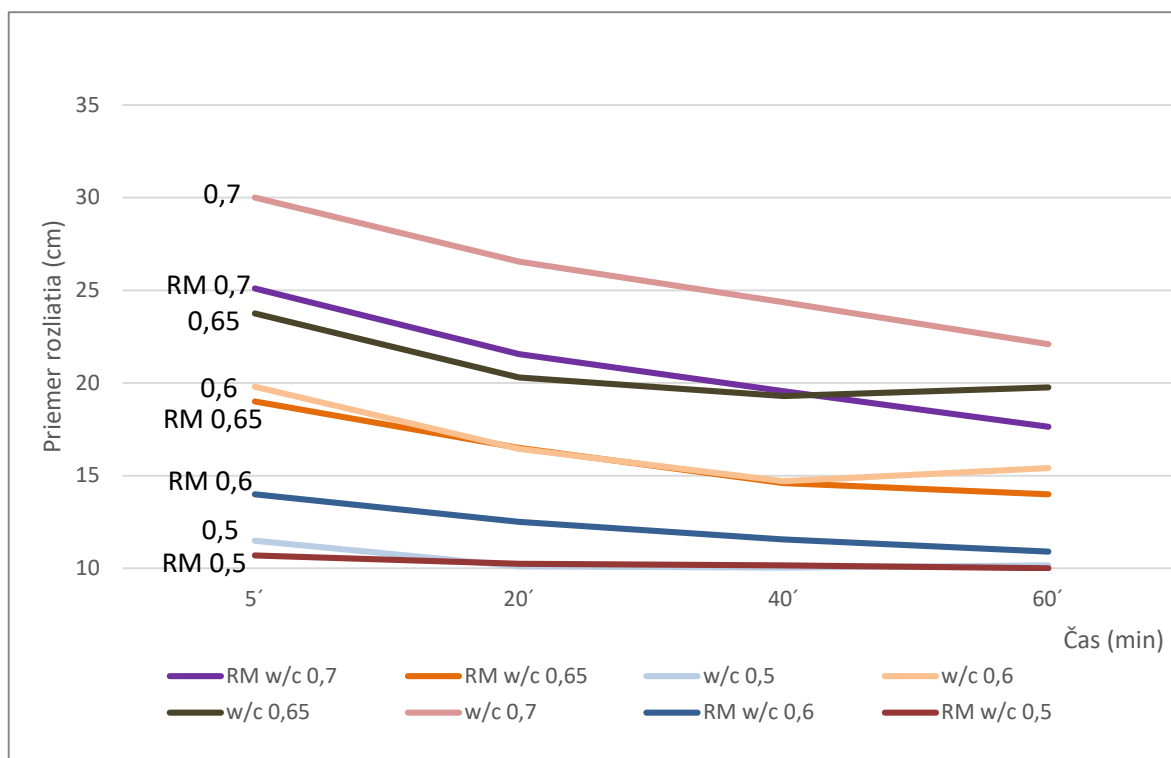


Graf 4.10: Pevnosť v tlaku (28 dní) cementových mált s prísadou Berament HT28 v dávkach od 0,2 do 0,6 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,7

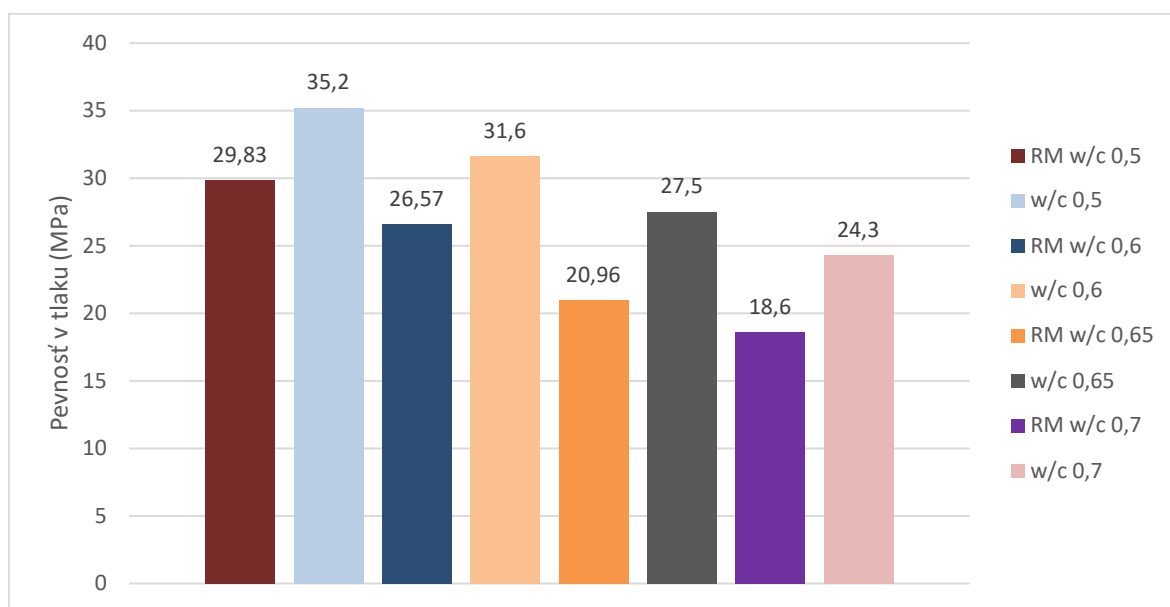
4.2.3 Vplyv vodného súčiniteľa na vlastnosti zmesi

Ďalej sa skúmal na tejto zmesi vplyv zmeny vodného súčiniteľa na priemer rozliatia a pevnosť v tlaku. Dávka prímеси ostala nezmenená = 0,5% a vodný súčiniteľ sa menil v rozmedzí od 0,5 do 0,7. Pre porovnanie sme pripravili okrem prísadou modifikovaných mált aj referenčné malty každého vodného súčiniteľa.

Medzi referenčnými a modifikovanými maltami bol vo väčšine prípadov sledovaný približne rovnaký rozdiel. Jediná malta, ktorá mala veľmi podobnú referenčnú aj modifikovanú krivku bola s vodným súčiniteľom 0,5. Tieto zmesi boli už od zamiešania príliš tuhé a pre technológiu 3D tlače by boli úplne nepoužiteľné. Zmesi s vodným súčiniteľom od 0,6 vyššie majú prijateľnú tekutosť. V ďalšom bode výskumu sme však ku Beramentu HT28 pridali aj Walocel a Casucol, ktoré boli použité v prvej časti experimentu. Tieto prísady vo všeobecnosti znižovali tekutosť zmesi. Z toho dôvodu sme sa rozhodli ich pridať do zmesi s vodným súčiniteľom 0,7 a 0,65. Okrem toho Walocel a Casucol udržiaval priemer rozliatia pomerne v jednej línii počas celého času skúšania (60 minút).



Graf 4.11: Skúška rozliatia v čase cementových mált s prísadou Berament HT28 v dávkach 0,5 % a referenčných mált. Vodný súčiniteľ mált od 0,5 do 0,7



Graf 4.12: Pevnosť v tlaku (28 dní) cementových mált s prísadou Berament HT28 v dávkach 0,5 % a referenčných mált. Vodný súčiniteľ mált od 0,5 do 0,7

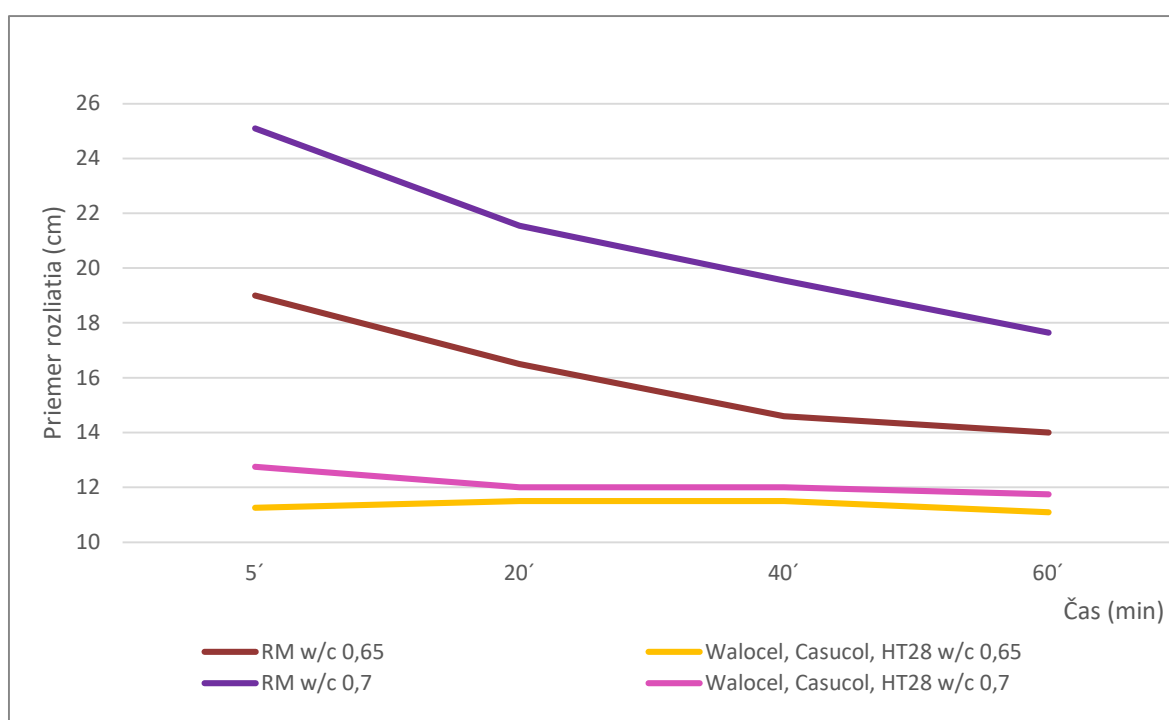
4.3 Zmesi modifikované kombináciou prísad Walocel, Casucol a Berament

V tretej časti sa do zmesí s vodnými súčiniteľmi 0,7 a 0,65 pridali prísady Berament HT28, Walocel M 20-20 a Casucol 301. Použité množstvá sú uvedené v tabuľke 4.10.

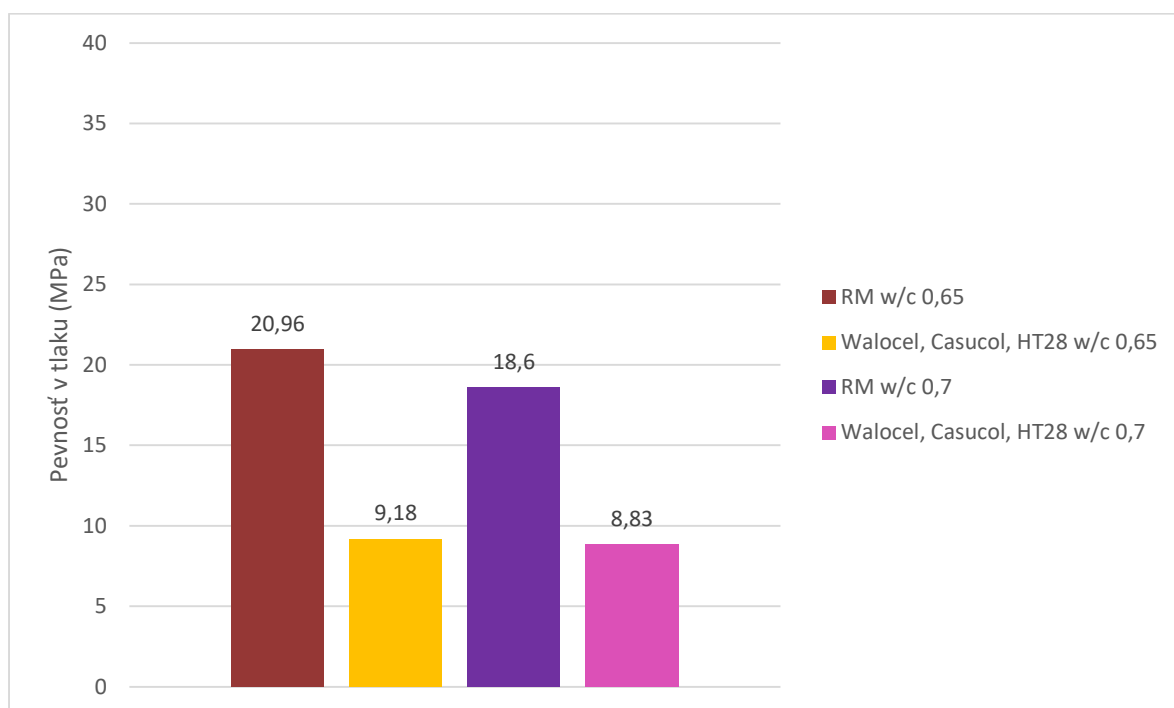
Tab. 4.10: Dávky a kombinácie prísad použitých v cementových maltách WCB. Vodný súčiniteľ 0,65 a 0,7

Označenie zmesi	Vodný súčiniteľ	Názov prísady	Dávka prísady (hm.) (%)
WCB (0,7)	0,7	Walocel	0,15
		Casucol	0,05
		Berament HT28	0,5
WCB (0,65)	0,65	Walocel	0,15
		Casucol	0,05
		Berament HT28	0,5

Cementová malta WCB (0,7) sa ukázala ako vyhovujúca na základe výsledkov a taktiež priameho pozorovania správania sa zmesi, kedy došlo iba ku miernemu poklesu pevnosti v tlaku ale zároveň sa dosiahla stabilizovaná konzistencia, ktorá je vhodná na spracovanie technológiou 3D tlače.



Graf 4.13: Priemer rozliatia v čase cementových mált s kombináciou prísad Walocel v dávke 0,15 %, Casucol v dávke 0,05 % a Berament HT28 v dávke 0,5 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,65 a 0,7



Graf 4.14: Pevnosť v tlaku (28 dní) cementových mált s kombináciou prísad Walocel v dávke 0,15 %, Casucol v dávke 0,05 % a Berament HT28 v dávke 0,5 % a referenčnej malty. Vodný súčiniteľ mált 0,65 a 0,7

5. Teoretické a praktické prínosy dizertačnej práce

Predmetom dizertačnej práce bol vývoj materiálu – cementového kompozitu – ktorý by bol vhodný pre použitie pre technológiu 3D tlače na výstavbu budov. Teoretickým a praktickým prínosom pre prax sú poznatky, ako vplyvajú na cementové kompozity prísady bežne používané na zlepšenie adhézie a predĺženie doby spracovania v cementových lepidlách, murovacích a štukatérskych máltach. Respektíve prísady používané v transportbetónoch, samozhutiteľných a pohľadových betónoch slúžiace na zlepšenie spracovateľnosti. Výskumom sa získali poznatky o tom, ako vplyva dávka jednotlivých prísad a zmena vodného súčiniteľa na spracovateľnosť resp. konzistenciu zmesi a pevnosť v tlaku. Je dôležité získať tieto informácie, nakoľko materiály pre 3D tlač sú nové materiály, na ktoré sú kladené iné nároky ako pri betóne liatom do debnenia pri technológii klasickej výstavby. V závere práce sa dosiahla receptúra zmesi, ktorá sa na základe skúšok a pozorovania vlastností ukázala ako optimálna z hľadiska konzistencie. V rámci výskumu sa dosiahli zaujímavé výsledky pri ovplyvňovaní spracovateľnosti a pevnosti v tlaku, ktoré sú dobrým podkladom pre ďalší výskum. V ďalšom výskume je vhodné sa zamerať na zvýšenie pevností v tlaku, ktoré sa momentálne dosiahli 8,83 MPa. Dokázalo sa, že pre dosiahnutie konzistencie zmesi vhodnej pre 3D tlač je potrebná kombinácia rôznych prísad na báze škrobu, celulózy a karboxylátov. Naopak nie je vhodné použitie prevzdušňovacích prísad do tejto kombinácie a prekročenie dávky plastifikačnej prísady nad 0,5% hm. pri vodnom súčiniteli 0,7. Okrem toho odporúčame v ďalšom výskume pracovať iba s prísadami Casucol a Berament HT28, nakoľko prísada Walocel výrazne znížila pevnosť. Casucol mal na pevnosť v tlaku oveľa menší vplyv, pričom ale zachoval svoj vplyv na stabilizáciu priemeru rozliatia resp. konzistencie. Prípadne je možné zapracovať do cementových mált aj vlákna a preveriť ich vplyv na pevnosti.

Táto dizertačná práca prispieva ku rozvoju aditívnej technológie 3D tlače, pretože sa získali poznatky o správaní sa cementových kompozitov pri použití rôznych prísad, čím sa rozšírilo poznanie v tejto oblasti a do budúcnosti môže slúžiť ako podklad pre navrhovanie zmesí pre túto metódu realizácie konštrukcií.

Poznatky v tejto práci môžu byť použité popri výučbe študentov nie len na vysokých školách. Mohli by byť zapracované do skrípt, nakoľko ide o moderný materiál a je potrebné, aby sa s ním študenti začali stretávať už počas štúdia.

6. Závery

Na základe dosiahnutých výsledkov dizertačnej práce možno vyvodiť tieto závery:

- Použité prísady výrazne ovplyvňovali reologické vlastnosti cementových mált.
- Prísada Walocel aj Casucol sa ukázali ako účinné stabilizátory konzistencie cementových mált, ich aplikácia viedla k zníženiu priemeru rozliatia mált a tiež k výraznému zníženiu pevnostných parametrov mált.
- Použitie štandardných plastifikačných prísad do betónu viedlo k očakávaným účinkom aj na vlastnosti skúmaných mált. Prísady umožnili redukciu vodného súčiniteľa a zvýšenie pevností, avšak zmena konzistencie v čase nebola týmito prísadami zásadne ovplyvnená.
- Kombináciou voduzadržiavacích a plastifikačných prísad sa dosiahol želaný účinok, teda stabilizovala sa konzistencia mált, nedochádzalo k zásadnej zmene konzistencie v priebehu sledovaného času, t.j. 60 min. a súčasne sa dosiahli vyššie pevnosti mált.

V ďalšom výskume by bolo potrebné ďalej optimalizovať dávky vhodných prísad a zamerať sa na ďalšie vlastnosti týchto kompozitov, ako je dopravovateľnosť, tlačiteľnosť, zhotoviteľnosť a pod. Potrebné bude tiež overovať možnosti regulovania rýchlosti tuhnutia a tvrdnutia kompozitu v závislosti od potreby udržania tempa tlače. Zaujímavou témou môže byť aj overenie vplyvu vlákien na reológiu a ďalšie vlastnosti kompozitov pre 3D tlač, či využívanie recyklovaných materiálov vo forme plnív.

Zoznam vybranej literatúry

- [1] NERELLA, V., MECHTCHERINE, V.: Chapter 16 - Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D), 3D Concrete Printing Technology, Butterworth-Heinemann, 2019, strany 333-347, ISBN 9780128154816, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>
- [2] MECHTCHERINE, V., NERELLA, V., KASTEN, K.: Testing pumpability of concrete using Sliding Pipe Rheometer, Construction and Building Materials, Volume 53, 2014, strany 312-323, ISSN 0950-0618, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.11.037>
- [3] FEYS, D., KHAYAT, K., KHATIB, R.: How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?, Cement and Concrete Composites, Volume 66, 2016, strany 38-46, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.002>
- [4] WALLEVIK, O., WALLEVIK, J.: Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, Cement and Concrete Research, Volume 41, Issue 12, 2011, strany 1279-1288, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.01.009>
- [5] KWON, S., JANG, K., KIM, J., SHAH, S.: State of the Art on Prediction of Concrete Pumping, International Journal of Concrete Structures and Materials, 10, strany 75-85, 2016, DOI: 10.1007/s40069-016-0150-y
- [6] LE, T., AUSTIN, S., LIM, S.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete, Materials and Structures 45, 2012, strany 1221-1232, DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-012->

9828-z

- [7] MALAEB, Z., HACHEM, H., TOURBAH, A., MAALOUF, T., ZARWI, N., HAMZEH, F.: 3D Concrete Printing: Machine and Mix Design, International Journal of Civil Engineering and Technology, volume 6, 2015, strany 14-22
- [8] HAMBACH, M., VOLKMER, D.: Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste, Cement and Concrete Composites, Volume 79, 2017, strany 62-70, ISSN 0958-9465, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.02.001>.
- [9] <https://www.3dxtex.com/carbon-fiber-filaments/carbonx-pc-cf/>
- [10] OH, C., HENG, P., CHAN, L.: A Study on the Impact of Hydroxypropyl Methylcellulose on the Viscosity of PEG Melt Suspensions Using Surface Plots and Principal Component Analysis, AAPS PharmSciTech 16, 2015, strany 466–477 DOI: <https://doi.org/10.1208/s12249-014-0204-x>
- [11] RUSHING, T., STYNOSKI, P., BARNA, L., AL-CHAAR, G., BURROUGHS, J., SHANNON, J., KREIGER, M., CASE, M.: Chapter 7 - Investigation of Concrete Mixtures for Additive Construction, 3D Concrete Printing Technology, Butterworth-Heinemann, 2019, strany 137-160, ISBN 9780128154816, DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00007-5>
- [12] ZINDROSKI, J., RAZZHIVINA, M., SHAYANI, H.: Fabrication strategies for precise application of reinforcement in 3D-printed concrete, 2018
- [13] BUSWELL, R., LEAL DE SILVA, W., JONES, S., DIRRENBARGER, J.: 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research, Cement and Concrete Research, Volume 112, 2018, strany 37-49, ISSN 0008-8846, <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- [14] PAUL, S., VAN ZIJL, G., TAN, M., GIBSON, I.: A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects, Rapid Prototyping Journal, 2018
- [15] O'NEIL, B.: Netherlands: Eindhoven University of Technology Embarks on Extended Project in Concrete 3D Printing. 2015. [Online]. Dostupné na: <https://3dprint.com/102534/tu-e-concrete-3d-printing/>
- [16] <https://www.3dprint.com/>
- [17] BOS, F., WOLFS, R., AHMED, Z., SALET, T.: Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. Eindhoven: Technical university, 2016. strany 209-225. ISSN 1745-2759
- [18] BOWLER, T.: The battle to curb our appetite for concrete. 2018. [Online]. Dostupné na: <https://www.bbc.com/news/business-45893549>
- [19] LE, T., AUSTIN, S., LIM, S.: Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Material Structures 45. strany 1221-1232, 2012, <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- [20] WERKHEISER, N., EDMUNSON, J., FISKE, M.: On the development of additive construction technologies for application to development of lunar/martian surface structure using in-situ materials. AIAA SPACE 2015 conference and exposition, 2015

Zoznam publikovaných prác a ohlasov autora

ADE Vedecké práce v ostatných zahraničných časopisoch

- ADE01 BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - STRUHÁROVÁ, Alena. Kondenzácia vlhkosti v rôznych obvodových konštrukciách drevostavby. In *Czech Journal of Civil Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 5, iss. 1 (2019), online, s. 16-21. ISSN 2336-7148.

ADE02 GREGOROVÁ, Valéria - BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - ŠTEFUNKOVÁ, Zuzana. Sledovanie vplyvu vybraných plastifikačných prísad na vlastnosti cementových mált. In *Czech Journal of Civil Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 4, iss. 2 (2018), online, s. 50-56. ISSN 2336-7148.

ADE03 ŠTEFUNKOVÁ, Zuzana - GREGOROVÁ, Valéria - BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - TOMÁŠKOVÁ, Kristína. Aplikácia sklených a polymérnych vlákien a ich vplyv na zmršťovanie cementových mált. In *Czech Journal of Civil Engineering [elektronický zdroj]*. Vol. 4, iss. 2 (2018), online, s. 133-139. ISSN 2336-7148.

ADN Vedecké práce v domácich časopisoch registrovaných v databázach Web of Science alebo SCOPUS

ADN01 FIEARSKÁ, Diana [Bladová, Diana] - UNČÍK, Stanislav - CABANOVÁ, Terézia. Specification of the properties and effects of additives and admixtures on a mixture suitable for 3D printing of buildings. In *Slovak Journal of Civil Engineering*. Vol. 28, No. 4 (2020), s. 38-44. ISSN 1210-3896. V databáze: WOS: 000607644300006 ; DOI: 10.2478/sjce-2020-0029.

AFD Publikované príspevky na domácich vedeckých konferenciách

AFD01 BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - STRUHÁROVÁ, Alena - KOSTELECKÁ, Michaela. Moisture and its condensation in external construction of wooden house. In *Construmat 2019 [elektronický zdroj] : proceedings. XXV International Conference and Meeting of Departments. 29–31 May 2019, Zuberec, Slovakia*. 1. vyd. Bristol : IOP Publishing, 2019, online, [6] s., art. no. 012003. ISSN 1757-8981. V databáze: SCOPUS: 2-s2.0-85068992101 ; DOI: 10.1088/1757-899X/549/1/012003.

Ohlasy:

1. [1] ABBASI, Zahra - BAGHELANI, Masoud - DANESHMAND, Mojgan. Zero Power Consumption Chipless Distant Microwave Moisture Sensor for Smart Home Applications. In *Proceedings of IEEE Sensors, 2019, 2019-October*, pp. ISSN 1930-0395., Registrované v: SCOPUS

AFD02 BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana]. Špecifikácia a analýza 3D tlače. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 29th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 16th 2019, Bratislava*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2019, CD-ROM, s. 73-78. ISBN 978-80-227-4972-5.

AFD03 BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana]. 3D tlač betónových konštrukcií. In *CTM 2019 - Construction Technology and Management [elektronický zdroj] : proceedings of the International Scientific Conference. December 12-13, 2019 Kočovce, Slovakia*. 1. vyd. Brno : Tribun EU, 2019, CD-ROM, s. 27-32. ISBN 978-80-263-1549-0.

- AFD04 FIEĽARSKÁ, Diana [Bladová, Diana]. Advantages and limitations of 3D printing in civil engineering. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 30th Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Applied Mechanics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 14th 2020, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2020, CD-ROM, s. 102-108. ISBN 978-80-227-5052-3.
- AFD05 FIEĽARSKÁ, Diana [Bladová, Diana]. Vplyv zložiek zmesi pre 3D tlač na jej vlastnosti. In *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering [elektronický zdroj] : 31st Annual PhD Student Conference on Applied Mathematics, Building Technology, Geodesy and Cartography, Landscaping, Theory and Environmental Technology of Buildings, Theory and Structures of Buildings, Theory and Structures of Civil Engineering Works, Water Resources Engineering. October 13th 2021, Bratislava, Slovakia*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2021, CD-ROM, s. 83-89. ISBN 978-80-227-5150-6.
- AFD06 UNČÍK, Stanislav - BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana]. 3D tlač - budúcnosť realizácie stavebných konštrukcií? In *Betonárske dni 2018 : zborník príspevkov. Bratislava, SR, 8. - 9. 11. 2018*. 1. vyd. Bratislava : Spektrum STU, 2018, S. 153-158. ISBN 978-80-227-4852-0.

BDF Odborné práce v ostatných domácich časopisoch

- BDF01 BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - UNČÍK, Stanislav - HELLOVÁ, Katarína Eva. 3D printing and its current state in civil engineering. In *Buildustry [elektronický zdroj]*. Roč. 4, č. 1 (2020), CD-ROM, s. 18-21. ISSN 2454-0382.
- BDF02 FIEĽARSKÁ, Diana [Bladová, Diana] - UNČÍK, Stanislav. 3D tlač ako technológia výstavby? In *Eurostav*. Roč. 27, č. 5 (2021), s. 16-18. ISSN 1335-1249.
- BDF03 HELLOVÁ, Katarína Eva - BLADOVÁ, Diana [Bladová, Diana] - BEDERKA, Marián. Comparison of the External Masonry Wall Parameters Insulated by the ETICS System with regard to the Thermal Technical Standard. In *Buildustry [elektronický zdroj]*. Roč. 4, č. 1 (2020), CD-ROM, s. 22-25. ISSN 2454-0382.