

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta stavební
Experimentální centrum



**Mechanicko-fyzikální vlastnosti cementového
kompozitu určeného pro 3D zpracování**

**Mechanical and physical properties of cement
composite for 3D processing**

Autor: Miloš Loš

Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Litoš, PhD.

Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Loš Jméno: Miloš Osobní číslo: 468764
Zadávací katedra: K210 - Experimentální centrum
Studijní program: R - Stavitelství
Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Mechanicko-fyzikální vlastnosti cementového kompozitu pro 3D zpracování
Název bakalářské práce anglicky: Mechanical and physical properties of cement composite for 3D processing

Pokyny pro vypracování:

Vypracování souboru mechanicko-fyzikálních zkoušek nově navržené směsi cementového kompozitu pro 3D robotické zpracování. Kromě pevnostních charakteristik se bude jednat o termofyzikální veličiny popisující chování materiálu. Bude provedeno měření součinitele tepelné vodivosti, měrné tepelné kapacity a součinitele teplotní vodivosti. Dále pak zkoušky objemových změn v raném stádiu, smršťování a následná analýza dat. Výsledkem tedy bude databáze vlastností řešeného cementového kompozitu

Seznam doporučené literatury:

Jméno vedoucího bakalářské práce: Doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2021 Termín odevzdání bakalářské práce: 16.5.2021
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

22.2.2021

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení:

Tímto prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Mechanicko-fyzikální vlastnosti cementového kompozitu určeného pro 3D zpracování“ vypracoval samostatně a na základě citované literatury.

V Praze, 2021

.....

Miloš Loš

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, výborný přístup a za předání zkušeností v problematice 3D zpracování cementových kompozitů a zkoušení jejich vlastností.

Dále také děkuji Ing. Lukáši Fialovi, Ph.D. rovněž za cenné rady, zejména v problematice zkoušení a vyhodnocování fyzikálních vlastností.

Výše zmíněným také děkuji za poskytnutí přístrojů a prostor pro provádění experimentů a seznámení s nimi.

Abstrakt

3D zpracování cementových kompozitů je progresivní, moderní, částečně automatizovaná a nepříliš probádaná technologie využívaná ve stavebnictví. Tyto zejména robotické technologie se využívají pro nosné konstrukce ale také pro nenosné prvky, které tvoří zajímavá designová díla. V návaznosti na ne příliš velkém využití těchto způsobů výstavby a výroby, přichází na řadu otázka, jaké vlastnosti od materiálu požadujeme, a to jak v čerstvém stavu, tak ve stavu zatvrdlém.

První část této práce se zabývá rešerší týkající se kompozitních materiálů obecně, principu synergického efektu, historií a současností používání kompozitů. Dále v této práci naleznete popis cementových kompozitů a jejich složek s důrazem na ovlivnění výsledných vlastností. Následující kapitoly popisují vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti těchto kompozitů, jak se tyto vlastnosti zjišťují a jaká je jejich důležitost pro jednotlivé technologie 3D zpracování cementových kompozitů, které jsou popsány hned následovně.

V experimentální části je popsán průběh a vyhodnocení vybraných zkoušek mechanických a fyzikálních vlastností dvou nově navržených cementových kompozitních směsí, včetně porovnání výsledků s již komerčně užívanou a dostupnou směsí. 3D technologie zpracování cementů je disciplína, kde od použitého materiálu požadujeme neobvyklé kombinace reologických, ale i jiných, např. pevnostních charakteristik. Hlavním cílem této práce je zjištění souboru vlastností týkajících se pevnostních charakteristik, termofyzikálních vlastností, a objemových změn čerstvé směsi ve fázi tuhnutí.

Klíčová slova: Cementový kompozit, 3D tisk betonu, robotické zpracování, mechanické vlastnosti, termofyzikální vlastnosti

Abstract

3D processing of cement composites is a progressive, modern, partially automated and not very researched technology used in civil engineering. These especially robotic technologies are used for load-bearing structures but also for non-load-bearing elements, which form interesting design works. Following the not very extensive use of these methods of construction and production, the question arises as to what properties we require from the material, both in the fresh state and in the hardened state.

The first part of this work deals with research on composite materials in general, the principle of synergy effect, the history and present use of composites. Furthermore, in this work you will find a description of cement composites and their components with emphasis on influencing the resulting properties. The following chapters describe selected mechanical and physical properties of these composites, how these properties are determined and what is their importance for individual technologies of 3D processing of cement composites, which are described as follows.

The experimental part describes the course and evaluation of selected tests of mechanical and physical properties of two newly designed cement composite mixtures, including a comparison of results with already commercially used and available mixture. 3D concrete printing is a discipline where we require from the used material unusual combinations of rheological as well as other eg strength characteristics. The main goal of this work is to determine a set of properties related to strength characteristics, thermophysical properties, and volume changes of fresh mixture in the solidification phase.

Key words: Cement composite, 3D concrete printing, robotic processing, mechanical properties, thermophysical properties

Obsah

Úvod do zadané problematiky	9
Motivace a cíle práce	10
Rozsah práce	10
Rešeršní část	11
1. Kompozitní materiály	11
1.1. Synergický efekt	12
1.2. Historie použití kompozitních materiálů	13
1.3. Kompozitní materiály ve stavitelství	14
1.4. Je beton kompozit?	15
2. Cementové kompozity	16
2.1. Složení cementových kompozitů	16
2.1.1. Cement	17
2.1.1.1. Výroba cementu	17
2.1.1.2. Hlavní složky cementu	18
2.1.1.3. Značení cementů pro obecné použití	18
2.1.1.4. Pevnostní třídy cementů	18
2.1.1.5. Hydratace cementu	19
2.1.2. Voda	20
2.1.2.1. Vodní součinitel	21
2.1.3. Kamenivo	22
2.1.4. Přísady	23
2.1.4.1. Plastifikační přísady	24
2.1.4.2. Superplastifikační přísady	25
2.1.4.3. Pro vzdušující přísady	26
2.1.4.4. Stabilizační přísady	26
2.1.4.5. Přísady zpomalující tuhnutí	27
2.1.4.6. Přísady urychlující tuhnutí	28
2.1.4.7. Těsnící přísady	28
2.1.4.8. Ostatní typy přísad	28
2.1.5. Příměsi	29
2.1.5.1. Popílek	29

2.1.5.2. Křemičitý úlet	30
3. Vybrané vlastnosti cementových kompozitů a jejich stanovování	31
3.1. Fyzikální vlastnosti	31
3.1.1. Objemová hmotnost, hustota matrice a pórovitost	31
3.1.1.1. Stanovení základních materiálových charakteristik	32
3.1.2. Zpracovatelnost, konzistence a objemové změny	35
3.1.3. Transport kapalné vody	38
3.1.3.1. Metoda vertikální nasákavosti (1D transport)	38
3.2. Mechanické vlastnosti	41
3.2.1. Pevnost v tlaku	41
3.2.2. Pevnost v tahu ohybem	42
4. Metody 3D zpracování cementových kompozitů	44
4.1. Robotické sochaření	45
4.2. 3D tisk betonu	46
4.2.1. Výhody a využití 3D tisku z betonu.....	49
4.2.2. Požadavky na použitý materiál.....	51
5. Experimentální část	52
5.1. Cíle experimentální části	52
5.2. Složení použitých směsí a použité značení	53
5.3. Vyhodnocení, průběh a výsledky zkoušek cementových kompozitů ...	55
5.3.1. Pevnosti	55
5.3.1.1. Výsledky mechanických zkoušek	57
5.3.2. Termofyzikální vlastnosti	60
5.3.2.1. Výsledky měření termofyzikálních vlastností	62
5.3.3. Objemové změny	66
5.3.3.1. Výsledky měření objemových změn.....	67
5.4. Diskuze nad výsledky.....	68
5.5. Závěr a směřování dalšího výzkumu	69
Seznam použité literatury	71
Seznam obrázků , tabulek a grafů	76

Úvod do zadané problematiky

V současné době je ve stavebnictví, zejména u nově vznikajících objektů ale i rekonstrukcí, kladen stále větší důraz na výjimečnost a originalitu designu. Jedinými požadavky z hlediska uživatele již není bezvýhradně únosnost a použitelnost objektu, ale velmi důležité a uživateli žádané je také architektonické hledisko a jedinečnost. Dnešním trendem je tedy snaha vytvořit atraktivní, ikonickou a architektonicky moderně řešenou stavbu. Další z charakteristik moderního navrhování objektů je také snaha zvýšit požární odolnost objektů, zvýšení odolnosti proti mimořádnému dynamickému zatížení a zvýšení odolnosti proti povětrnostním vlivům. Tato snaha vyhnout se unifikaci je ale mimo jiné doprovázena vyšší finanční zátěží. Princip prefabrikace je založen zejména na rychlosti výstavby a možnosti dodání hotového prefabrikátu přímo na stavenišť. Při prefabrikaci není ale jednoduché vytvořit originální tvar, kvůli pracnosti bednění, které je při složitějším tvaru finančně i časově nákladnější na výrobu.

Výjimečnosti prvku lze dosáhnout právě díky výše zmíněnému robotickému 3D zpracování, při kterém robotická ruka za pomoci základních technik a nástrojů vytvoří v dané směsi, vylité ve tvarově jednoduchém bednění, originální reliéf velmi rychle a efektivně. Díky tomu dojde k omezení potřeby, vytvořit pro každou část nebo prvek samostatnou formu, která bude použita pouze jednou, což by bylo u velkoplošných děl v konečném výsledku značně neefektivní a nákladné. Takto vytvořené prvky lze poté umístit na stavbu, např. jako obkladový materiál a díky přesnosti robotické ruky a správným vlastnostem cementového kompozitu mohou tyto prvky po aplikaci působit jako velkoplošné umělecké dílo, které zaujme nejen svým přesným, plastickým tvarem ale také např. využitím světla, resp. stínu pro vytváření pomyslných objemů.

Jednou z dalších technik trojrozměrného zpracování cementu je 3D tisk. Zatím co technika použití robotické ruky pro vytváření reliéfů do cementové směsi se používá spíše pro nenosné konstrukce, s 3D tiskem lze vytvořit i konstrukci nosnou. Výhody, týkající se originality tvaru a omezení použití bednění splňují obě metody 3D zpracování cementu. Přidanou hodnotu, oproti

modelování pomocí robotické ruky, je u 3D tisku fakt, že díky této metodě může dojít jednak ke snížení nákladů na proces výstavby (odpadá nutnost účasti mnoha různých profesí), ale také ke zvýšení bezpečnosti a čistoty na staveništi.

Motivace a cíle práce

Používání technologií 3D zpracování cementových kompozitů se ve světě objevilo zhruba na přelomu miléníí. I přes tento fakt, začíná používání těchto 3D způsobů výstavby a výroby pronikat i do České republiky a je záhodno prozkoumat možnosti použití těchto technologií v našich končinách, ale také modifikovat složení použitého materiálu nejen dle klimatických podmínek a postupů statických návrhů používaných u nás, ale zejména z hlediska možnosti použití a dostupnosti složek cementového kompozitu. Se zvyšující se poptávkou a použitím technologií 3D zpracování je zamýšleno vytvořit suchou prefabrikovanou směs, která bude dostupná potencionálním zájemcům, jež mohou být architekti nebo stavební firmy, ale také širší veřejnost, což značí i možnost ručního zpracování bez použití robotických technologií. V návaznosti na použité technologii vzniká nutnost znalosti materiálových charakteristik použitého materiálu. Základním vstupním parametrem při volbě směsi je umístění, resp. typ výrobku nebo konstrukce a její statické působení. V návaznosti na tento fakt, je cílem této bakalářské práce popsat vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti cementového kompozitu určeného pro 3D zpracování a stanovení těchto vlastností u nově navržených směsí.

Rozsah práce

Kromě rešeršní části zabývající se problematikou kompozitů, složením cementových kompozitů, popisem mechanicko-fyzikálních vlastností a způsobech jejich stanovování a také popisem vybraných technologií 3D zpracování betonu, se tato bakalářská práce zabývá experimentálním stanovením vybraných vlastností kompozitu. Kromě základních materiálových charakteristik se jedná zejména o termofyzikální veličiny (součinitel tepelné vodivosti, součinitel teplotní vodivosti, měrná tepelná kapacita).

Z mechanických vlastností se jedná o pevnosti v tlaku a v tahu ohybem. Další zkoumanou vlastností jsou objemové změny čerstvé cementové směsi.

Rešeršní část

1. Kompozitní materiály

Pojmem kompozitní materiály, zkráceně kompozity, se rozumí takové materiály, které jsou obecně tvořeny kombinací dvou nebo více látek, majících odlišné fyzikální i mechanické vlastnosti, chemickou podstatu a které se vzájemně nerozpouštějí ani neslučují. Na okolí působí jako jeden celek, který má výrazně lepší vlastnosti než jednotlivé složky samostatně. ^[1]

Kompozity jsou multifunkční, heterogenní materiálové systémy, které mají charakteristiky neobdržitelné žádným z jednotlivých materiálů – jsou to kohezivní struktury vytvořené fyzikální kombinací dvou nebo více kompatibilních materiálů, lišících se vlastnostmi a někdy i tvarem. (Javitz, A. E.: Design. 1965, s 64)

Jedna z fází kompozitu bývá obvykle spojitá a nazýváme jí matrice. V porovnání se zpevňující fází může vykazovat nižší pevnostní vlastnosti, ale může mít vyšší houževnatost nebo plasticitu. ^[2]

Nejčastěji používané matrice v kompozitech jsou:

- Polymerní (vláknité)
- Kovové
- Uhlíkové
- Skleněné a sklokeramické
- Silikátové ^[2]

Druhá z fází se nazývá výztuž (můžeme se setkat i s označením disperze). Je nespojitá a vykazuje výrazně lepší mechanické parametry, jako např. modul pružnosti a pevnost či trvanlivost. ^[2]

Dle typu prostorového uspořádání se nejvíce používají výztuže:

- Částicové (kamenivo, dřevní prach)
- Vláknové (dlouhá nebo krátká vlákna uhlíku, skla, oceli)
- Plošné (rohože splétané z vláken)
- Prostorové (klecové) ^[3]

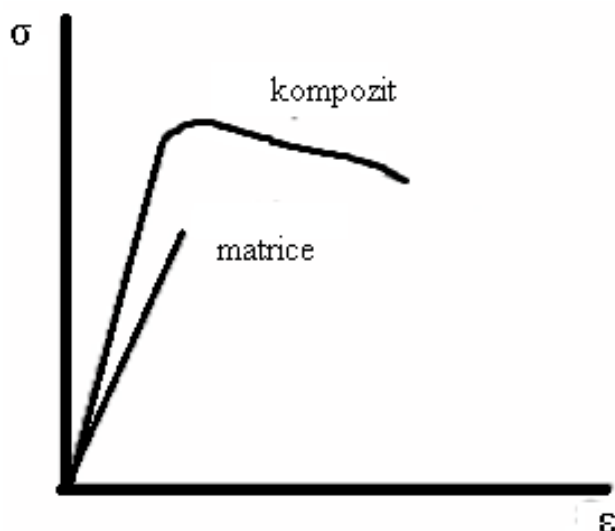
Kompozitní materiály se vyrábí mechanickým mísením nebo spojováním jednotlivých složek, čímž se liší od slitin, kde jednotlivé fáze vznikají fázovými přeměnami při tuhnutí. ^[2]

Pouhým smícháním dvou různých složek nedosáhneme automaticky požadovaného výsledku. Jednotlivé složky musí být ve finálním materiálu uloženy správným způsobem. Musíme si uvědomit, jak bude výsledný prvek namáhán, abychom mohli využít potenciál jednotlivých složek kompozitu. ^[3]

1.1. Synergický efekt

Synergický (spolupracující) efekt je hlavní jev, který lze pozorovat u kompozitních materiálů. V podstatě jde o to, že u výsledného materiálu je dosahováno takových vlastností, které nemají jednotlivé složky a nedosáhneme jich ani sumací vlastností jednotlivých složek. To, které vlastnosti od kompozitu požadujeme, se odvíjí od výběru jednotlivých složek a jejich vzájemným spolupůsobením. ^[4]

Typickým příkladem synergického efektu je kompozit složený z keramické matrice (Al_2O_3) a výztuže tvořené keramickými vlákny (SiC). I přesto, že obě složky samostatně jsou velmi křehké, výsledný materiál je charakteristický vyšší odolností proti křehkému porušení (houževnatostí). Tento efekt je zapříčiněn tím, že šířící se trhlina při zatěžování je brzděna díky vláknům a dochází zde k odklonu směru šíření této trhliny. Kvalita rozhraní mezi maticí a výztuží má zásadní vliv na vlastnosti výsledného kompozitu. ^[5]



Obr. 1: Porovnání tahových pracovních diagramů křehké keramické matrice a kompozitu z této matrice vyztuženého keramickými vlákny ^[5]

1.2. Historie použití kompozitních materiálů

Kompozity lze nalézt i v přírodě – dřevo je tvořeno celulóзовými vlákny (přenášející tahová napětí), které drží pohromadě substance nazývaná lignin. ^[1]

První použití kompozitů sahá až do roku 1500 př.n.l., kdy Egypťané a mezopotámští osadníci vytvořili směs bláta a slámy k vytvoření relativně odolného stavebního materiálu pro stavbu obydlí (pevnost v tlaku cca. 7 MPa). Kombinace bláta a slámy v cihelném bloku poskytuje výborné spolupůsobení a dala by se s nadsázkou přirovnat k dnešnímu železobetonu. Sláma se používala také např. při stavbě lodí, výrobě keramiky apod. ^[1]

V roce 1200 n.l. mongolští válečníci vynalezli luk, vyrobený kombinací „zvířecího lepidla“, kostí a dřeva. Pevná kost v kombinaci s pružným lepidlem rozhodně napomohla k válečnému úspěchu mongolských válečníků. ^[1]

Ve 20. století, zejména za druhé světové války bylo vyvinuto mnoho nových kompozitních materiálů využívaných zejména k vojenským účelům. ^[1]

Později se kompozity začaly uplatňovat v široké škále oborů, např.: výrobě automobilů, letadel a letecké techniky ale také ve zdravotnictví. Nyní se kompozity používají v problematice obnovitelných zdrojů energie. Např. výroba lopatek větrných elektráren – se zvětšujícími se poptávkou se zvětšují i rozměry,

což vytváří nutnost použití materiálu s nižší objemovou hmotností. Neméně se použití kompozitů promítlo i do stavebnictví. ^[1]

1.3. Kompozitní materiály ve stavitelství

Kompozity se ve stavitelství využívají již od pradávna. Příkladem může být výše zmíněná směs bláta a slámy nebo např. dřevo. Díky dlouholetým zkušenostem se dřevem jako stavebním materiálem, se lidé naučili vytvořit ze dřeva kompozit a tím eliminovat některé z jeho nepříznivých atribut (malá odolnost proti dřevokazným houbám a hmyzu, objemové změny vlivem vlhkosti). Lidé se naučili u dřeva naopak vyzdvihnout jeho pozitivní vlastnosti – nízkou objemovou hmotnost, snadnou opracovatelnost, vysokou pevnost, obnovitelnost. Dřevěné kompozitní materiály jsou v dnešní době velmi využívané k tvorbě obdivuhodných konstrukcí s poměrně velkým rozponem. ^[3]

V současné době, se dřevěné konstrukce více používají v zemích středomořských a v Americe, ale tento trend použití přírodního materiálu ve formě kompozitu začíná pronikat i do České republiky.

Matrici v dřevěných prvcích mohou tvořit formaldehydová lepidla, ligninová lepidla, cement nebo třeba polymery. Výztuží jsou potom dřevěné dýhy, prach, třísky, štěpky. Kompozitní výrobky ze dřeva mohou být ve formě nosníků nebo desek. Překližky, OSB desky, dřevotřísky, konstrukce z lepeného nebo vrstveného dřeva apod. Kombinace dřevo – plast se běžně využívá na nosné konstrukce, nábytek nebo okna. ^[3]

Zajímavý dřevěný kompozit se nazývá Parallam – dlouhé dřevěné třísky slepené dohromady lepidlem na bázi formaldehydu. Má zajímavou kresbu povrchu a dá se použít na nosné i nenosné konstrukce, které mohou být přiznané a tvořit zajímavý designový prvek.



Obr. 2: Pohled na strukturu dřevěného kompozitu Parallam^[4]

1.4. Je beton kompozit?

Jedna z definic kompozitu říká, že kompozit je „jakýkoliv materiál, který není čistá látka a obsahuje víc než jednu složku, může být teoreticky klasifikován jako kompozitní materiál“. Dle této definice by mezi kompozity patřily téměř všechny přírodní látky a většina syntetických materiálů.^[2]

Dle této definice bychom mezi kompozity mohli zařadit i prostý beton. Avšak pouhým smícháním pojiva (např. cementu), plniva ve formě kameniva a vody nevzniká materiál, který by splňoval nynější definici kompozitu, protože se vlastností výsledné směsi příliš nezlepší oproti jednotlivým složkám samostatně. Jinak řečeno, kamenivo se do betonu přidává pouze z ekonomického hlediska, o čemž vypovídá i název „plnivo“. Kamenivo je zastoupeno v betonu zhruba 75 %, což tvoří značnou část výsledného materiálu.

Kromě tlakové pevnosti nám kamenivo příliš výsledný materiál nepovýší. Proto si dovoluji tvrdit, že prostý beton kompozit není. Železobeton by se jako kompozit klasifikovat mohl. Matrici tvoří prostý beton (odolávající zejména tlakovým namáháním) a výztuž tvoří ocelové pruty, umístěné v prvku do míst s tahovým namáháním. Toto spolupůsobení dvou rozdílných materiálů splňuje definici kompozitu. Jako kompozit lze tedy klasifikovat beton vyztužený

ocelovými pruty ale také beton vyztužený jiným způsobem (drátkobeton, beton vyztužený umělými vlákny).

Jednou z dalších možností je přidat do prostého betonu nějakou přísadu nebo příměs, která ale musí příznivě ovlivnit finální vlastnosti směsi, aby mohl být materiál klasifikován jako kompozitní.

V této práci se zabývám zejména cementovými kompozity. Pro sjednocení názvosloví a zjednodušení orientace čtenáře v této práci si dovoluji považovat slovní spojení: beton, cementový kompozit, cementová pasta, cementová malta za „synonyma“, jinak řečeno použitím slova „beton“ není myšlen obyčejný prostý beton, který dle mého názoru moderní definici kompozitu nesplňuje.

2. Cementové kompozity

Celosvětově zvyšující se nároky na stavební konstrukce přiměly lidstvo ke zdokonalování prostého betonu vytvářením cementových kompozitů. Udržitelnost výstavby, trvanlivost konstrukcí, vyšší nároky na mechanické a fyzikální vlastnosti konstrukcí – tyto všechny vlastnosti se se zvyšující se poptávkou a celosvětově rychlým tempem inovací musí vyvíjet velmi efektivně. Je důležité vždy s rozmyslem uvážit, jakou vlastnost cementového kompozitu chceme vylepšit a dle toho zvolit vhodné složení a vhodný poměr jednotlivých složek.

2.1. Složení cementových kompozitů

Aby materiál splňoval definici kompozitu, nepostačí pouhé smíchání cementu, vody a kameniva. Je nutné tedy přidat takovou přísadu nebo příměs, která výsledné vlastnosti výrazně ovlivní a díky které budeme moci řídit chování této směsi v tekutém stavu a v neposlední řadě ovlivnit její vlastnosti v zatvrdlém stavu.

Tato bakalářská práce se zabývá cementovými kompozity pro 3D zpracování. V návaznosti na použité technologii zpracování lze říci, že můžeme vyloučit kamenivo, které má větší rozměr než 10 mm jako jednu ze složek.

2.1.1. Cement

„Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. Cement podle této normy, označovaný jako cement CEM, musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu betonu nebo malty zachovávající po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost.“^[6]

„Cementy CEM jsou složeny z různých látek a ve svém složení jsou statisticky homogenní. Vyplývá to z procesů výroby a manipulace s materiálem se zajištěnou jakostí.“^[6]

2.1.1.1. Výroba cementu

Vstupními surovinami pro výrobu cementu jsou vápence a jíly, které se těží v lomech pomocí výbušnin. Přes proces drcení surového kamene pomocí drtičů je snížena frakce na přibližně 4 centimetry. Poté nastává prehomogenizace, což je proporcionální smíšení různých typů vstupních surovin a dalších potřebných materiálů. Směs surovin se následně rozemele ve svislém nebo horizontálním mlýnu a poté tato surovinová moučka podléhá homogenizaci. Při teplotě 1400 °C se v rotační peci promění surovinová moučka na slínek. Slínek tvoří tmavá zrna o průměru 3-4 centimetry. Výsledný cement vzniká rozemletím slínku v horizontálním mlýnu a přidáním dalších složek, které ovlivní výsledné chování výrobku.^[7]

2.1.1.2. Hlavní složky cementu

- Portlandský slínek (K)
- Granulovaná vysokopecní struska (S)
- Přírodní pucolán (P)
- Přírodní kalcinovaný pucolán (Q)
- Křemičitý popílek (V)
- Vápenatý popílek (W)
- Kalcinovaná břidlice (T)
- Vápenec (L, LL)
- Křemičitý úlet (D)
- $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^[6]

2.1.1.3. Značení cementů pro obecné použití

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopecní cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement ^[6]

2.1.1.4. Pevnostní třídy cementu

V závislosti na kvalitě a na poměru mísení vstupních surovin při výrobě cementu, rozlišujeme několik pevnostních tříd cementu.

„Normalizovaná pevnost cementu je pevnost v tlaku stanovená podle EN 196-1 po 28 dnech, která musí odpovídat požadavkům v tabulce 1. Rozeznávají se tři třídy normalizované pevnosti: třída 32,5, třída 42,5 a třída 52,5.“ ^[6]

Číslo vyjadřuje pevnost v tlaku v MPa.

„Počáteční pevností se rozumí pevnost v tlaku stanovená podle EN 196-1 buď po 2 dnech nebo po 7 dnech, která musí vyhovět požadavkům v tabulce 1. Rozeznávají se tři třídy počáteční pevnosti pro každou třídu normalizované pevnosti: třída s normálními počátečními pevnostmi značená písmenem N, třída s vysokými počátečními pevnostmi značená písmenem R a třída s

nízkou počáteční pevností značená písmenem L. Třída L se používá pouze pro cementy CEM III. Jsou to jmenovité vysokopecní cementy s nízkou počáteční pevností.“ [6]

Třída cementu	Pevnost v tlaku (MPa)			
	počáteční pevnost		normalizovaná pevnost	
	2 dny	7 dní	28 dní	
32,5 N	–	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5 R	≥ 10,0	–		
42,5 N	≥ 10,0	–	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5 R	≥ 20,0	–		
52,5 N	≥ 20,0	–	≥ 52,5	–
52,5 R	≥ 30,0	–		

Obr.3: Tlakové pevnosti různých tříd cementu [8]

2.1.1.5. Hydratace cementu

Slínek a tím pádem i cement, jsou obecně tvořeny zejména křemičitany a hlinitany, které tvoří dohromady více než 90 % celkové hmoty slínku a v příslušné míře ovlivňují vlastnosti cementu, který se ze slínku vyrábí. Cement se vyrábí za vysokých teplot, což zajišťuje, že všechny zúčastněné prvky jsou zde v podobě oxidů. Na místo rozepisování dlouhých vzorců sloučenin těchto „mateřských“ oxidů, se dle tak zvané cementářské notace zavedla zkrácená forma zápisu těchto oxidů a jejich sloučenin. Čtyři základní slínekové minerály mají praktickou podobu zápisu: C3S, C2S, C3A a C4AF. Tyto složky poté vnáší do cementu svoje charakteristické vlastnosti.

[9]

Jedna z hlavních výhodných vlastností těchto minerálů je schopnost hydratovat. Hydratace nastává po smíchání cementu s vodou, kdy cement začíná tuhnout a tvrdnout. Reakcí cementu a vody se původně bezvodé minerální fáze cementu mění na nové sloučeniny obsahující chemicky vázanou vodu. [10]

Chemické reakce probíhající při hydrataci cementu jsou velmi komplexním procesem, ve kterém hrají svou roli chemické, fyzikální i

mechanické jevy. Je za potřebí při popisu těchto jevů uvažovat i tyto aspekty. ^[9]

Hydratace cementu je doprovázená tzv. hydratačním teplem. To, jak velké bude uvolňované hydratační teplo, závisí zejména na chemickém složení cementu, množství minerálů a na jemnosti mletí. Čím je cement jemněji mletý, tím má větší reakční povrch, který je smáčen s vodou a tím je intenzivnější průběh hydratace a díky tomu větší hydratační teplo. ^[11]

Proces hydratace je také doprovázen nepříznivými objemovými změnami, které mohou vést ke vzniku trhlin, které mají značný vliv na trvanlivost konstrukce nebo prvku. V experimentální části této bakalářské práce jsou tyto objemové změny zkoušeny a vyhodnocovány.

Obecně lze říci, že se proces hydratace cementu dělí na dvě základní fáze. První fáze začíná po smíchání cementu s vodou a nazývá se tuhnutí, kdy je směs ještě ve stavu tekutém a můžeme s ní manipulovat. Po určité době nastává proces tvrdnutí, který je doprovázen hlavně zvýšením pevnosti a schopnosti konstrukce nebo prvku odolávat namáháním.

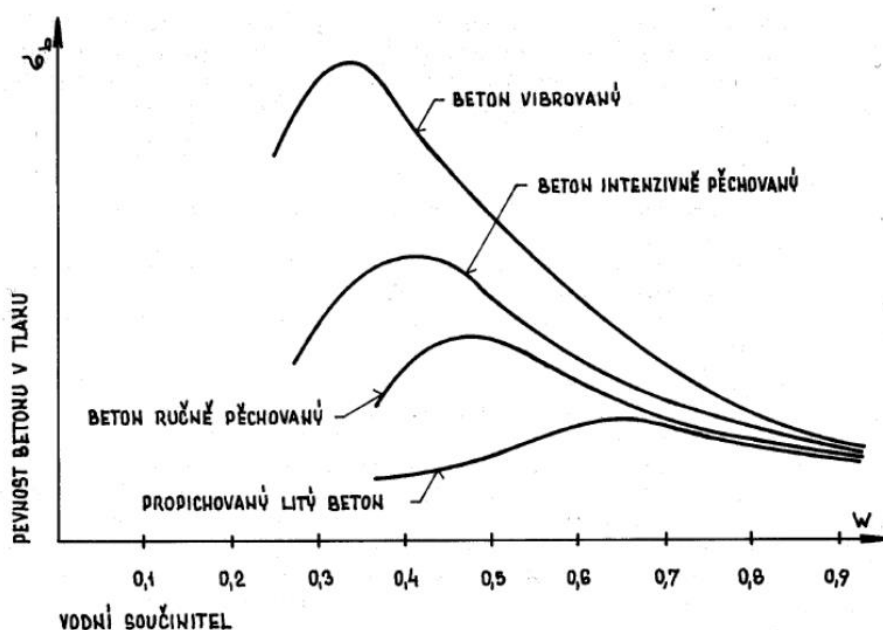
2.1.2. Voda

Voda je činitel umožňující hydrataci cementu a zajistit tak dostatečně tuhý a tvrdý materiál. Technologicky lze vodu přidávanou do cementových kompozitů (i do betonů) rozdělit na záměsovou (dávkovanou při míšení směsi) a na ošetřovací (voda dodávaná pro udržení směsi ve vlhkém stavu po několik prvních dní). Tato ošetřovací voda lze nahradit simulací vlhkého prostředí. Oba druhy vody musí disponovat kvalitními vlastnostmi. Vhodnost použité vody závisí na jejím zdroji. Pitná voda je přijatelná bez jakéhokoliv zkoušení, ovšem voda recyklovaná musí být pravidelně zkoušena na objemovou hmotnost ($\max. 1010 \text{ kg.m}^{-3}$), což zaručí podíl pevných látek v této vodě max. 1 %. Těmto kritériím podléhá také přírodní podzemní a povrchová voda, průmyslová odpadní voda. Splašková voda se použít nedá. Ideální pH záměsové a ošetřovací vody by se mělo pohybovat v rozmezí 6-8 ^[12]

2.1.2.1. Vodní součinitel

Iniciovat proces hydratace není jedinou úlohou vody v cementové směsi. Množství záměsové vody má zásadní vliv na konzistenci a zpracovatelnost směsi, což jsou rozhodující parametry při použití technologie 3D zpracování cementových kompozitů. Veličina popisující množství vody ve směsi se nazývá vodní součinitel a její hodnotu lze určit hmotnostním podílem záměsové vody ku množství cementu. Vodní součinitel u běžné betonové směsi se pohybuje kolem hodnoty 0,5. U vysokopevnostních betonů se vodní součinitel záměrně snižuje až k minimální hodnotě potřebné k hydrataci cementových zrn. Veškerá „nadbytečná“ voda totiž snižuje výslednou pevnost betonu. U vysokopevnostních betonů se vodní součinitel pohybuje v rozmezí 0,25-0,4.^[13]

V experimentální části byly použity směsi s vodním součinitelem 0,16 – 0,18, což je velmi nízká hodnota způsobující horší rozmíchávání směsi (nutné ruční domíchání). Takto nízkou hodnotu používáme kvůli použité technologii 3D zpracování, kde požadujeme od směsi, aby zachovávala svůj tvar a měla konzistenci tužší pasty.



Obr. 4: Vliv vodního součinitele a způsobu hutnění na velikost tlakové pevnosti

[14]

2.1.3. Kamenivo

Pod pojmem kamenivo si představíme zrnitý anorganický materiál, přírodního či umělého původu, určený pro účely stavitelství. ^[15]

Kamenivo v betonu, v maltách i cementových pastách tvoří hlavně funkci plniva, to znamená, že díky nižší ceně kameniva v porovnání s cementem, můžeme částečně snížit cenu výsledného výrobku, konstrukce apod. Kamenivo tvoří 60–75 % hmotnosti finální směsi.

U vysokohodnotných betonů, nebo u cementových kompozitů, u kterých chceme dosáhnout vyšších pevností, by mělo zvolené kamenivo být kompaktní, pevné a s minimem dislokací. Volíme horniny vysoké pevnosti jako je např. vápenec, žula, čedič nebo gabro. ^[13]

Při volbě kameniva uvažujeme také výslednou velikost uvažované konstrukce nebo díla a v neposlední řadě podmínky v místě, kde se konstrukce nebo dílo vyrábí.

Kamenivo do cementových kompozitů pro 3D zpracování volíme dle účelu výsledného výrobku nebo konstrukce a vlastnostem, které od něj požadujeme. Použitá technologie nám také omezuje výběr kameniva. Při použití metody 3D tisku musíme dbát na to, aby kamenivo neucpalo trysku, která směs vytlačuje, obvykle se volí zrno kameniva maximálně 8 mm.

Použijeme-li metodu robotické ruky, je velikost použitého kameniva individuální, odvíjející se od velikosti modelovaného prvku a od míry složitosti vtlačovaných reliéfů.

Na rozdíl od běžných betonů tvoří cementové kompozity také nejjemnější frakce, plnící funkci mikroplniva. Jedná se o velmi jemné částice ($\leq 0,125$ mm), působící jako filler mezi „hrubšími“ zrny kameniva. Nejčastěji se používá mikromletý vápenec, granodioritový a čedičový prach nebo křemenná moučka (velikost částic se pohybuje v rozsahu 0,1-10 μ m).

[13]

V této práci jsou posouzeny takové směsi, obsahující právě mikroplniva ve formě jemnozrnných minerálních příměsí, pozitivně ovlivňující vlastnosti výsledného kompozitu. Více o těchto látkách v kapitole „Příměsí“.

2.1.4. Přísady

Přísady jsou chemické látky, které po přidání do směsi modifikují vlastnosti čerstvého nebo ztvrdlého cementového kompozitu. Nejčastěji se používají přísady v kapalném skupenství, můžeme se ale setkat i s přísadami v podobě prášku.^[9]

Pro 3D tisk cementových kompozitů používáme takové přísady, které umožní jednak dobrou čerpatelnost směsi, jinak řečeno, vytvoří takovou konzistenci, která jde dobře dopravit ze zásobníku až ke trysce, která pokládá jednotlivé vrstvy. Na druhou stranu je za potřebí dosáhnout vyšší počáteční pevnosti nižších vrstev, které drží vrstvy horní.

U sochaření pomocí robotické ruky nebo tvarování směsi člověkem je za potřebí docílit zejména dobré zpracovatelnosti, tzn. vytvořit takovou směs, která bude v tekutém stavu 60 a více minut, aby sochař měl dostatek času k vytvoření díla. Je zavádějící použít termín „tekutý stav“. U směsí pro 3D zpracování se tekutá směs podobá spíše tužší pastě, avšak tuhnutí a tvrdnutí nastává později.

Při výběru přísad do cementového kompozitu dbáme také na to, jaké vlastnosti od kompozitu očekáváme jak v tekutém, tak v zatvrdlém stavu.

Dle ČSN EN 206-1 nesmí dávka přísady překročit maximální hodnoty udávané výrobcem a při dávce nad 50 g přísady na 1 kg cementu (5 hmot. %) musí být prokázáno, že tato přísada neovlivňuje negativně vlastnosti a trvanlivost betonu. Menší dávka přísady než 2 g na 1 kg cementu se musí tato přísada předem rozmíchat v části záměsové vody. Při užití více přísad najednou, musí být prokázána jejich vzájemná snášenlivost.

Dle ČSN EN 934-2 se přísady rozdělují na jednotlivé typy dle převažujícího účinku působení.

- Plastifikační (redukující vodu)
- Superplastifikační (dříve označovány jako ztekucující)
- Provzdušňující
- Stabilizační (zadržují vodu)
- Zpomalující tuhnutí
- Urychlující tuhnutí a tvrdnutí
- Těsnící (hydrofobizační)

2.1.4.1. Plastifikační přísady

Upravují množství záměsové vody a zároveň zachovávají stejnou zpracovatelnost. Tyto přísady se používají nejčastěji a nejdéle. Redukcí množství záměsové vody se zákonitě sníží i vodní součinitel, což se příznivě uplatňuje u vodostavebních betonů (nižší pórovitost ztvrdlého cementového tmelu), při výrobě transportbetonu, pro zlepšení čerpatelnosti směsi, pro usnadnění zpracování (hutnění) čerstvé směsi a v neposlední řadě pro lepší vzhled pohledového betonu. ^[9]

Obecně lze říct, že přidáním plastifikátoru musí být dosaženo snížení dávky vody o více než 5 % při stejné konzistenci stanovené normovou zkouškou sednutím nebo rozlítím a vzrůst pevnosti v tlaku nejméně na 110 % proti referenčnímu betonu složeném a vyrobeném dle ČSN EN 480-1. ^[9]

V neposlední řadě přispívají plastifikátory k neutralizaci nebo alespoň snížení povrchového napětí a tím také mění náboje pevných částic ve směsi, což vede k elektrostatickému odpuzování cementových zrn a zachování jejich disperze. Všechno potom přispívá ke snížení množství záměsové vody a tím pádem zlepšení zpracovatelnosti směsi, což u 3D zpracování cementových kompozitů požadujeme.

Na základě chemického složení lze plastifikátory rozdělit do čtyř skupin:

- Sulfáty melaminů (polykondenzáty sulfonových formaldehydů a melaminů)
- Sulfáty naftalenů (polykondenzáty sulfonových formaldehydů a melaminů naftalenů)
- Lignosulfáty
- Polykarboxyláty – řadíme mezi superplastifikátory ^[18]

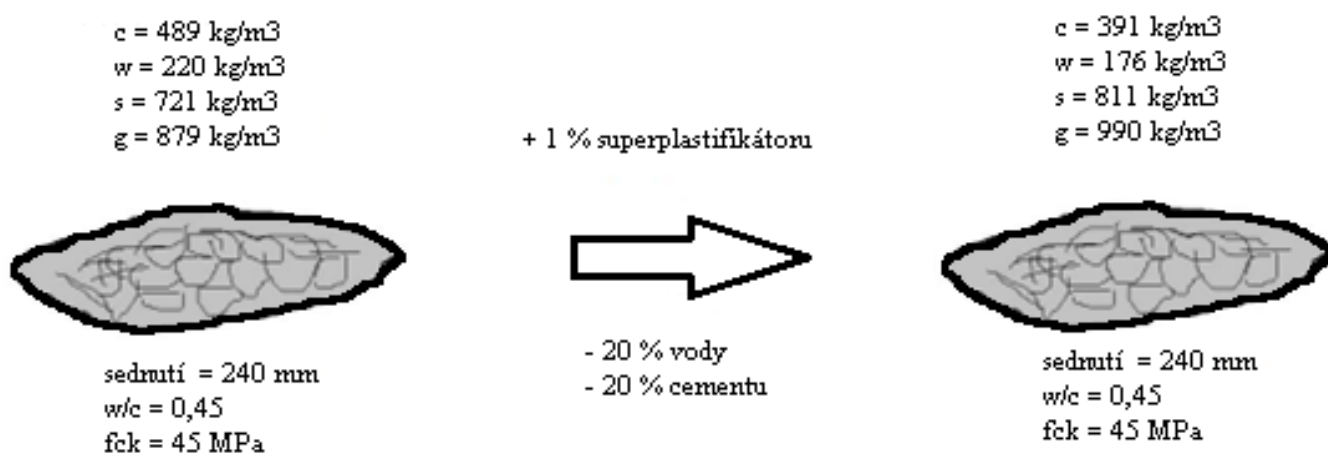
2.1.4.2. Superplastifikační přísady

Mají ještě větší vliv na snížení spotřeby vody než plastifikátory. V Severní Americe jsou známé jako high-range-water-reducers, tj. přísady silně snižující spotřebu vody. ^[19]

Evropská norma EN 934-2 definuje tyto přísady jako přísady, které zvýší zpracovatelnost směsi, se sednutím min. 120 mm, oproti kontrolnímu betonu se sednutím 30 mm. Dále má být sednutí superplastifikované záměsi po 30 minutách stejné (alespoň 30 mm) jako sednutí kontrolní směsi ihned po rozmíchání. ^[19]

Základní výhody použití superplastifikátorů jsou:

- Snížení vodního součinitele vedoucí ke zvýšení pevnosti
- Snížení obsahu cementu vedoucí ke snížení vlivu hydratačního tepla, smrštění a dotvarování betonu
- Zlepšení zpracovatelnosti ^[19]



Obr. 5: Vliv použití superplastifikátoru a snížení množství cementu a vody na vybrané vlastnosti cementové směsi ^[19]

2.1.4.3. Provzdušňující přísady

Při mísení se účinkem těchto přísad disperguje v čerstvé směsi vzduch ve formě velmi malých, stabilních a vzájemně oddělených bublinek. Tyto bublinky zůstávají v betonu i po jeho zatvrdnutí. Takto vzniklé vzduchové kulovité mikropóry (velikost 10–300 μm) napomáhají odolávat vystavení mrazu a rozmrazování, případně i pro ochranu proti nepříznivým účinkům rozmrazovacích solí. Naopak se vlivem přítomnosti pórů ve struktuře cementového kompozitu sníží pevnost v tlaku, a to až o 5% na každé procento provzdušnění. ^[20]

Hlavním důvodem použití provzdušňovacích přísad je vytvoření prvku s vyšší odolností proti objemovým změnám. Vlivem hydrofobního účinku provzdušňovacích přísad zůstává prostor v pórech zaplněn vzduchem což napomáhá objemové změny eliminovat. ^[20]

Provzdušňovací přísady použijeme u takových směsí, u kterých předpokládáme, že výsledný prvek bude vystaven povětrnostním vlivům (voda, mrazové cykly) anebo účinkům chemických rozmrazovacích látek (CHRL). ^[20]

Chemicky jsou provzdušňující přísady tvořeny zejména solemi přírodních pryskyřičných a mastných kyselin nebo syntetickými tenzidy.

[20]

2.1.4.4. Stabilizační přísady

Při sedimentaci tuhých částic cementového tmelu může nastat jev známý jako „bleeding“ neboli „krvácení betonu“. Stabilizační přísady redukují toto odmísení chemicky nevázané vody ze suspenze cementového tmelu, zlepšují jakost povrchu betonové konstrukce a zvyšují soudržnost betonu a výztuže. [20]

U tohoto typu přísad je záměrem snížit obsah volné vody a zvýšit měrný povrch tuhých fází. Stabilizační přísady mohou být anorganického i organického původu. [20]

Stabilizační přísady byly vyvinuty pro výrobu samozhutnitelných betonů, které by bez stabilizátorů vyžadovali velké dávky jemných částic, protože bez těchto jemných částic dochází k sedimentaci větších zrn a tím k rozmíšení betonu. Tyto přísady se nejčastěji vyrábí z derivátu celulózy (polysacharidů). [21]

Uplatňují se také při výrobě stříkaných betonů a u podvodní betonáže. Při předávkování směsi těmito stabilizátory může nastat zvýšení obsahu vzduchu v čerstvé směsi. [21]

Vlastnosti samozhutnitelného betonu jsou žádoucí právě u 3D zpracování cementových kompozitů, a to v obou technologiích (robotická ruka i 3D tisk).

2.1.4.5. Písady zpomalující tuhnutí

Zpomalovače tuhnutí brzdí proces hydratace cementové směsi a prodlužují dobu zpracovatelnosti této směsi. [20]

Nejčastěji se používají retardéry na bázi fosfátů, lignosulfonátů, derivátů cukrů nebo oxicarbonových kyselin. Tyto látky se účastí chemicko-mineralogických reakcí během hydratace cementu, a proto je nutné při

dávkování a výrobě přísad kontrolovat možné interakce mezi cementem a zpoždovačem. [21]

Těchto přísad se využívá u dopravy transportbetonu na velké vzdálenosti v teplém období, pro minimalizaci pracovních spar při betonáží větších monolitických celků a v neposlední řadě pro ovlivnění vývinu hydratačního tepla, které vede ke vzniku trhlinek, což je nežádoucí jev. [20]

Při vývoji směsi pro 3D zpracování cementových kompozitů se hojně používají právě přísady zpomalující tuhnutí. Zejména se používají u techniky modelování cementu pomocí robotické ruky, kdy je zapotřebí získat dostatek času pro uměleckou práci.

2.1.4.6. Příklad urychlující tuhnutí a tvrdnutí

Na rozdíl od zpomalovačů tuhnutí, tyto přísady urychlují proces hydratace cementového tmelu a tím zkracují dobu zpracovatelnosti. Obecně lze říci, že začátek tuhnutí nastává zpravidla o 1-3 hodiny dříve a průběh tuhnutí je obvykle kratší o 1 hodinu. [23] Naopak díky urychlení hydratace lze dosáhnout vysokých počátečních pevností, což je jeden z parametrů, který chceme dosáhnout u spodních vrstev 3D tištěných konstrukcí.

Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí bývají na bázi: CaCl_2 , dusičnanů, dusitanu, křemičitanů, hlinitanů apod. [21]

2.1.4.7. Těsnící přísady

Použitím tohoto typu přísad dosáhneme větší hutnosti cementového kamene, a to díky snížení jeho pórovitosti. Těsnící přísady vytváří nerozpustné krystalické sloučeniny, které zmenšují průřez kapilár nebo je úplně utěsní. Některé typy těchto přísad na cementové bázi se dají aplikovat na konstrukci dodatečně ve formě nátěru (při sanacích). Speciální kategorií jsou tzv. hydrofobizační přísady, které omezují kapilární elevaci vody v pórech ztvrdlého betonu a snižují nasákavost povrchových vrstev betonu.

2.1.4.8. Ostatní typy přísad

Vhodnost ostatních typů přísad, které neuvádí ČSN EN 934-2 musí být prokázána zkouškou. Jsou to například:

- Inhibitory koroze
- Biocidní přísady
- Plynotvorné přísady
- Pěnotvorné přísady
- Expanzní přísady
- Protizmrazovací přísady

2.1.5. Příměsi

Příměsi jsou pevné, jemně mleté, práškovité látky, přidávané do cementové směsi za účelem ovlivnění vlastností čerstvého i ztvrdlého cementového kompozitu. Příměsi mohou nejenom zlepšit vlastnosti cementového kompozitu ale také plnit funkci mikroplniva a tím omezit použití hrubšího kameniva a zvýšit tím měrná povrch látek ve směsi. ^[20] Rozdělení příměsí dle ČSN EN 206-1 je následující:

- Příměsi druhu I, působící v procesu hydratace téměř inertně
 - Kamenné moučky – filery ve formě mikroplniva
 - Práškové pigmenty barevných tónů
- Příměsi druhu II, působící latentně hydraulicky
 - Popílek
 - Křemičitý úlet

Příměsi se obvykle dávkují ve větším množství než přísady (≥ 2 % z dávky cementu), proto s nimi již uvažujeme do objemové skladby výsledného cementového kompozitu. ^[20]

Mikroplniva, jako jemně mleté horniny nebo přírodní moučky, s velikostí zrn do 0,125 mm se hojně používají v cementových kompozitech pro zlepšení

reologických vlastností ale také např. k lepší vodotěsnosti. Tyto jemné částice zvyšují soudržnost cementové směsi s podkladem, např. při rekonstrukcích. Jsou nepostradatelné při výrobě samozhutnitelných betonů. Bývají velmi často doprovázeny plastifikátory. ^[20]

2.1.5.1. Popílek

Produkt spalování uhlí ve formě velmi jemně zrnitého prášku se nazývá popílek. Tento popílek o velikosti cca 0,09 mm je zachycován v odlučovačích z plynů topenišť. Chemickou podstatu popílku tvoří převážně Al_2O_3 a SiO_2 . Poslední zmíněný oxid zajišťuje latentní hydraulicitu, což může částečně nahradit dávku cementu. Popílek funguje zároveň částečně jako filler, podporuje odolnost vůči agresivním látkám a příznivě ovlivňuje hutnost cementového tmelu. Nevýhodou použití popílku může být vysoký obsah CaO, který způsobuje objemové změny čerstvé a tuhnoucí směsi. Vysoký podíl SO_3 způsobuje síranovou korozi betonu a jeho objemové změny. Není vhodné používat popílek pro betonáže za nízkých teplot. ^[20]

2.1.5.2. Křemičitý úlet

Jedná se o jemnou amorfnní minerální látku, která se získává jako odpad z některých hutnických provozů. Setkáváme se stále častěji s označením mikrosilika nebo silika. Tyto látky obsahují až 98 % amorfnního SiO_2 , ve tvaru kulovitých zrn o průměru menším než 0,0001 mm, což způsobuje mimořádně velký měrný povrch a dobrými latentně hydraulickými vlastnostmi. Hlavními výhodami použití křemičitého úletu jako příměsi je: zvýšení pevnosti i při současné redukci dávky cementu, zvýšení trvanlivosti cementové směsi, omezení alkalického rozpadu kameniva a zlepšení soudržnosti čerstvé směsi. ^[20]

Dalšími zástupci ze skupiny příměsi jsou např. nanosilika, která se svým rozměrem odlišuje od mikrosilik o jeden řád. Nanosilika se dodávájí buď suchá (ve formě sbalků) nebo jako koloidní suspenze. ^[22]

Granulovaná vysokopecní struska, jako latentně hydraulický materiál, vzniká rychlým ochlazováním tekoucí taveniny zásaditě strusky, která je vedlejším produktem výroby surového železa. Rychlým ochlazením se stabilizuje sklovitý charakter strusky a umožní se vyniknutí latentně hydraulických vlastností. ^[22] Mezi příměsi také řadíme: mikromletý vápenec, metakaolin a nebo přírodní zeolit. ^[22]

3. Vybrané vlastnosti cementových kompozitů a jejich stanovování

V této kapitole jsou zmíněny vybrané fyzikální a mechanické vlastnosti cementových kompozitů, a to jak v tekutém stavu, tak ve stavu zatvrdlém. 3D zpracování cementu je disciplína, která vyžaduje po cementové směsi (v tekutém stavu) neobvyklé kombinace vlastností.

Tyto vlastnosti se týkají zejména reologie a tribologie směsi, a to především u 3D tištěných konstrukcí, kdy od směsi požadujeme dobrou čerpatelnost bez segregace hrubších zrn kameniva ale zároveň vyšší počáteční nárůst pevnosti pro nižší vrstvy tištěné konstrukce. ^[23]

Co se týče vlastností cementových kompozitů v zatvrdlém stavu, jedná se hlavně o pevnosti (v tlaku, v tahu ohybem), vlastnosti popisující transport tepla materiálem a vlastnosti popisující transport vlhkosti a v neposlední řadě také trvanlivost a odolnost vůči agresivnímu prostředí. Objemová hmotnost, která bývá často vstupním prvkem statických výpočtů, pórovitost, která ovlivňuje kapilární vzlínavost ale také pohledovost hotové konstrukce. ^[24]

Základní vlastnosti cementové směsi pro 3D zpracování jsou:

- Maximalizace pevností, zejména v tlaku (hodnoty blíží se UHPC)
- Zpracovatelnost a správná konzistence dle typu 3D zpracování
- Vysoká rychlost tuhnutí u 3D tisku (zejména nižších vrstev)
- Nízká rychlost tuhnutí u robotického sochaření (potřebujeme získat čas)
- Přizpůsobení směsi prostředí, kterému bude vystavena

3.1. Fyzikální vlastnosti

3.1.1. Objemová hmotnost, hustota matrice a pórovitost

K určení těchto vlastností nám postačí stanovení hmotnosti, rozměrů či objemu zkoušeného vzorku. Tyto základní charakteristiky materiálu nám ovlivňují zároveň všechny ostatní vlastnosti materiálu. ^[25]

Objemová hmotnost a hustota jsou definovány hmotností objemové jednotky příslušné látky. Jak je patrné již z názvu, objemová hmotnost se stanovuje včetně všech dutin a pórů, a naopak hustota je veličina, která počítá pouze s objemem vlastní látky bez dutin a pórů. Pro neporézní materiály (např. kovy) platí, že objemová hmotnost je rovna hustotě, avšak většina stavebních materiálů obsahuje póry, což způsobí, že hustota matrice je vyšší než objemová hmotnost. Množství a typ pórů v materiálu potom ovlivňuje další vlastnost jako např.: nasákavost, odolnost vůči krystalizaci solí nebo pevnost či trvanlivost. ^[25,26]

Póry v zatvrdlém cementovém kompozitu lze rozdělit do pěti skupin:

- Póry vzniklé důsledkem nedokonalého zhutnění čerstvé směsi
- Póry přítomné v zrnech plniva
- Póry ve formě provzdušnění – uzavřené póry (100–300 μm)
- Kapilární póry, vznikající mezi zrny hydratujícího cementu
- Gelové póry, vyskytující se uvnitř pevných hydrátů ^[27]

V rámci vylehčení betonu, ať už použitím provzdušňovacích přísad, nebo použitím lehčeného kameniva (plniva), mohou být póry v prvku zřizovány záměrně, avšak je potřebí dbát zvýšené pozornosti u nežádoucích vlivů pórovitosti.

3.1.1.1. Stanovení základních materiálových charakteristik

Nejjednodušší metodou pro stanovení objemové hmotnosti je gravimetrie, což je metoda, která se používá, má-li zkoumaný materiál pravidelný tvar a dá se relativně přesně určit jeho objem. Kromě objemu je dalším vstupním parametrem pro určení objemové hmotnosti

hmotnost, Při laboratorních zkouškách cementových kompozitů se nejčastěji používají vzorky ve tvaru krychle, kvádrů nebo válce.

Po vypočtení objemu a zjištění hmotnosti vzorku lze dosadit do následujícího vzorce:

$$\rho_V = \frac{m_s}{V} \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

kde

ρ_V je objemová hmotnost [kg/m³],

m_s je hmotnost měřeného objemu materiálu v suchém stavu [kg],

V je celkový objem zkoumaného materiálu, zjištěný gravimetricky [m³].

[26]

Základní jednotkou je kg/m³ nebo g/cm³.

U nepravidelných vzorků, např. u kameniva nebo u vzorků odebraných přímo z hotové konstrukce, je třeba stanovit objem jiným způsobem, např. ponořením vzorku do odměrného válce zaplněného vodou o známém objemu. [26]

Objemová hmotnost těchto materiálů nepravidelného tvaru se potom stanoví ze vzorce:

$$\rho_V = \frac{m_s}{V} \quad \text{kde} \quad V = \frac{m_v - m_a}{\rho_1}$$

kde

ρ_V je objemová hmotnost [kg/m³],

m_s je hmotnost měřeného objemu materiálu v suchém stavu [kg],

m_a je hmotnost vodou nasyceného vzorku ponořeného do kapaliny [kg],

m_v je hmotnost vodou nasyceného objemu vzorku stavu [kg],

V je celkový objem zkoumaného materiálu, zjištěný gravimetricky [m³],

ρ_1 je objemová hmotnost kapaliny [kg/m³]. [26]

Co se týče stanovování hustoty matrice nebo materiálu, využíváme metodu nazývanou pyknometrie. U této metody je měření objemu vzorku nahrazeno opakovaným stanovením hmotnosti a je doplněno nádobou o známém objemu, které říkáme pyknometr. Tato nádoba obsahuje zátku s kapilárou, která slouží pro odvod přebytečně kapaliny. Následným vážením suchého pyknometru, pyknometru s měřenou látkou, pyknometru s měřenou látkou a kapalinou a vážení pyknometru s kapalinou a dosazení těchto hodnot do vzorce lze zjistit hustotu matrice např. sypkých ale i soudržných látek a kapalin. [26]

Moderní pyknometrické metody jsou založeny na měření objemu inertního plynu (např. helia), který proniká do struktury materiálu za určitého tlaku. Výsledný objem je stanoven jako rozdíl objemu vzorku a objemu inertního plynu, který vyplňuje póry materiálu. Po tomto velmi přesném zjištění objemu můžeme dosadit do vzorce:

$$\rho_m = \frac{m}{V}$$

kde

ρ_m je hustota materiálu (matrice) [kg/m³],

m je hmotnost měřeného vzorku [kg],

V je objem vlastní hmoty vzorku [m³]. [28]

Doplňkem hustoty matrice do 100 % objemu je veličina nesoucí název pórovitost. Póry v materiálech mohou být otevřené nebo uzavřené. Výskyt, množství a velikost jednotlivých druhů pórů má velký dopad na řadu dalších materiálových charakteristik. Známe-li hodnoty hustoty matrice a objemové hmotnosti, můžeme dosadit do následujícího vztahu pro výpočet pórovitosti:

$$\psi = \left(1 - \frac{\rho_v}{\rho_m}\right) * 100 \%$$

kde

ψ je pórovitost [%],

ρ_m je hustota materiálu [kg/m³],

ρ_v je objemová hmotnost materiálu [kg/m³].^[28]

3.1.2. Zpracovatelnost, konzistence a objemové změny čerstvé směsi

Reologické vlastnosti, jako je zpracovatelnost a konzistence spolu úzce souvisí a popisujeme je v době od smíchání jednotlivých složek cementového kompozitu do začátku tuhnutí. Tento časový úsek, doba, po kterou směs v plastické podobě dopravujeme, čerpáme a ukládáme, popř. hutníme je důležitým faktorem při volbě komponentů cementové směsi. To, jaké složky a jejich poměr mísení zvolíme nám určí dobu, po kterou bude směs mít požadovanou konzistenci a bude možné jí zpracovávat.^[29]

Reologické vlastnosti dělíme do dvou základních skupin:

- Popisné – Nevyjadřují podstatu směsi a nelze je měřit. Do této skupiny patří zpracovatelnost, která obsahuje vlastnosti jako míchatelnost, dopravovatelnost, ukladatelnost, zhutnitelnost, plastičnost.
- Zvláštní – Vyjadřují schopnost odolávat přetváření při působení vnějších sil. Definicí těchto vlastností je pojem konzistence. Tyto vlastnosti se dají změřit pomocí různých metod.^[30]

Pro metody 3D zpracování cementových kompozitů jsou reologické vlastnosti stěžejní. Protože se jedná o relativně neprobádanou technologii, nelze ani zobecnit specifikaci těchto vlastností. Konzistence a s ní spjatá zpracovatelnost se volí na základě použité technologie 3D zpracování. U 3D

tisku požadujeme zejména dobrou zpracovatelnost s ohledem na dopravu směsi od zásobníků ke trysce. Při použití metody sochaření robotickou rukou požadujeme takovou konzistenci, která nám umožní, aby směs byla dlouhou dobu plastická.

Základní typy zkoušek pro stanovení konzistence čerstvé betonové směsi:

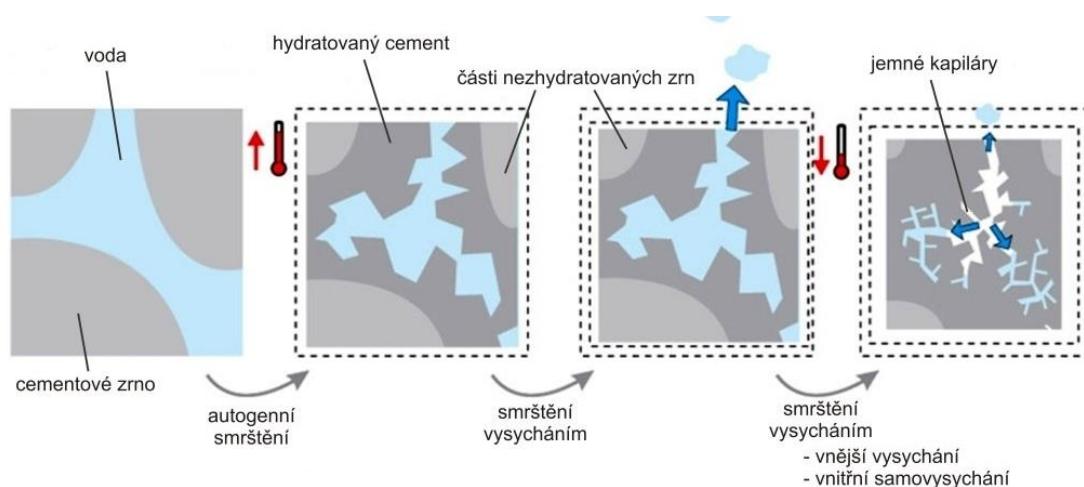
- Zkouška sednutím kužele
- Zkouška Vebe
- Stupeň zhutnitelnosti
- Zkouška rozlití kužele ^[30]

Tyto zkoušky se liší ve své podstatě natolik, že se nedoporučuje mezi nimi převádět výsledky a vzájemně porovnávat. ^[30]

Trvanlivost a životnost konstrukcí a staveb je výrazně ovlivněna vznikem a rozvojem trhlin ve fázi hydratace. To je důvodem, proč sledujeme objemové změny čerstvé cementové směsi. Vlivem vysychání a teplotních změn nastává smrštění, což má za následek vznik trhlin, které jsou nejčastěji viditelné pouze v mikrostruktuře. Tvorba těchto trhlin je způsobena napětím, vznikajícím v cementové pastě v raných stádiích. Toto napětí je spojováno s třemi druhy přetvoření:

- Autogenní smrštění (absorpcí vody během hydratace)
- Smršťování vlivem vysychání (vypařování vody během zrání betonu)
- Smršťování následkem teplotních změn (nedostatečná disipace hydratačního tepla a chladnutí horkého betonu) ^[31]

Správnou volbou fázového složení cementové směsi, užití příměsí a přísad můžeme objemové změny důsledkem autogenního smrštění eliminovat. [31]



Obr. 6: Typy smrštění cementu v různých fázích hydratace [32]

U uměleckého zpracování cementových kompozitů hrají objemové změny velkou roli, a proto je chceme co nejvíce omezit. Tyto objemové změny zkoumáme ve fázi hydratace, kdy směs přechází z kvazikapalné formy do pevné hmoty. V experimentální části této práce jsou tyto objemové změny zjišťovány pomocí metody ztracené pryžové vlnovcové formy. Vlnovec je umístěn v úchytné stolici, která zamezuje vychýlení ve vodorovném směru. Vlnovcový tvar se vyznačuje velkou poddajností, a tak sám o sobě odolává vodorovným délkovým změnám. Dále je aparatura opatřena nosnou konstrukcí čidla ke snímání posuvu ve vertikálním směru pomocí bezkontaktní optické metody měření vzdálenosti. Pomocí této metody můžeme kontinuálně snímat délkové změny s přesností $0,6 \mu\text{m}$. Pro snímání se používá laserových snímačů nebo tzv. reflexního čidla. Na horní snímaný povrch se umístí odrazová ploška, díky které dojde k optickému odrazu a zpětný signál může být přijat. [31] Více o průběhu měření se nachází v *Experimentální části* této práce.

3.1.3. Transport kapaln  vody

Chceme-li um st t navrhovanou stavbu nebo prvek do prostředí, kde se m z e vyskytovat vlhkost v kter koliv podob , musíme uvažovat možnost degradace tohoto prvku vlivem vlhkosti. Jedná se zejména o prvky vystaven  povětrnostním vlivům p r mo. Typickým p r kladem m z e být tepeln  izolace nebo v podstatě jak koliv obálka, např. obkladov  prvky vytvo en  3D metodou.

Přenos vlhkosti materiálem nastává třemi způsoby:

- Sorpc  vodní páry
- Difúzí vodní páry
- Vodivostí vlhkosti ^[33]

Sorpc  vodní páry se rozumí pohlcování vodní páry obsa en  ve vzduchu, kter y materiál obklopuje. Sou ast  sorpce je adsorpce, kter  je způsobena mezimolekulárními van der Waalsovými silami, kterými se přitahují pevn  látky a vodní pára. Další součastí sorpce je absorpce, při které se kapaln  a plynn  fáze vstřebává pomocí difúze a veden  vlhkosti dovnit r tuh  fáze. Relativn  vlhkost vzduchu je rozhodujícím parametrem pro sorpci. ^[33]

Difúze je schopnost molekul plynu, páry nebo kapaliny pronikat do p r  materiálu. V p r pad , kdy se p rovit y materiál nachází na hranici prostředí, mezi nimiž je rozdíl  asticov ch tlaků vodní páry. Tento jev nastává především v mikrokapil r ch o rozměru $\leq 10^{-7}$ m. ^[33]

Vodivost vlhkosti, navlhavost, vysychavost a nasákavost jsou vlastností popisující transport vlhkosti materiálem.

3.1.3.1. Metoda vertik ln  nasákavosti (1D transport)

M r c m za r zen m při této zkoušce je váha se z v sn m dr z kem, do něhož je umístěn vzorek, který m  izolovan  bo n  stěny. Spodn  strana visícího vzorku je ponořena několik milimetrů do vodní l zn  a pomocí kontinuálního v a en  vzorku zaznamenávaného pomocí v po etn  techniky

Ize stanovit několik materiálových charakteristik. Důležité je znát hmotnost suchého vzorku a plochu stěny, přes kterou probíhá transport. Veličiny popisující transport kapalně vody jsou: absorpční koeficient vody A nebo součinitel vlhkostní vodivosti κ

Stručný popis měření vlastností dle metody vertikální nasákavosti, při izolovaných bočních stranách vzorku:

- Zaizolování bočních stěn vzorku dvousložkovým epoxidovým lepidlem (1D transport)
- Změření ustálené hmotnosti vzorku [g]
- Změření plochy stěny, kterou bude voda transportována [m^2]
- Zavěšení vzorku do aparátu visícího na váze tak, aby jeho spodní stěna byla 1-2 mm ve vodě
- Výpočetní technikou nastavíme časový interval zaznamenávání hmotnosti
- Po ustálení hmotnosti lze považovat zkoušku za ukončenou – textový soubor s hodnotami hmotností a času
- Vynesení křivky nasákavosti-z lineární části se odečte absorpční koeficient vody A [$kg/m^2s^{1/2}$]

3.1.4. Termofyzikální vlastnosti

Snižování energetické náročnosti budov je trend, který úzce souvisí s termofyzikálními vlastnostmi. To, jaký má použitý materiál termofyzikální vlastnosti ovlivňuje např. nároky na vytápění a s tím spjaté emise skleníkových plynů. U 3D technologií zpracování cementu se znalost termofyzikálních vlastností může hodit např. při návrhu obkladových tvárnic, vytvořených metodou robotické ruky. Pro 3D tisk z betonu platí fakt, že čím lepší tepelně technické vlastnosti materiál má, tím lépe, protože může odpadnout nutnost dodatečného zateplení, jehož realizace by mohla u 3D tištěných budov působit potíže.

Teplo se dle fyziky šíří vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) nebo zářením (radiací). Ve stavebních konstrukcích se teplo šíří nejčastěji

vedením. Stavební částice látky si předávají při kondukcí kinetickou energii pomocí neuspořádaných tepelných pohybů a tím se přenáší z míst s vyšší teplotou do míst s teplotou nižší. Pomocí různých metod měření lze definovat následující veličiny, díky kterým můžeme daný materiál charakterizovat.

Součinitel tepelné vodivosti λ [$\text{W m}^{-1}\text{K}^{-1}$]: Vyjadřuje schopnost látky vést teplo a vyjadřuje se číselnou hodnotou jako hustota tepelného toku při gradientu 1 K m^{-1} v látce a lze ho stanovit stacionární či nestacionární metodou. Součinitel tepelné vodivosti nemá stále stejnou hodnotu. Nejvíce součinitel tepelné vodivosti ovlivní struktura látky, pórovitost, teplota nebo vlhkost. Nejlépe vedou teplo kovy a pevné látky a nejhůře plyny. ^[39]
Součinitel teplotní vodivosti a [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]: Tato veličina popisuje schopnost stejnorodého materiálu o známé vlhkosti, při neustálém vedení tepla vyrovnávat teploty. Tato veličina je vyjádřena následujícím vztahem:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho}$$

kde

λ je součinitel tepelné vodivosti,

c_p je objemová tepelná kapacita,

ρ je objemová hmotnost měřeného materiálu. ^[34]

Dle této veličiny lze z rychlosti změny teploty v daném místě materiálu určit změnu jeho povrchové teploty. Čím je hodnota teplotní vodivosti vyšší, tím je teplota v daném místě materiálu závislejší na změně jeho povrchové teploty. ^[34]

Měrná tepelná kapacita c [$\text{J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$]: Je veličina popisující, jaké množství tepla musíme dodat látce o známé hmotnosti, abychom zvýšili její teplotu o 1 K.

Je vyjádřena pomocí vztahu:

$$c = \frac{c_p}{\rho_v}$$

kde

c_p je objemová tepelná kapacita naměřená přístrojem [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$],

ρ_v je objemová hmotnost měřené látky. ^[34]

Více o měření termofyzikálních vlastností materiálu a samotné stanovení těchto vlastností je popsáno a interpretováno v *Experimentální části*.

3.2. Mechanické vlastnosti

Z mechanických vlastností je nejdůležitější veličinou pevnost. Obecná přednost betonu jako materiálu je pevnost v tlaku, a proto při navrhování konstrukcí dodržujeme toto pravidlo a navrhujeme betonové prvky jako tlačené. Oproti tomu, pevnost v tahu je u betonu několikanásobně nižší. To znamená, že vzniká potřeba vylepšit prostý beton a umožnit jeho použití i u jiných než pouze tlačených konstrukcí. Proto se do betonu přidává např. ocelová výztuž, nebo rozptýlená výztuž v podobě drátků nebo umělých vláken. V rámci této práce je cílem, aby zkoumané vzorky dosahovaly pevností podobných UHPC.

3.2.1. Pevnost v tlaku

Stanovování pevnosti v tlaku se řídí dle ČSN EN 12390-3. Zkušebními tělesy pro zkoušku pevnosti v tlaku jsou nejčastěji: krychle (délka hrany: 150 mm, je možné použít i jiný rozměr), válce 150 x 300 mm, trámce 150 x 150 x 400 mm nebo trámečky 40 x 40 x 160 mm. Před začátkem měření je nutné změřit plochu stěny, na kterou bude působit lis. Vzorek se umístí do zatěžovacího lisu odpovídajícímu EN 12390-4 a je postupným nárůstem zatěžovací síly zatěžován až do porušení.

Po porušení vzorku odečteme maximální sílu a dosadíme do následujícího vzorce: ^[35]

$$f_c = \frac{F}{A_c} [\text{MPa}]$$

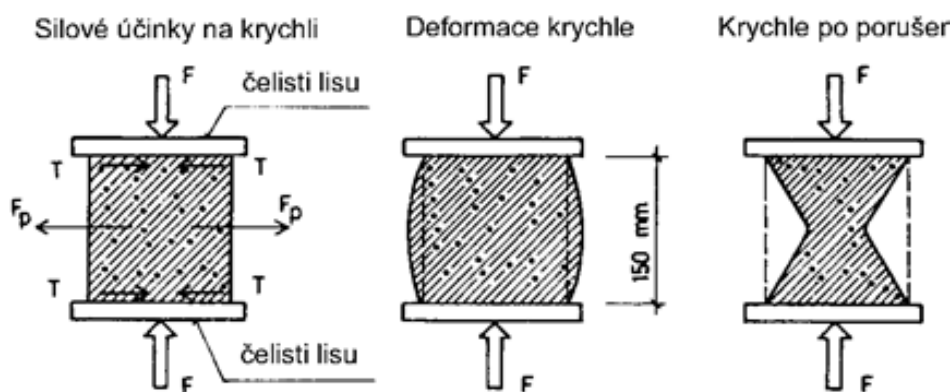
kde

f_c je pevnost v tlaku [MPa],

F je maximální zatížení při porušení [N],

A_c je průřezová plocha, na kterou působí zatížení v tlaku. [mm²]

V rámci této práce, v kapitole *Experimentální část* je pevnost v tlaku zkoušena na zbytcích trámečků po zkoušce v tahu za ohybu. V tomto případě jsme použili přídatnou aparaturu do zatěžovacího lisu, která nám zajistila přesnou velikost zatěžovací plochy vzorku.



Obr. 7: Schéma tlakové zkoušky na betonové krychli ^[36]

3.2.2. Pevnost v tahu ohybem

Pevnost v tahu za ohybu se stanovuje dle ČSN EN 12390-5. Stejně jako u pevnosti v tlaku hovoříme o destruktivní zkoušce. Existuje zkouška tříbodovým ohybem anebo čtyřbodovým ohybem. Nevýhodou tříbodového ohybu je přítomnost smyku za ohybu a tím pádem jiný průběh posouvající síly, což má za následek předdefinování místa porušení. Naopak u čtyřbodového ohybu, kde je moment konstantní mezi dvěma zatěžovacími válečky, si může trhлина sama najít nejslabší místo, které může vytvářet např. nesourodost materiálu. Zkouška pevnosti v tahu ohybem probíhá totožně jako zkouška v tlaku, s tím rozdílem, že se použije jiná

aparatura umístěna do lisu a tím je zapříčiněno jiné namáhání – tah za ohybu. V experimentální části jsme stanovovali tuto pevnost metodou tříbodového ohybu. Po odečtení maximální síly ze zatěžovacího lisu, lze dosadit do následujícího vzorce ^[35]:

$$f_{cf} = \frac{3 \cdot F \cdot l}{2 \cdot d_1 \cdot d_2^2} [\text{MPa}]$$

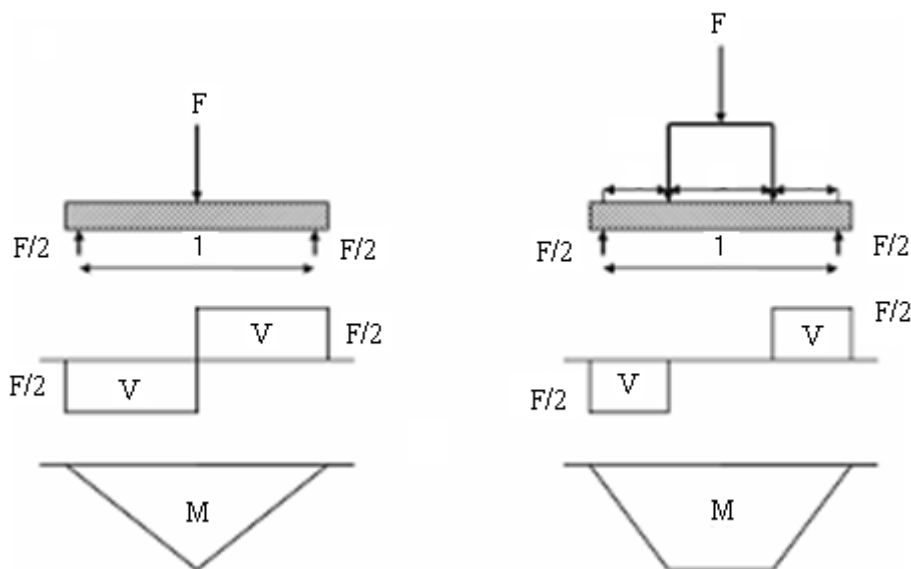
kde

f_{cf} je pevnost v tahu ohybem, [MPa]

F je maximální zatížení při porušení, [N]

l je vzdálenost mezi podpěrnými válečky, [mm]

d_1 a d_2 jsou rozměry příčného řezu tělesa. [mm]



Obr. 8: Vnitřní síly a schéma zatížení pro tříbodový a čtyřbodový ohyb

[37]

4. Metody 3D zpracování cementových kompozitů

V několika posledních letech můžeme pozorovat nárůst zájmu o technologie 3D zpracování a jejich pronikání ze světa na tuzemský stavební a umělecký trh. Titulky typu „V Číně vytiskli za 24 h. deset domů“ poutají pozornost nejen odborníků v oblasti stavitelství ale i široké veřejnosti. Tyto 3D technologie také podněcují nekritická očekávání, přehlušující nezralost a omezení této technologie a připisují ji téměř zázračné vlastnosti. Je prorokováno, že do několika let budeme schopni opustit standardní způsoby výstavby a přejít na 3D vytváření celých komplexů budov. Projektování, příprava a realizace staveb obvykle není prací jednoho podniku, a tak vlivem obtížné koordinace mezi jednotlivými účastníky výstavby a ztrát během předávání informací často vznikají chyby, zpoždění a ekonomické ztráty. Dalším aspektem, který by mohla digitalizace a využívání 3D technologií ovlivnit je efektivnější využívání surovin. Dle některých analýz je až 50 % z materiálů činí odpad. Zvyšující se nároky na rychlost výstavby, tlak na cenu a na úspornost nejen výstavby samotné ale celého životního cyklu budov, přiměly stavební trh přizpůsobit se novým technologiím a přilákat tak zájem mladých lidí o obor stavitelství, jako jeden z pilířů národní ekonomiky. Tyto změny ve stavebnictví provází tzv. čtvrtá průmyslová revoluce, který probíhá již od roku 2010 a staví na principu kyberneticko-fyzikálních systémů a digitalizace. ^[38]

Technologie digitální fabrikace lze dle způsobu opracování materiálu rozdělit do několika skupin:

- 2D CNC technologie (CNC řezání)
- Subtraktivní technologie (CNC obrábění)
- Formativní technologie (CNC tváření)
- Aditivní technologie (3D tisk)
- Robotická montáž (skladba)
- Hybridní technologie ^[38]

Metoda 3D tisku a hybridní metoda použití robotické ruky jsou metody, které popisují v dalších kapitolách této práce. Nároky na vlastnosti směsi, dle použité technologie se mohou výrazně lišit. Zatím co u použití robotické ruky, požadujeme od směsi plastičnost a dlouhou dobu tuhnutí, u 3D tisku je to zejména dobrá reologie a čerpatelnost a také vyšší nárůst pevnosti po položení vrstvy. Výběr technologie a nároky na prvek nebo konstrukci jsou klíčovými faktory při výběru složek cementové směsi.

4.1. Robotické sochaření

Robotická ruka je univerzální manipulátor, který po správném naprogramování může zastat prakticky jakoukoliv činnost, a to i sebevíce náročnou na přesnost. Robotická ruka se naopak vyznačuje vyšší přesností a menším množstvím chyb. S použitím technologie robotické ruky se lze setkat v mnoha odvětvích, např. svařování, lakování nebo medicíně, kde může provádět chirurgické zákroky. [39]

Stejně jako u 3D tisku a použití CNC strojů je jednou součástí pohybu a práce robotické ruky mechanický model a druhou součástí je softwarové vybavení. Robotická ruka může být konstruována jako synchronní nebo programovatelná. Programovatelné mohou mít pevný program, proměnlivý program anebo se jedná o tzv. kognitivní roboty. U synchronního typu je nutno vždy vyměnit celý software za nový, při změně využití robotické ruky. U programovatelných lze upravovat jednotlivá data a koeficienty vnitřního nastavení programu. Kognitivní roboti disponují umělou inteligencí a dokážou se sami přizpůsobit úkolu. [40]

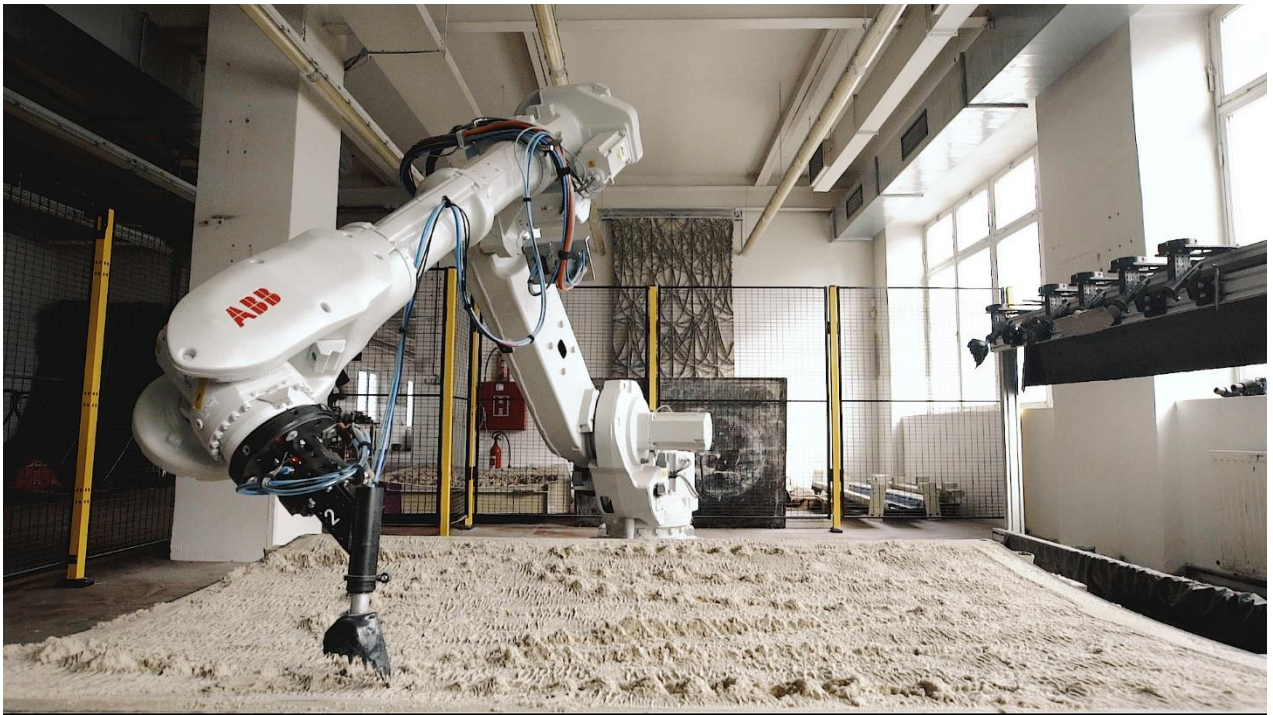
Existuje několik způsobů jako postupovat při volbě a návrhu robotické ruky. Známe-li úkol, resp. požadovanou kinematickou strukturu a druh nástroje a pohybu, který bude ruka vykonávat, zbývá vyřešit jen návrh pohonu a přenosové soustavy. Robotická ruka může využívat způsob aditivní (přidávání materiálu) ale také formativní (tvarování materiálu), záleží pouze na volbě nástroje. U komerčních robotů je obvyklý způsob pohonu ten, že každý kloub robota má vlastní motor, který se ovšem nachází v základně, a ne přímo u kloubu. Pohon jako takový bývá řešen řemeny. Díky umístění motoru v základně je

zmenšena hmotnost ruky a je možné zvedat těžší břemena. Největší předností robotické ruky je opakovatelnost pohybu, při práci se stejnou kvalitou bez ohledu na čas. ^[41]

Ve stavebnictví se robotická ruka uplatňuje zejména u výroby originálních uměleckých výrobků, které mohou být vytvořeny ve formě obkladových prvků vyskládaných vedle a ušetřit čas výroby těchto dílců a přesnost provedení. Další možností použití robotické ruky je umístění trysky jako nástroje (neobejde se bez zásobníku směsi a dopravní cesty), která by vytlačovala jednotlivé vrstvy konstrukce na základě 3D modelu. Toto využití se předpokládá spíše pro nenosné konstrukce, popř. části nosných konstrukcí.



Obr. 9: Výdech tunelu Blanka v ulici Nad Královskou oborou obložený obkladovými prvky vyrobenými pomocí robotické ruky ^[42]



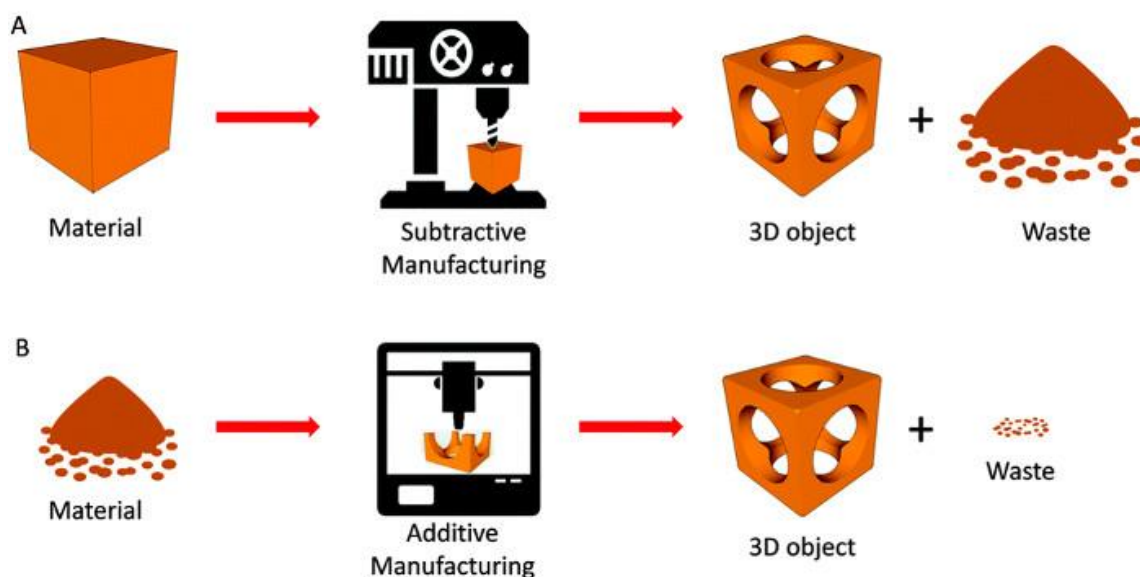
Obr. 10: Robotická ruka pracující na obkladovém prvku. Návrh obkladových prvků: Frederico Diaz s.r.o. [42]

Použití této technologie je úzce spjato s vlastnostmi čerstvé cementové směsi. Očekáváme konstantní mechanické a reologické vlastnosti po celou dobu vytváření daného tvaru do povrchu jednotlivých prvků. Nedílnou součástí návrhu směsi je tedy říditelná doba zpracování, zajištěna za pomoci dávkování přísad a příměsí. Kromě robotické ruky by mohla být výsledná navržená směs používána širokou veřejností za pomoci klasických sochařských technik.

4.2. 3D tisk betonu

Výchozí technologií pro 3D tisk betonu je v dnešní době již hojně využívaný 3D tisk z plastu. Obě metody se popisují jako „additive manufacturing“ neboli aditivní výroba, jejíž podstata spočívá v přidávání, nikoliv ubírání materiálu. Nejběžnější se používá u 3D tisku metoda Fused Deposition Modelling (FDM), kdy je za pomoci trysky kladen materiál v horizontálních vrstvách ve směru os „x, y, z“. V dnešních běžně používaných tiskárnách na plast je prostor, ve kterém je možné tisknout obestavěn konstrukcí tiskárny a je tak omezen na řády několika desítek centimetrů. Additive manufacturing je opakem „subtractive

manufacturing“, při kterém je materiál frézován (ubírán). Tento rozdíl lze vidět na obr. 11. [43,44]



Obr. 11: Rozdíl mezi „Subtractive“ (A) a „Additive“ (B) manufacturing [45]

Celý proces 3D tisku lze rozdělit do dvou částí – softwarová a hardwarová. V softwarové části se navrhne tvar objektu, který se pomocí výpočetní techniky převede do jednotlivých pohybů tiskové hlavičky s ohledem na dané tloušťce a výšce tištěných vrstev. [46]

Co se týče vlastností použité směsi, je důležité, aby směs měla téměř minimální sedimentaci, bez segregace hrubších zrn kameniva a zároveň dobrá pumpovatelnost nebo čerpatelnost. Zásadní je tedy volba vhodné granulometrie v závislosti na velikosti trysky. Materiál by měl být tixotropní, (tj. tuhý ale při dodání energie ztekucený). Důležité je také precizní promíchání všech komponentů s vodou, což může vlivem nízkého vodního součinitele být problematické. [46]

Náklady na tvorbu bednění, tvoří dle Nerella et. al 25-60 % všech peněz vynaložených na betonáž, což tvoří podstatnou část finanční náročnosti staveb.

[47]

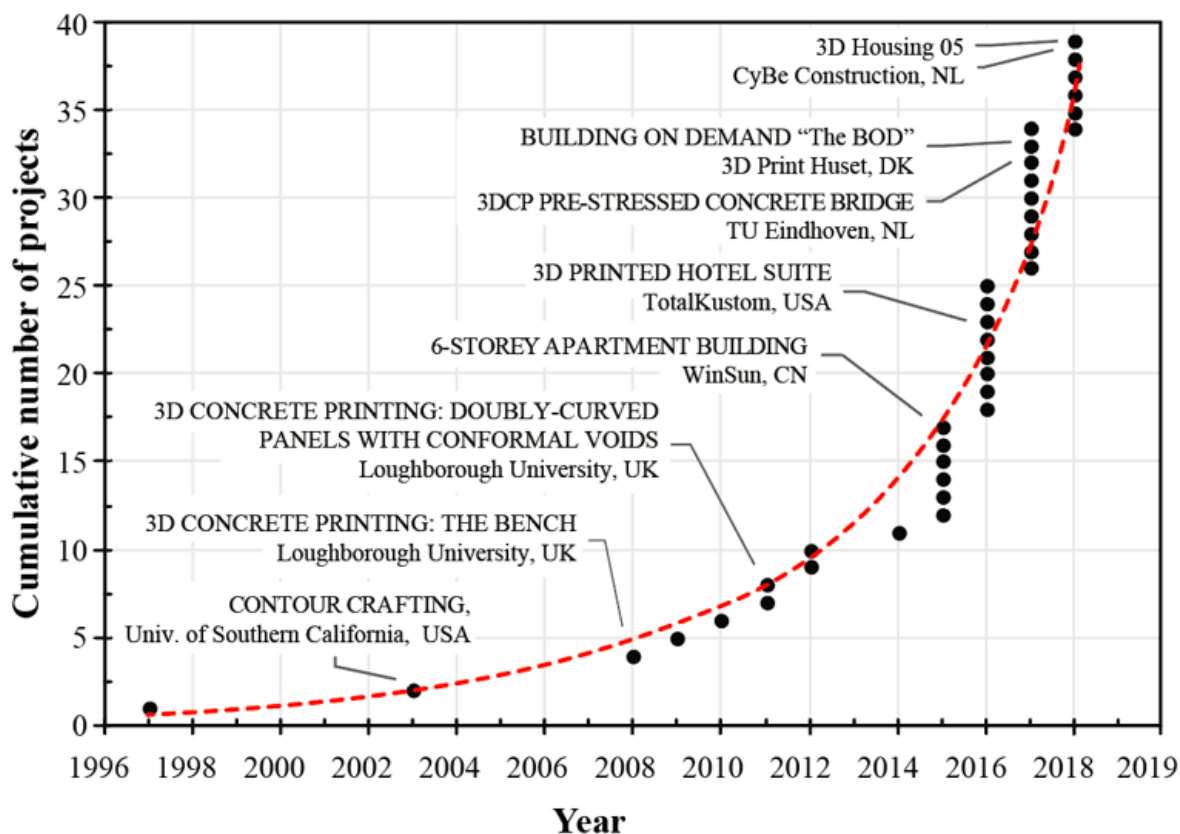
4.2.1. Výhody a využití technologie 3D tisku

Technologie 3D tisku má za úkol změnit potenciál stavebního průmyslu ve světě a to hlavně v urychlení procesu výstavby, zlevněním staveb ale také vytvářením architektonicky ojedinělých staveb, které by byli klasickými metodami hůře realizovatelně z důvodu náročnosti bednění.

Další velkou výhodou je umožnění budování konstrukcí dle přání investora, a to bez využití bednění, metodou nazývanou free-form. Dojde tak v efektivnímu využití potenciálu materiálu, u kterého bude možno ovládat využití tahových a tlakových vlastností. V praxi by se jednalo o užití metody „strut and tie“.^[48]

Poměrně futuristickou, avšak rychle se blížící představou je fakt, že by technologie 3D tisku betonu měla vliv při osidlování Marsu. Nápad je takový, že se na Mars vyšlou stavební stroje s materiálem a vytvoří hrubou stavbu základny, kde se posádka po přistání může zabydlet. Společnost NASA vyhlásila soutěž, kde se snaží zvolit takovou technologii, která v maximální možné míře dokáže vybudovat konstrukci bez účasti lidí.^[49] V Nizozemsku je plánováno vyřešit problém s nedostatkem pracovníků použitím 3D tisku budov. Projekt „Milestone“ ve městě Eindhoven, je projekt prvního 3D tisku ne jedné budovy ale rovnou celého komplexu. Jak už název „Milestone = milník“ napovídá, jde o převratný projekt.^[50]

Metoda 3D tisku může být v neposlední řadě využita také pro tisk jednotlivých dílců nosné konstrukce nebo prvků. Tyto dílce se následně spojí ocelovými tyčemi zajišťujícími dostatečně spolupůsobení a přenos namáhání.



Obr. 12: Graf vývoje a četnosti použití 3D tisku betonu ve světě [51]

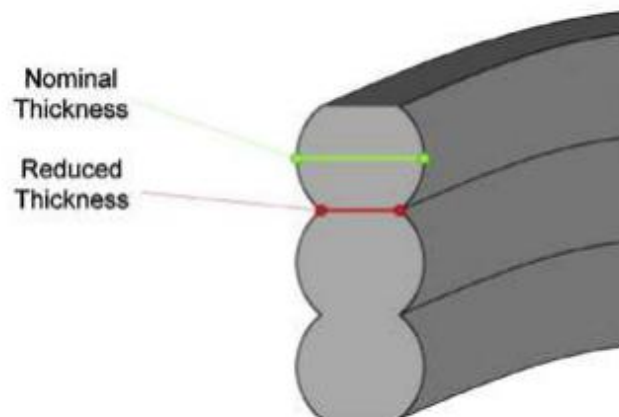
V České republice nebyl 3D tisk betonu využíván až do roku 2020, kdy se začalo pracovat na prvním českém 3D tištěném domě – Prvok. Část tohoto domu byla vytištěna přímo v Experimentálním centru fakulty Stavební ČVUT v Praze. Tato část konstrukce byla testována a došlo se k závěru, že vydržela několikanásobně větší zatížení, než požadovaných 5 kN/m². V experimentální části této práce je zkoušena směs č. 1, která byla použita právě pro tisk Prvoka.



Obr. 13: První český 3D dům-Prvok umístěný na pontonu na Vltavě. [52]

4.2.2. Požadavky na použitý materiál

I přes progresivnost použití technologií 3D tisku z betonu stále nejsou požadavky na materiál přesně specifikovány, tzn. že nově navržená směs nemusí být vhodná pro všechny způsoby 3D tisku. Plnivo musíme zvolit v návaznosti na minimální rozměr uvnitř pumpovací trasy, velikosti a tvaru trysky apod. Rozměr plniva, pro 3D tisk v dnešní době nepřekročí rozměr 2-3 cm a je důležité, aby nedocházelo k jeho segregaci. V případě konzistence směsi se u 3D tisku střetáváme s protichůdnými požadavky. Jednak požadujeme dostatečnou tekutost při dopravě směsi trubkovým systémem, ale na druhou stranu musí docházet k poměrně rychlému tuhnutí po aplikaci. Každá další položená vrstva musí také být v dostatečné součinnosti s vrstvou spodní. Zde je rozdíl oproti tisku z plastu, kdy je zahřátý plast (200 °C) při aplikaci ochlazen na 50 °C a dochází k okamžitému zatuhnutí. [53]



Obr. 14: Proměnlivý průřez u vrstev 3D tisku ^[53]

Na obr. 14 můžeme vidět proměnlivý průřez konstrukce, jejíž vrstvy se skládají z kruhových provazců. Vzhledem k tomu faktu, je nutné upravit způsob zkoušení mechanických vlastností. V této práci je využito standardních destruktivních zkoušek, a proto jsou výsledné hodnoty těchto zkoušek pouze orientační a nelze s nimi uvažovat ve statickém výpočtu.

5. Experimentální část

5.1. Cíle experimentální části

Cílem experimentální části je stanovení vybraných mechanických a fyzikálních vlastností cementových směsí určených pro 3D zpracování. Celkem jsou zde popsány tři různé směsi, z nichž jedna je komerčně používaná, a tak můžeme dvě nově navržené směsi s touto směsí porovnat. Cílem je vytvořit takovou směs, která bude veřejně užívaná a prodávaná v napytlované podobě, čímž vzniká nutnost znalosti jejich mechanických a fyzikálních vlastností. Hlavním úkolem této části je vypracování souboru těchto vlastností.

5.2. Složení použitých vzorků a použité značení

První směs je již veřejně prodejná a používaná, proto ji budeme v této práci považovat za referenční. Je to směs MasterFlow 3D 100 od firmy BASF. Výrobce uvádí, že se jedná o „nesmrštlivou hmotu speciálně vyvinutou pro 3D tisk“. Následující vlastnosti uváděné výrobcem jsou:

- Velikost zrna do 0,5 mm
- Dobrá zpracovatelnost, nulová segregace
- Vysokopevnostní, rychle vytvrzující
- Zpracovatelnost – 1 hod / + 20 ° C
- Množství záměsové vody – 0,165 l / kg
- Obsahuje: Portlandský cement, chemikálie

Vzorky vyrobené z této směsi jsou značeny číslem **1**.

Výzkum složení směsi určené pro 3D zpracování je stále v procesu a neustále se optimalizují jednotlivé komponenty směsi pro získání požadovaných vlastností. Nově navržené směsi **2** a **3** jsou součástí běžícího projektu a jejich složení zatím nebylo nikde publikováno. Každý v oboru si chce zachovat své know-how a uchovat přesné složení směsi v tajnosti. U směsí č. **2** a **3** můžeme pouze říci, že se jedná o kombinaci cementu s přísadami a příměsemi v určitých poměrech mísení.



Obr. 15: Vybetonované vzorky před odbedněním

Pro zkoušky, které jsou v této práci vyhodnocovány, jsme zvolili zkušební tělesa ve tvaru krychlí o délce hrany 70 mm a 50 mm. Dále byly vyhotoveny trámečky o rozměrech 160 x 40 x 40 mm. Trámečky byly použity u zkoušek mechanických vlastností a krychle pro měření tepelných a vlhkostních vlastností. Při míchání směsi jsme u směsi číslo 1 postupovali dle návodu výrobce, který uvádí hodnotu vodního součinitele 0,156, což je velmi nízká hodnota, tudíž můžeme předpokládat, že pod pojmem „chemikálie“, uváděném na obalu výrobku, si můžeme představit přísadu nebo příměs ovlivňující zpracovatelnost čerstvé směsi. U směsí 2 a 3 jsme postupovali tak, že jsme nejprve navážili suchou cementovou kompozitní směs, částečně rozmíchali v záměsové vodě a poté postupně přilévají vodu až do té doby, než směs měla ty správné reologické vlastnosti potřebné právě pro 3D zpracování. Dobrým vodítkem nám mohl být vodní součinitel uváděný výrobcem směsi 1. Vhodným a odborným odhadem doc. Ing. Karla Koláře, CSc. byl zvolen vodní součinitel 0,183 pro směs 2 a 0,163 pro směs 3. Po umíchání směsí s vodou byla směs přemístěna do předem vymazaných forem a lehce zhutněna. Od směsi sice požadujeme vlastnosti SCC, ale způsob ukládání směsi např. při 3D tisku se výrazně liší od ukládání do formy nebo bednění. Při ukládání směsi do bednění již bylo zřetelné, že má směs konzistenci tužší pasty, což je žádoucí u metod 3D zpracování.



Obr. 16: Vzorky po odbednění

Po pěti dnech od betonáže přišlo na řadu odbednění vzorků, dvě třetiny vzorků putovaly do prostředí se zvýšenou vlhkostí a vzorky určené pro měření 7denních fyzikálních vlastností byly umístěny do pece, kde probíhalo sušení až do ustálení hmotnosti. Záměrem této práce, je zkoumat vybrané mechanické a fyzikální vlastnosti po 7, 14 a 28 dnech od výroby vzorků. Toto postupné měření v různých fázích tvrdnutí betonu nám umožní získat ucelenější a objektivnější přehled ve vývoji zejména pevnostních charakteristik.

5.3. Vyhodnocení, průběh a výsledky zkoušek cementových kompozitů

5.3.1. Pevnosti

Použité vzorky byly trámečky 40 x 40 x 160 mm. Nejprve byl do lisu umístěn aparát pro tříbodový ohyb (vzdálenost podpor = 100 mm), na něm provedena zkouška a poté byly vloženy zbylé poloviny trámečků do druhého aparátu pro zkoušku v tlaku (kontaktní plocha 40 x 40 mm). To je důvodem toho, proč hodnot pevnosti v tlaku uvádím více než v tahu ohybem.



Obr. 17 a), b): Rozdílné porušení vzorků při tlakové zkoušce

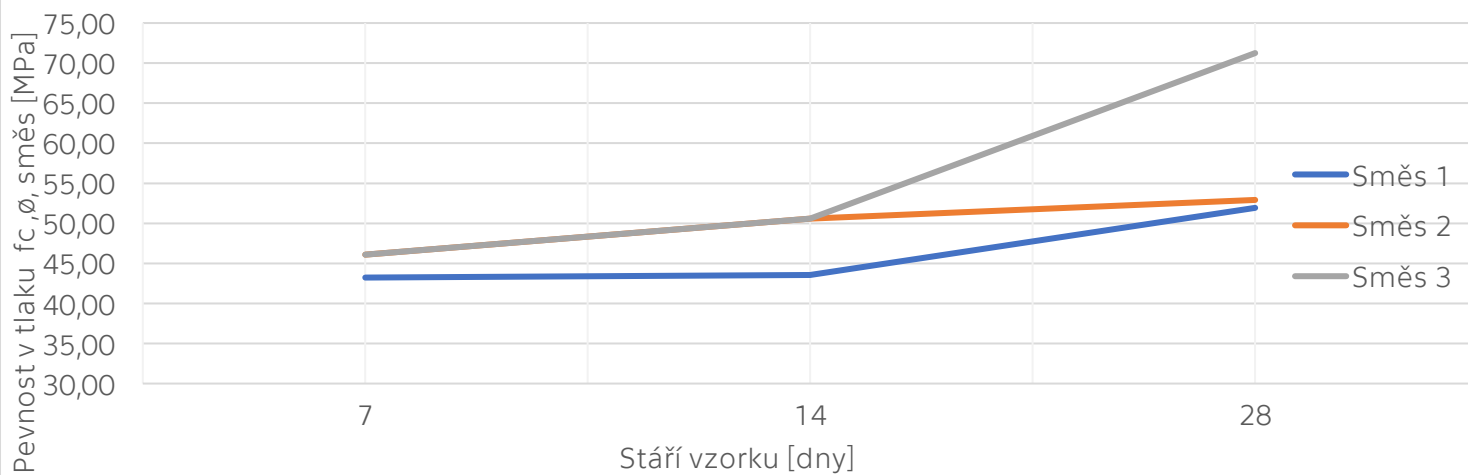
Při provádění tlakové zkoušky pozorujeme jev zachycený na obr. 17 a). Můžeme pozorovat vznik trhlin, avšak vzorek stále drží svou celistvost oproti vzorku na obr. 17 b). I přes neznámé složení směsi č. 1 usuzuji, že jednou z přísad byla mikrovlákna v podobě rozptýlené výztuže.

5.3.1.1. Výsledky mechanických zkoušek

Pevnosti - 7 denní														
Označení	Hmotnost [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	ρ_v [kg/m ³]	F_{ohyb} [kN]	F_{tlak} [kN]	F_{tlak} [kN]	f_c [Mpa]	f_c [Mpa]	f_c, \emptyset [Mpa]	f_{cf} [Mpa]	$f_{c, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]	$f_{cf, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]
1.1.	496	39,8	40,8	159,7	1913	2,90	56,50	72,50	35,3	45,3	40,3	6,6	43,2	6,8
1.2.	521	40,5	41,6	159,5	1939	3,10	67,50	75,00	42,2	46,9	44,5	6,6	44,5	6,6
1.3.	512	40,5	40,3	159,6	1966	3,15	72,50	71,00	45,3	44,4	44,8	7,2	44,8	7,2
2.1.	547	41,1	40,6	160,5	2042	3,05	71,00	76,00	44,4	47,5	45,9	6,8	42,4	7,3
2.2.	523	40,4	40,2	160,8	2003	3,30	63,50	60,50	39,7	37,8	38,8	7,6	37,8	7,6
2.3.	525	39,9	40,1	160,6	2043	3,25	62,50	73,50	39,1	45,9	42,5	7,6	42,5	7,6
3.1.	546	41,1	40,00	160,3	2072	2,90	74,50	64,00	46,6	40,0	43,3	6,6	46,1	7,1
3.2.	554	40,7	40,9	160,2	2077	3,45	81,50	75,00	50,9	46,9	48,9	7,6	46,9	7,6
Pevnosti - 14 denní														
Označení	Hmotnost [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	ρ_v [kg/m ³]	F_{ohyb} [kN]	F_{tlak} [kN]	F_{tlak} [kN]	f_c [Mpa]	f_c [Mpa]	f_c, \emptyset [Mpa]	f_{cf} [Mpa]	$f_{c, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]	$f_{cf, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]
1.1.	539	40,1	39,8	162,0	2085	3,60	74,00	73,00	46,3	45,6	45,9	6,6	43,5	6,8
1.2.	522	40,4	41,5	160,8	1936	2,50	65,00	83,00	40,6	51,9	46,3	5,4	46,3	5,4
1.3.	523	40,1	41,6	161,0	1947	3,00	64,00	58,00	40,0	36,9	36,4	6,5	36,9	6,5
2.1.	532	40,3	40,2	159,5	2059	3,30	92,00	87,00	57,5	54,4	55,9	7,6	50,6	7,7
2.2.	535	40,0	40,6	161,0	2046	3,30	72,00	82,50	45,0	51,6	48,3	7,5	47,5	7,5
2.3.	536	40,4	40,3	160,6	2050	3,45	79,00	73,00	49,4	45,6	47,5	7,6	47,5	7,6
3.1.	555	40,2	40,8	159,8	2118	4,20	87,50	96,00	54,7	60,0	57,3	9,4	57,3	10,1
3.2.	545	40,6	39,8	160,6	2100	4,65	83,00	99,50	51,9	62,2	57,0	10,8	57,0	10,8
Pevnosti - 28 denní														
Označení	Hmotnost [g]	a [mm]	b [mm]	c [mm]	ρ_v [kg/m ³]	F_{ohyb} [kN]	F_{tlak} [kN]	F_{tlak} [kN]	f_c [Mpa]	f_c [Mpa]	f_c, \emptyset [Mpa]	f_{cf} [Mpa]	$f_{c, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]	$f_{cf, \emptyset, sm\acute{e}s}$ [Mpa]
1.1.	550	41,2	40,8	161,3	2028	6,30	96,50	85,00	60,3	53,1	56,7	13,8	51,9	13,3
1.2.	555	40,3	41,1	161,5	2075	5,90	91,00	86,00	56,9	53,8	55,3	13,0	53,8	13,0
1.3.	561	41,2	41,3	162,3	2031	6,20	68,00	72,00	42,5	45,0	43,8	13,2	43,8	13,2
2.1.	522	40,8	39,5	158,9	2038	5,70	83,00	87,00	51,9	54,4	53,1	13,2	52,9	12,1
2.2.	541	40,5	41,0	159,3	2045	5,40	88,00	90,00	55,0	56,3	55,6	11,9	56,3	11,9
2.3.	535	39,8	41,7	159,9	2016	5,00	80,00	80,00	50,0	50,0	50,0	10,8	50,0	10,8
3.1.	558	40,5	41,2	159,5	2091	6,10	119,00	103,50	74,4	64,7	69,5	13,3	71,3	13,7
3.2.	559	40,2	40,4	160,5	2145	6,20	107,00	126,50	66,9	79,1	73,0	14,2	73,0	14,2
Vzorky, lišící se od průměrné pevnosti o více než 10 % byly vyznačeny a byl spočten průměr nový														
		11,4												
		7,6												
		46,1												
		5,9												
		7,6												

Tab. 1: Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku a v tahu

Vývoj pevnosti v tlaku v závislosti na stáří vzorku



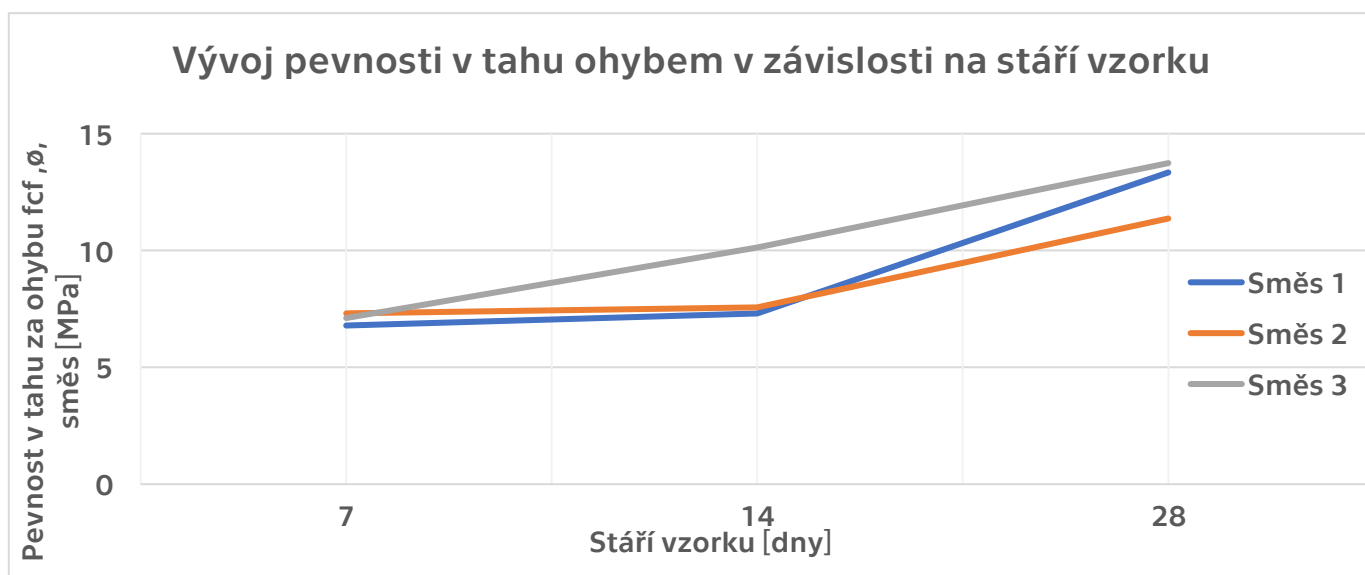
Graf 1: Vývoj pevnosti v tlaku v závislosti na čase

Označení směsi	7denní	14denní	28denní
	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v tlaku [Mpa]	pevnost v tlaku [Mpa]
1	43,2	43,5	51,9
2	46,1	50,6	52,9
3	46,1	50,6	71,3

Tab. 2: Průměrné hodnoty tlakových pevností viz. Tab. 1



Obr. 18: Porušení vzorku po zkoušce v tahu ohybem



Graf 2: Vývoj pevnosti v tahu ohybem v závislosti na čase

Označení směsi	7denní pevnost v tahu ohybem [Mpa]	14denní pevnost v tahu ohybem [Mpa]	28denní pevnost v tahu ohybem [Mpa]
1	6,8	7,3	13,3
2	7,3	7,6	11,4
3	7,1	10,1	13,7

Tab. 3: Průměrné hodnoty pevností v tahu za ohybu viz. Tab. 1

Dle vypočtených hodnot tlakových a tahových pevností lze konstatovat, že se blížíme téměř k hodnotám pevnosti vysokopevnostního betonu (60 MPa v tlaku). Vývoj pevnosti v závislosti na čas se jeví jako standardní, s tím, že u směsí 2 a 3 můžeme pozorovat u pevnosti v tlaku shodný průběh a potom prudký rozdíl ve vývoji – směs 3 dosáhla o cca 20 MPa vyšších hodnot než obě zbylé směsi. Nově navržené směsi č. 2 a 3 vyšli v pevnostních zkouškách lépe než referenční směs č. 1, kromě malého rozdílu u pevnosti v tahu za ohybu, kdy vyšla směs č. 2 o něco hůře než směs 1, ale tento fakt nepovažuji za důležitý.

Označení směsi	$\rho_{v \phi}$ [kg/m ³]
1	1991
2	2038
3	2100

Tab. 4: Průměrné objemové hmotnosti

Dle vypočtených hodnot objemových hmotností lze tento materiál klasifikovat mezi lehké až obyčejné betony. V návaznosti na tabulky 2, 3 a 4 můžeme tvrdit, že pevnost v tlaku a v tahu je u našich vzorků tím větší, čím je větší objemová hmotnost. Tento fakt může být k užitku např. chceme-li vlastní tíhou materiálu zachytit účinky zatížení. Naopak, chceme-li vytvořit lehkou konstrukci, v podobě např. obkladových prvků, je tato vysoká objemová hmotnost nežádoucí. Výpočet objemových hmotností ukázal stejně vzestupné pořadí směsí jako u hodnot pevností.

5.3.2. Termofyzikální veličiny

Měření termofyzikálních veličin v rámci této práce bylo provedeno stacionární metodou hot-disk, která je založena na vysílání tepelného toku do materiálu a v závislosti na odezvě přístroj změří a spočítá hodnoty: součinitele tepelné vodivosti, součinitele teplotní vodivosti a objemové měrné tepelné kapacity. Konkrétně byl použit přístroj ISOMET 2114, který je vybaven vyměnitelnými sondami: jehlovou, pro sypké nebo vláknité materiály a plošnou, pro pevné materiály.

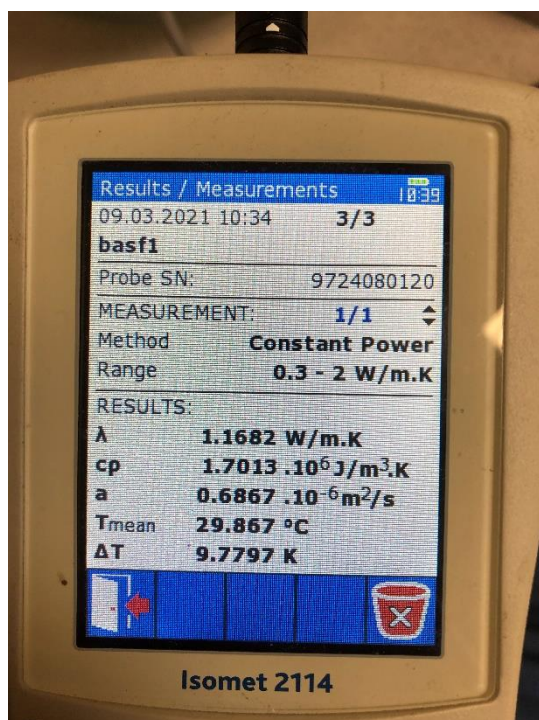
Měření probíhalo na krychlích, o délce hrany 70 mm, pro každý ze vzorků jedno měření. Vzorky se po vysušení na hodnotu ustálené hmotnosti vloží do exsikátoru, na jehož spodní části je silicagel (obr.21), který zajistí stabilní nevlhké prostředí. Samotný průběh měření je takový, že po zapojení celé měřicí sestavy (viz. obr. 22) se nastaví rozpětí měření, dle výsledků, jaké od materiálu očekáváme, poté se přiloží hot-disk na horní stěnu vzorku, nastaví se název a počet měření a tím je příprava hotová. Jedno měření trvalo zhruba 20 minut a jakmile skončilo, výsledky se ukázaly na displeji a uložili se do paměti, z níž je následně pomocí USB možný import.

Measurement Accuracy	Measurement Range	Accuracy
Thermal Conductivity	0.015 .. 0.70 W/m·K	5 % of reading + 0.001 W/m·K
	0.70 .. 6.0 W/m·K	10 % of reading
Volume Heat Capacity	$4.0 \cdot 10^4$.. $3.0 \cdot 10^8$ J/m ³ ·K	15 % of reading + $1 \cdot 10^3$ J/m ³ ·K

Obr. 19: Přesnost přístroje ISOMET 2114 udávaná výrobcem



Obr. 20: Umístění vzorků v exsikátoru



Obr. 21: Ukázka čtení na přístroji



Obr. 22: Měřící sestava při probíhající měření

5.3.2.1. Výsledky měření termofyzikálních vlastností

Měření fyz. vlastností- 5.3. 2021-7denní														
Ozn.	a1 [mm]	a2 [mm]	a3 [mm]	Ø [mm]	b1 [mm]	b2 [mm]	b3 [mm]	Ø [mm]	c1 [mm]	c2 [mm]	c3 [mm]	Ø [mm]	m [g]	V [cm ³]
1.1 BASF	69,9	69,94	69,89	69,910	70,12	70,09	70,08	70,097	70	70,23	69,79	70,007	664,52	343,06
1.2 BASF	70,12	70,06	70	70,060	70,14	69,88	70,34	70,120	69,55	70,02	69,88	69,817	669,28	342,98
1.3 BASF	70,12	70,24	70,17	70,177	70,13	70,04	70,14	70,103	69,55	69,47	69,65	69,557	663,43	342,19
2.1 ST	70,13	70,11	70,14	70,127	69,74	69,86	69,94	69,847	70,41	70,09	70,59	70,363	651,02	344,65
2.2 ST	70,18	70,22	70,2	70,200	70,15	70,2	70,22	70,190	70,89	70,34	70,79	70,673	653,4	348,23
2.3 ST	70,2	70,14	70,21	70,183	70,34	70,14	70,19	70,223	70,33	70,52	70,39	70,413	646,51	347,03
3.1 ST+P	70,86	70,6	70,83	70,763	71,03	71,2	71,08	71,103	70,44	69,77	70,55	70,253	694,76	353,48
3.2 ST+P	70,73	70,77	70,64	70,713	70,91	70,63	70,83	70,790	70,53	70,63	70,38	70,513	695,1	352,98
3.3 ST+P	70,8	71	70,5	70,767	70,97	70,93	70,9	70,933	69,2	69,61	69,26	69,357	674,35	348,15
Fyzikální vlastnosti - 12.3.2021-14denní														
2.1.1. BASF	70,07	70,1	70,07	70,080	70,18	70	70	70,060	69,95	70,76	70,02	70,243	662,31	344,88
2.1.2. BASF	72,38	72,33	72,27	72,327	71,78	71,12	71,23	71,377	71,13	70,73	71,05	70,970	703,01	366,38
2.1.3. BASF	70,13	69,94	69,93	70,000	70,28	70,97	70,41	70,553	71,05	70,39	70,94	70,793	658,51	349,63
2.2.1. ST	70,24	70,17	70,41	70,273	70,16	70,18	70,13	70,157	69,14	68,97	68,98	69,030	640,17	340,33
2.2.2. ST	69,91	70,11	70,25	70,090	69,7	69,8	70,27	69,923	70,1	69,88	70,19	70,057	643,58	343,34
2.2.3. ST	70,18	70,11	70,14	70,143	70,43	70,21	70,15	70,263	70,85	70,29	70,42	70,520	644,88	347,56
2.3.1. ST+P	71,3	70,91	70,9	71,037	70,56	70,74	70,57	70,623	71,08	70,95	71,29	71,107	701,13	356,73
2.3.2. ST+P	70,12	70,13	70,27	70,173	69,68	70,8	69,73	70,070	71,14	71,5	70,98	71,207	681,5	350,13
2.3.3. ST+P	70,8	70,22	70,24	70,420	70,1	69,79	69,9	69,930	71,86	71,41	71,49	71,587	687,66	352,53
Fyzikální vlastnosti-26.3.2021-28denní														
3.1.1. BASF	72,08	71,64	72,06	71,927	71,68	71,63	71,45	71,587	71,66	71,52	71,42	71,533	715,32	368,32
3.1.2. BASF	72,41	72,28	72,37	72,353	71,35	71,22	71,42	71,330	71,02	70,81	70,85	70,893	713,75	365,88
3.1.3. BASF	70,16	70,31	70,02	70,163	70,29	70,1	70,43	70,273	70,06	70,66	69,37	70,030	672,99	345,29
3.2.1. ST	70,94	70,32	70,55	70,603	70	69,97	69,67	69,880	71,12	70,49	70,88	70,830	663,03	349,46
3.2.2. ST	70,94	70,02	70,27	70,410	70,08	70,45	70,29	70,273	71,86	71,9	71,95	71,903	669,18	355,77
3.2.3. ST	70,39	70,11	70,67	70,390	70,16	70,12	70,1	70,127	69,41	69,12	69,63	69,387	651,04	342,51
3.3.1. ST + P	69,87	69,87	69,76	69,833	70,32	70,16	70,06	70,180	70,66	70,27	70,35	70,427	686,97	345,15
3.3.2. ST+P	70,72	70,92	70,69	70,777	71,11	70,8	70,88	70,930	70,24	69,97	70,61	70,273	688,1	352,79
3.3.3. ST+P	70,6	70,87	70,82	70,763	71,51	71,21	71,26	71,327	71,14	70,54	71,48	71,053	702,4	358,63

Tab. 5: Rozměry, hmotnost a objem jednotlivých vzorků

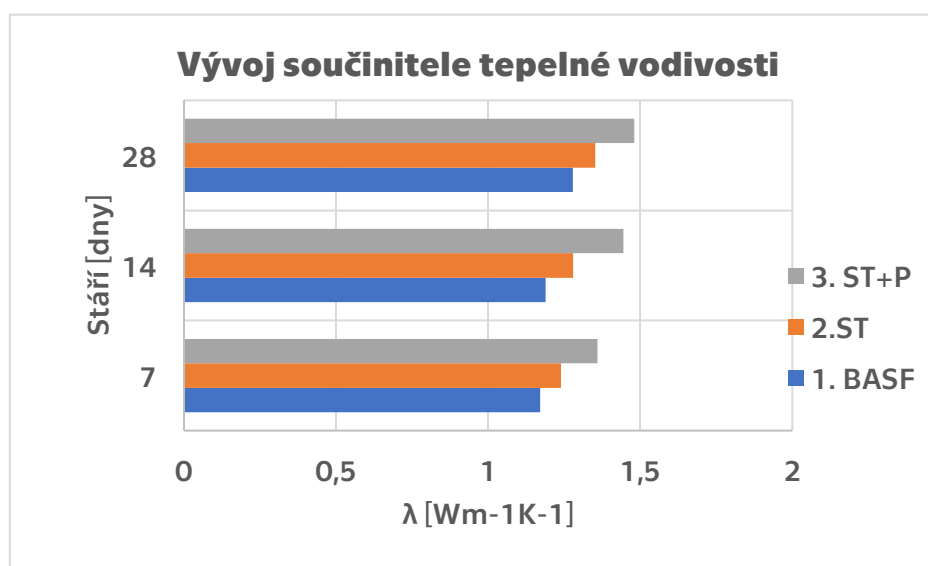
Měření fyz. vlastností- 5.3. 2021-7denní									
Ozn.	ρ_V [g/cm ³]	ρ_V [kg/m ³]	Δ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	c_p [Jm ⁻³ K ⁻¹ x 1E +06]	a [m ² s ⁻¹ x 1E -06]	c_p [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	λ , Δ [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	c_p , Δ [Jkg ⁻¹ K ⁻¹]	a , Δ [m ² s ⁻¹ x 1E -06]
1.1.BASF	1,94	1937	1,1682	1,7013	0,6667	878,3122	1,171	881,010	0,684
1.2.BASF	1,95	1951	1,1611	1,7244	0,6733	883,6928			
1.3. BASF	1,94	1939	1,1839	1,7081	0,6931	881,0252			
2.1.ST	1,89	1889	1,2986	1,6215	0,8009	858,4162	1,240	869,602	0,761
2.2.ST	1,88	1876	1,2786	1,7653	0,7243	940,8217			
2.3.ST	1,86	1863	1,144	1,5082	0,7585	809,5693			
3.1.ST+P	1,97	1965	1,3598	1,7050	0,7976	867,4706	1,359	876,098	0,793
3.2.ST+P	1,97	1969	1,3632	1,6928	0,8053	859,6127			
3.3.ST+P	1,94	1937	1,3551	1,7456	0,7763	901,2114			
Fyzikální vlastnosti - 12.3.2021-14denní									
2.1.1. BASF	1,92	1920,40	1,175	1,7702	0,6638	921,7865	1,189	922,431	0,676
2.1.2. BASF	1,92	1918,81	1,1989	1,7517	0,6844	912,9095			
2.1.3. BASF	1,88	1883,45	1,1943	1,7565	0,6799	932,5964			
2.2.1. ST	1,88	1881,04	1,3157	1,8296	0,7191	972,6536	1,280	948,128	0,722
2.2.2. ST	1,87	1874,45	1,2801	1,7846	0,7255	941,3939			
2.2.3. ST	1,86	1865,46	1,2453	1,7262	0,7214	930,3356			
2.3.1. ST+P	1,97	1965,43	1,4414	1,747	0,8251	888,8643	1,445	914,088	0,809
2.3.2. ST+P	1,95	1946,44	1,4743	1,8249	0,8079	937,5579			
2.3.3. ST+P	1,95	1950,66	1,4178	1,7865	0,7936	915,8428			
Fyzikální vlastnosti-26.3.2021-28denní									
3.1.1. BASF	1,94	1942,09	1,293	1,7450	0,7409	898,5156	1,278	896,849	0,732
3.1.2. BASF	1,95	1950,79	1,2774	1,7288	0,7389	886,2062			
3.1.3. BASF	1,95	1949,05	1,2627	1,7655	0,7152	905,8244			
3.2.1. ST	1,90	1897,31	1,3464	1,795	0,7501	946,0773	1,352	951,952	0,751
3.2.2. ST	1,88	1880,91	1,3606	1,836	0,7411	976,1210			
3.2.3. ST	1,90	1900,80	1,3498	1,7747	0,7606	933,6572			
3.3.1. ST + P	1,99	1990,33	1,5148	1,7285	0,8763	868,4501	1,481	870,856	0,865
3.3.2. ST+P	1,95	1950,48	1,4807	1,7299	0,8559	886,9110			
3.3.3. ST+P	1,96	1958,57	1,4482	1,6789	0,8626	857,2056			

Tab. 6: Objemové hmotnosti a souhrn naměřených termofyzikálních vlastností.

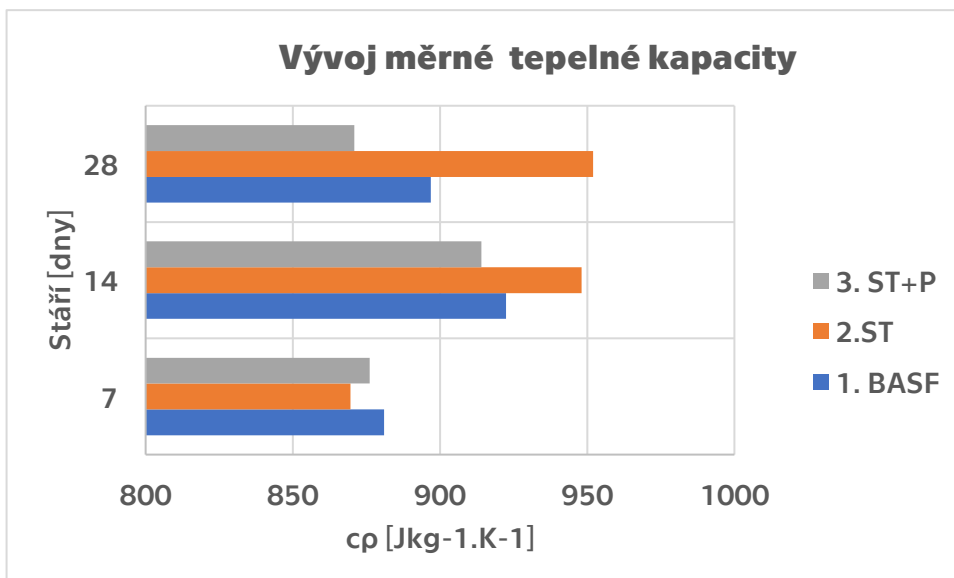
Ozn. směsi	Stáří [dny]	λ, \emptyset [Wm-1K-1]	c_p, \emptyset [Jkg-1.K-1]	a, \emptyset [m2s-1 x 1E -06]
1. BASF	7	1,171	881,01	0,684
	14	1,189	922,431	0,676
	28	1,278	896,849	0,732
2. ST	7	1,24	869,602	0,761
	14	1,28	948,128	0,722
	28	1,352	951,952	0,751
3. ST+P	7	1,359	876,098	0,793
	14	1,445	914,088	0,809
	28	1,481	870,856	0,865

Tab. 7: Naměřené hodnoty termofyzikálních veličin a jejich vývoj v čase ($\div 10\%$)

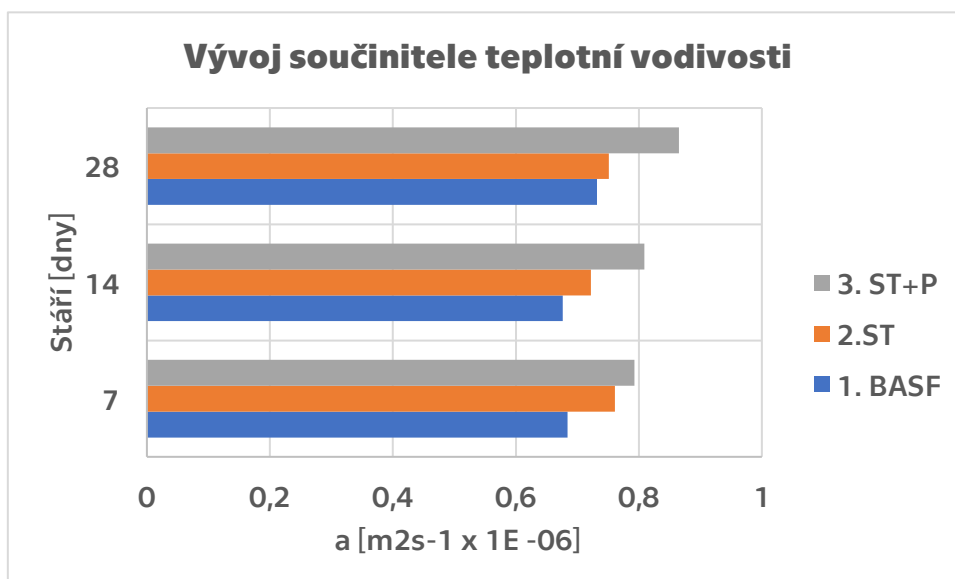
Zatím co pevnostní charakteristiky rostou v závislosti na stáří betonu, u termofyzikálních veličin pozorujeme pouze nepatrný vzrůst naměřených hodnot. Mechanické i fyzikální vlastnosti jsem vždy měřil v rámci jednoho dne. Měření v intervalu 7/14/28 dní bylo provedeno hlavně kvůli měření pevností



Graf 3: Vývoj součinitele tepelné vodivosti v závislosti na stáří vzorku



Graf 4: Vývoj měrné tepelné kapacity v závislosti na stáří vzorků



Graf 5: Vývoj součinitele teplotní vodivosti v závislosti na stáří vzorků

Šíření tepla materiálem a veličiny s ním související jsou závislé především na:

- Pórovitosti materiálu
- Struktury
- Teplotě a vlhkosti
- Typu (kov/nekov)

Co se týče hodnot součinitele tepelné vodivosti, můžeme všechny zkoumané kompozity zařadit do skupiny materiálů s běžnými tepelně izolačními vlastnostmi, ovšem hodnoty po 28 dnech se již blíží spíše k hutným anorganickým materiálům. U navrhování prvků oddělujících prostředí s rozdílnými teplotami, vlhkostmi a tlakovými poměry, musíme brát v potaz fakt, že tyto naměřené hodnoty jsou určeny pro vysušený materiál. Při aplikaci materiálu např. jako obkladového prvku musíme uvažovat s hodnotou praktické vlhkosti, dle umístění. U porézních materiálů dochází při zvýšení teploty k intenzivnějšímu sálení v pórech, což může zapříčinit vzrůst hodnot tepelně-technických a tepelně-fyzikálních vlastností. O tom, která směs vyšla nejlépe se zmiňuji v závěrečné diskusi.

5.3.3. Objemové změny

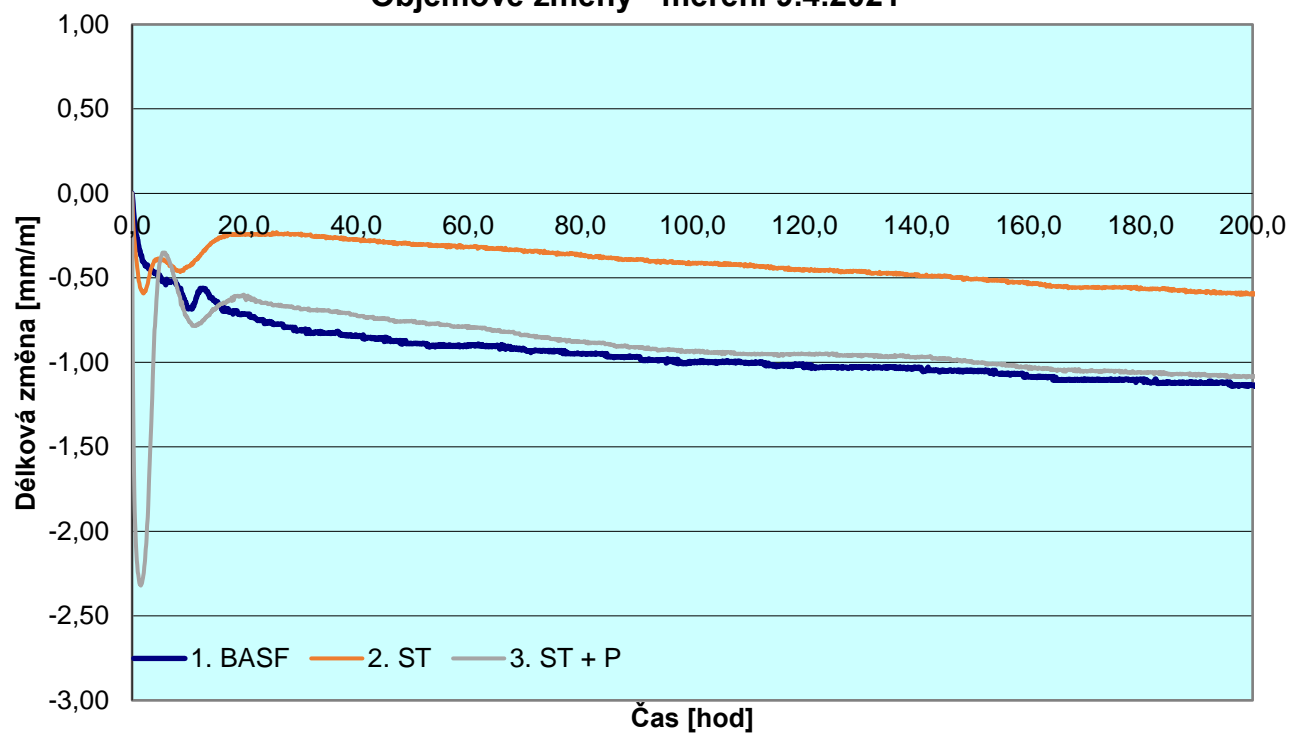
Objemové změny ve fázi tuhnutí jsou negativním jevem, který se snažíme co nejvíce eliminovat. Pro experimentální stanovení objemových změn byla v rámci této práce, použita metoda pružné vlnkové formy popsaná v kapitole 3.1.2. Postup byl takový, že se nejprve vlnkové formy umístěné v úchytné stoličce naplnili připravenými směsí a ručně byly zhuťněny. Vlnovec s čerstvou směsí se na horním povrchu opatří odrazovou ploškou a celá sestava putuje do termostatu, kde je zajištěna stálá teplota prostředí. Snímání odrazu paprsku je kontinuálně pomocí výpočetní techniky zaznamenáváno a poté vyexportováno ve formě textového souboru.



Obr. 23: Umístění vlnoců v termostatu

5.3.3.1. Výsledky objemových změn

Objemové změny - měření 9.4.2021



Graf 6: Objemové změny zkoumaných směsí

5.4. Diskuze nad výsledky

V této kapitole shrnuji výsledky experimentálního zkoušení cementových kompozitů určených pro 3D zpracování. V závislosti na použité technologii, si dovoluji tvrdit, že jak referenční směs **1**, tak směsi **2** a **3** jsou pro 3D zpracování vhodné, a to konkrétně směs **1** je vhodná spíše pro 3D tisk, což dokazuje aplikace při tisku „Prvoka“. Pro sochaření pomocí robotické ruky jsou vhodnější, díky své reologii, směsi **2** a **3**. Klíčovým faktorem, který ovlivňuje reologické vlastnosti směsi je vodní součinitel. U směsi č. **1** byla výrobcem uvedena hodnota vodního součinitele 0,165, přičemž víme, že tato směs byla použita při realizaci prvního 3D tištěného domu v České republice. Při ukládání směsi do bednění byla konzistence směsi značně tuhá, což znesnadňovalo řádné rozmíchání s vodou. Na druhou stranu, jsme vlivem nízkého vodního součinitele docílili konzistence vhodné pro 3D tisk.. U nově navržených směsí č. **2** a **3** bylo hlavním úkolem, pomocí odborného odhadu zvolit vhodnou hodnotu vodního součinitele. Na základě postupného přimíchávání záměsové vody jsme dospěli k závěru, že pro 3D zpracování bude nejvíce přijatelnou hodnotou vodního součinitele 0,183 pro směs **2** a 0,163 pro směs **3**.

Co se týče objemových hmotností, byla referenční směs **1** zjištěna jako „nejlehčí“-s nejmenší objemovou hmotností (1911 kg/m^3). Směs **2** (2038 kg/m^3) a směs **3** (2100 kg/m^3) jsou dle zjištěných hodnot těžší. Směs **1** doporučuji pro 3D tištěné konstrukce. Směsi **2** a **3** jsou těžší, a proto méně vhodné pro nenosné konstrukce, kde při nevyžadování vysoké pevnosti tvoří zbytečnou tíhu konstrukce.

Oproti tomu pevnosti, a to jak v tlaku, tak v tahu ohybem, jsou u směsí tím vyšší, čím vyšší je objemová hmotnost. Tento jev pozorujeme prakticky skoro u všech betonů, s výjimkou betonů vylehčených. Výsledky naměřených hodnot pevností toto pravidlo potvrzují a zjištěné hodnoty se blíží hodnotami k vysokopevnostnímu betonu. Obě nově navržené směsi **2** a **3** vyšly v porovnání s referenční směsí lépe, měli rychlejší nárůst pevnosti (směs **2** a **3** totožný průběh mezi 7. a 14. dnem). U směsí **3** můžeme

pozorovat rapidní vzrůst tlakové pevnosti až na hodnotu 71, 25 MPa, ale ani referenční směs nepovažuji za nejhorší, v porovnání s běžně dostupnými betony je na tom pevnostně mnohem obdobně, ne-li lépe. U pevnosti v tahu za ohybu se u směsi **1** promítla přítomnost mikrovláken, které se při zatěžování, při prvním vzniku mikrotrhlin aktivují a tuto pevnost zvýší. U 28denních pevností v tahu za ohybu byli směs **1** a **3** srovnatelné, nejhůře vyšla směs **2**. Při návrhu nosných konstrukcí jsou pevnosti důležitým vstupním údajem, avšak statické působení 3D tištěných budov může být jiné, z důvodu nepoužití technologie lití do bednění + hutnění.

Objemové změny ve fázi tuhnutí měly u všech směsí obdobný průběh, avšak rozdílné hodnoty. Nejhorší vlastnosti týkající se objemových změn vykazuje směs **3**, směsi **1** a **2** hodnotím v tomto ohledu jako srovnatelné. Je otázkou, co je důležitější parametr, jestli pevnost, nebo trvanlivost. Směs **3** sice vykazuje oproti ostatním směsím nejlepší pevnostní vlastnosti ale objemové změny nejhorší.

Čím nižší hodnota součinitele tepelné vodivosti, tím je materiál lepším izolantem. Naměřené hodnoty se se svou vzestupností shodují s pevnostmi, jinak řečeno, čím pevnější kompozit, tím horší tepelně izolační vlastností. Nejvhodnější pro toto použití je směs **1**. následuje směs **2** a jako nejhorší vyšla směs **3**. Toto vyhodnocení ale není příliš objektivní vzhledem k ustáleným vlhkostním parametrům vzorku (vysušení). Při reálné aplikaci by sehrála velkou roli vlhkost, která tepelnou vodivost zvyšuje.

5.5. Závěr a směřování dalšího výzkumu

Při experimentálním stanovování vybraných fyzikálních a mechanických vlastností jsem došel k následujícímu závěru. Směs označená číslem **1** vykazuje vhodnou reologii pro technologie 3D tisku, což potvrzuje i úspěšný projekt a realizace prvního českého 3D tištěného domu. Tato směs byla vyvinuta jako nesmrštivá hmota určená pro 3D tisk. Směsi **2** a **3** se ještě stále vyvíjí, ale již dnes můžeme konstatovat, že jsou v návaznosti na svou reologii (při vhodné volbě vodního součinitele), vhodné jak pro 3D tisk tak pro modelování pomocí robotické ruky. Nově navržené směsi převyšují

hodnotami tlakové pevnosti směs referenční, avšak za cenu vyšší objemové hmotnosti a horších tepelně izolačních vlastností a u směsi **3** ještě za cenu vyšších objemových změn v raném stádiu. Pevnost v tahu ohybem není až tak důležitý parametr při navrhování a volbě betonových konstrukcí, avšak směs **1** dokázala konkurovat nově navrženým směsem.

Další směřování projektu povede k další optimalizaci cementových směsí, se zaměřením na možnost regulace doby zpracovatelnosti a dalších fyzikálních a mechanických vlastností důležitých pro 3D zpracování.

Seznam použité literatury

- [1] TRI-DUNG, Ngo. Introduction to Composite Materials [online]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/composite-and-nanocomposite-materials-from-knowledge-to-industrial-applications/introduction-to-composite-materials>
- [2] Katedra materiálového inženýrství a chemie, fakulta stavební ČVUT v Praze, Kompozitní materiály. [online] Dostupné z: <http://tpm.fsv.cvut.cz/vyuka/main/MI11>
- [3] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. Úvod do studia materiálů. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická, 2005. ISBN 80-708-0568-4.
- [4] VIMMROVÁ, Alena. Kompozitní materiály ve stavebnictví: O kompozitech obecně a jejich užití ve stavebnictví [online]. Dostupný z: <http://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909>
- [5] DAĐOUREK, Karel. Kompozitní materiály-druhy a jejich užití. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [6] ČSN EN 197-1, ed.2 722101 - Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití.
- [7] Jak se vyrábí cement | CEMEX CZ. *Výrobce a dodavatel stavebních materiálů* [online]. Dostupné z: <https://www.cemex.cz/vyroba-cementu>
- [8] HORSKÝ, Marek, Ivana LUSOVÁ a Peter BRIATKA. Činitele ovlivňující rychlost nárůstu pevnosti betonu I. [online] Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/zaklady-a-hruba-stavba/cement-a-beton/cinitele-ovlivnujici-rychlost-narustu-pevnosti-betonu-i>
- [9] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 375-379, ISBN ISBN978-80-8076-057-1.

- [10] DVOŘÁKOVÁ, Eva a Anna KUKLÍKOVÁ. Kompozitní dřevobetonové konstrukce za požáru [online] Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/pozarni-bezpecnost-staveb/8383-kompozitni-drevobetonove-konstrukce-za-pozaru>
- [11] MAKUL, N. (2021) Introduction to the Principles of Cement and Concrete Composites. In: Principles of Cement and Concrete Composites. Structural Integrity, vol 18. Springer, Cham. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-69602-3_1
- [12] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [13] TIPKA, Martin. Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu [online]. 2011 Dostupné z: people.fsv.cvut.cz/~tipkamar/granty_soubory/SGS_2011/Slozeni_navrh_priprava_HSC_a_UHSC.pdf
- [14] Fakulta dopravní ČVUT v Praze, Betonové konstrukce [online] Dostupné z: http://mech.fd.cvut.cz/members/malinovsky/materialy/Beton_1_prezentace.pdf
- [15] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 226, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1.
- [16] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 459, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1.
- [17] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 460, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1.
- [18] VETCHÝ, Jan. Přísady do betonů a malt I, [online] Dostupné z : <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-i/>
- [19] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro ČKAIT vydalo Informační centrum ČKAIT, 20009. Betonové stavitelství. ISBN 978-80-87093-75-7.

- [20] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 463-465, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1
- [21] VETCHÝ, Jan. Přířady do betonů a malt III, [online] Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>
- [22] VETCHÝ, Jan. Přířady do betonů a malt II, [online] Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-ii/>
- [23] FEYS, Dimitri, Kamal H. KHAYAT a Rami KHATIB. How do concrete rheology, tribology, flow rate and pipe radius influence pumping pressure?. *Cement and Concrete Composites*. Elsevier, 2016, (66), 38-46. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.11.002>
- [24] SUVASH, Chandra Paul a Daniel Tay YI WEI. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction [online]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- [25] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 45-50, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1
- [26,28] Pavlíková, M., Pavlík, Z., Hošek, J.: *Materiálové inženýrství 1*, ČVUT v Praze, 2011, ISBN 978-80-01-04932-7.
- [27,29] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. Praha: Pro ČKAIT vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009. *Betonové stavitelství*, s. 86-87, 67 ISBN 978-80-87093-75-7.
- [30] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [31] LITOŠ, Jiří. *Objemové změny cementových past ve fázi tuhnutí*. V Praze: České vysoké učení technické, 2011. ISBN 978-80-01-04700-2
- [32] Smršťování betonu: e-beton.cz [online]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/pojmy/smrstovani-betonu>
- [33] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přeprac. a dopl. vyd. Bratislava: Jaga, 2007. s. 38, ISBN ISBNISBN978-80-8076-057-1
- [34] Izolace-info.cz. FYZIKÁLNÍ VELIČINY [online]. Dostupné z: <http://www.izolace-info.cz/technicke-informace/fyzikalni-veliciny/?nid=9174-soucinitel-teplotni-vodivosti-fyzikalni-veliciny-u-tepelne-ochranybudov.html#.WRbmWeWGPIU>

- [35] ČSN EN 12390-3. Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví
- [36] Schéma zkoušky krychelné pevnosti betonu v tlaku: Multimediální učební texty předmětu Vodohospodářská zařízení I [online]. Dostupné z: <http://hgf10.vsb.cz/546/VHZ1/vyuka/hmoty/vlastnosti.html>
- [37] Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Obrázek - Pevnost v tahu ohybem [online]. Dostupné z: http://ufmi.ft.utb.cz/texty/kzm/KZM_09.pdf
- [38] KOVAŘÍK, Michal, Pavel SVOBODA a Petr ŠTEMBERK. BETON- technologie, konstrukce, sanace 02/2018: PŘEHLED DOSTUPNÝCH TECHNOLOGIÍ 3D TISKU Z CEMENTOVÝCH MALT, 3-13.
- [39] Shadow Robot Company: Shadow Dexterous Hand. [online] Dostupné z: <http://www.shadowrobot.com/products/dexterous-hand/>
- [40] Actuonix Motion Devices Inc.: Miniature Linear Motion Series PQ12. [online] Dostupné z: <https://s3.amazonaws.com/actuonix/Actuonix+PQ12+Datasheet.pdf>
- [41] Doležal F 2018 Robotická ruka s modelářskými servy. In: *Ústav počítačové grafiky a multimédií*, (Brno: VUT v Brně) s. 66
- [42] TUNELBLANKA-INFO. Výtvarník a robot proměnili výdech v umělecké dílo [online]. Dostupné z: <https://www.tunnelblanka.info/vytvarnik-a-robot-promenili-vydech-v-umelecke-dilo/>
- [43] K.N. Jha, Formwork for Concrete Structures, Tata McGraw Hill Education Private Limited, New Dilhi, India, 2012, ISBN 978-1- 25-900733-0
- [44,48] ASPRONE, Domenico, Ferdinando AURICCHIO, Costantino MENNA a Valentina MERCURI. 3D printing of reinforced concrete elements: Technology and design approach. *Construction and Building Materials*. 2018, 165, 218-231. [online]. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095006181830018>
- [45] What is additive manufacturing? Applications, technologies and benefits: Difference between subtractive and additive manufacturing [online]. Dostupné z: <https://bitfab.io/blog/additive-manufacturing/>

- [46] PAUL, Suvash Chandra, Yi Wei Daniel TAY, Biranchi PANDA a Ming Jen TAN. Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. Archives of Civil and Mechanical Engineering. Elsevier, 2018(18), 311-319. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- [47] V.N. Nerella, M. Krause, M. Näther, V. Mechtcherine, Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete onsite 3D Printing technology (CONPrint3D), in: Proceeding for the 25th Conference on Rheology of Building Materials, Regensburg, Germany, 2016
- [49] CHENIUNTAI, Nikita. Construction 3D printing to create an inhabited environment on Mars. In: Medium [online]. 2.5.2018 Dostupné z: https://medium.com/@Nik_chen/construction-3d-printing-to-create-an-inhabitedenvironment-on-mars-f64d3527ddd1
- [50] Netherlands to build world's first habitable 3D printed houses. In: The Guardian [online]. 6.6.2018 Dostupné z: <https://www.theguardian.com/artanddesign/2018/jun/06/netherlands-to-buildworlds-first-habitable-3d-printed-houses>
- [51] DA SILVA, Wilson Ricardo Leal da Silva. Hands-on 3D Concrete Printing [online]. 2018 Dostupné z: <https://medium.com/@wilsoncv/hands-on-3d-concrete-printing-e71aa2465ef0>
- [52] HOLZMAN, Ondřej. *Prvok se už vznáší na hladině Vltavy. Češi postavili první plovoucí dům z 3D tiskárny na světě* [online].. Dostupné z: <https://www.czechcrunch.cz/2020/08/prvok-se-uz-vznasi-na-hladine-vltavy-cesi-postavili-prvni-plovouci-dum-z-3d-tiskarny-na-svete/>
- [53] RAHUL, A.V., Manu SANTHANAM, Hitesh MEENA a Zimam GHANI. 3D printable concrete: Mixture design and test methods. Cement and Concrete Composites. 2019, 97, 13-23. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2018.12.014. ISSN 09589465. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946518303275>

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Obrázky

- Obr. 1: Porovnání tahových pracovních diagramů křehké keramické matrice a kompozitu z této matrice vyztuženého keramickými vlákny [5]
- Obr. 2: Pohled na strukturu dřevěného kompozitu Parallam [4]
- Obr. 3: Tlakové pevnosti různých tříd cementu [8]
- Obr. 4: Vliv vodního součinitele a způsobu hutnění na velikost tlakové pevnosti [14]
- Obr. 5: Vliv použití superplastifikátoru a snížení množství cementu a vody na vybrané vlastnosti cementové směsi [19]
- Obr. 6: Typy smrštění cementu v různých fázích hydratace [32]
- Obr. 7: Schéma tlakové zkoušky na betonové krychli [36]
- Obr. 8: Vnitřní síly a schéma zatížení pro tříbodový a čtyřbodový ohyb [37]
- Obr. 9: Výdech tunelu Blanka v ulici Nad Královskou oborou obložený obkladovými prvky vyrobenými pomocí robotické ruky [42]
- Obr. 10: Robotická ruka pracující na obkladovém prvku. Návrh obkladových prvků: Frederico Diaz s.r.o. [42]
- Obr. 11: Rozdíl mezi „Subtractive“ (A) a „Additive“ (B) manufacturing [45]
- Obr. 12: Graf vývoje a četnosti použití 3D tisku betonu ve světě [51]
- Obr. 13: První český 3D dům-Prvok umístěný na pontonu na Vltavě. [52]
- Obr. 14: Obr. 14: Proměnlivý průřez u vrstev 3D tisku [53]
- Obr. 15: Vybetonované vzorky před odbedněním
- Obr. 16: Vzorky po odbednění
- Obr. 17 a), b): Rozdílné porušení vzorků při tlakové zkoušce
- Obr. 18: Porušení vzorku po zkoušce v tahu ohybem
- Obr. 19: Přesnost přístroje ISOMET 2114 udávaná výrobcem
- Obr. 20: Vzorky umístěné v exsikátoru
- Obr. 21: Ukázka čtení na přístroji ISOMET 2114
- Obr. 22: Měřicí sestava při probíhajícím měření
- Obr. 23: Umístění vlnovců v termostatu

Tabulky

Tab. 1: Objemové hmotnosti a pevnosti v tlaku a v tahu

Tab. 2: Průměrné hodnoty tlakových pevností

Tab. 3: Průměrné hodnoty pevností v tahu za ohybu

Tab. 4: Průměrné objemové hmotnosti

Tab.5: Rozměry, hmotnost a objem jednotlivých vzorků

Tab. 6: Objemové hmotnosti a souhrn naměřených termofyzikálních vlastností.

Tab. 7: Naměřené hodnoty termofyzikálních veličin a jejich vývoj v čase (\div 10 %)

Grafy

Graf 1: Vývoj pevnosti v tlaku v závislosti na čase

Graf 2: Vývoj pevnosti v tahu ohybem v závislosti na čase

Graf 3: Vývoj součinitele tepelné vodivosti v závislosti na stáří vzorku

Graf 4: Vývoj měrné tepelné kapacity v závislosti na stáří vzorku

Graf5: Vývoj součinitele teplotní vodivosti v závislosti na stáří vzorku

Graf 6: Objemové změny směsí