

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ  
FAKULTA STAVEBNÍ  
Experimentální centrum**



**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Zpracování cementových kompozitů  
za různých technologických podmínek**

**David Jegijan**

**2018**

**Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.**

**Prohlašuji, že jsem předkládanou bakalářskou práci vypracoval samostatně  
pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu citované literatury.**

**V Praze 23. května 2018**

.....  
**David Jegijan**



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: DAVID Jméno: JEGIJAN Osobní číslo: 396247  
Zadávající katedra: EXPERIMENTÁLNÍ CENTRUM  
Studijní program: STAVITELSTVÍ  
Studijní obor: REALIZACE POZEMNÍCH A INŽENÝRSKÝCH STAVEB

### II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: ZPRACOVÁNÍ SPECIÁLNÍCH CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ ZA RŮZNÝCH TECHNOLOGICKÝCH PODMÍNEK

Název bakalářské práce anglicky: PROCESSING OF SPECIAL CEMENT COMPOSITES UNDER VARIOUS TECHNOLOGICAL CONDITIONS

Pokyny pro vypracování:

Zpracování rešerše se zaměřením na využití zkoumané směsi pro 3D tisk betonu a robotické sochaření. Příprava experimentálního programu. Výroba zkušebních vzorků vytvářených za speciálních podmínek a následné provedení mechanických zkoušek. Zpracování a vyhodnocení výsledků a jejich diskuze.

Seznam doporučené literatury:

M. Boháč et al., Influence of temperature on early hydration of Portland cement-metakaolin-slag systém, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry 127 (2017) 309-318

M.S. Morsy, Effect of temperature on hydration kinetics and stability of hydration phases of metakaolin-lime sludge-silica fume system, Ceramics - Silikaty 49 (2005) 237-241

Zdroje: sciencedirect.com, scholar.google.cz, concrete.org (vyžaduje registraci)

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

Datum zadání bakalářské práce: 21.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018

Údaj uvedte 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“.*

21.2.2018

Datum převzetí zadání

  
Podpis studenta(ky)

## Abstrakt

Tato práce se věnuje zpracování cementových kompozitů za různých technologických podmínek a jeho plánovaným využitím, např. pro robotické sochaření a 3D tisk.

V první části této práce jsem se zaměřil na základní otázku „co to vlastně cementový kompozit je?“, popsal jsem historii cementu, jeho složení a podrobněji jsem se věnoval základním složkám cementového kompozitu. Dále byly popsány základní vlastnosti a charakteristiky, které jsou klíčové pro jeho další využití. V neposlední řadě jsem se věnoval konkrétnímu využití cementových kompozitů pro robotické sochaření a 3D tisk.

Druhá, praktická část této práce se zabývá vlastnostmi cementového kompozitu za působení vysokých teplot. Vlastnosti budou demonstrovány na řadě zkoušek, jež byly v rámci této práce provedeny a vyhodnoceny.

## Abstract

This thesis is dealing with the processing of cement composites under different technological conditions and its planned use, for example for robotic sculpting and 3D printing.

In the first part of this paper I'm focusing on the basic question "what exactly the cement composite is?" and on describing the history and composition of cement. Also, I went more into detail on the basic components of cement composites. Furthermore, I described the basic features and characteristics that are key to its further use. Last but not least, I focused on specific uses of cement composites for robotic sculpting and 3D printing.

The second, practical part, is looking into the characteristics of cement composites for use in the above mentioned robotic sculpture and 3D printing. The characteristics will be demonstrated on a number of tests that have been performed and evaluated for this thesis purposes.

## Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. za odborné vedení, ochotu a mnoho neocenitelných rad, postřehů a informací, které mi pomohly při tvorbě této Bakalářské práce.

Dále bych rád poděkoval panu doc. Ing. Karlu Kolářovi, CSc. za pomoc při práci s cementovým kompozitem, neocenitelné rady a informace o cementech obecně.

## Obsah

Úvod .....	10
1 Teoretická část .....	11
1.1 Kompozitní materiál .....	11
1.1.1 Základní Charakteristika.....	11
1.1.2 Vlastnosti kompozitních materiálů .....	11
1.1.3 Matrice v kompozitech .....	12
1.1.4 Výztuž v kompozitech .....	13
1.1.5 Využití kompozitních materiálů ve stavebnictví .....	13
1.2 Cementový kompozitní materiál .....	15
1.2.1 Cement.....	15
1.2.2 Voda .....	18
1.2.3 Kamenivo .....	19
1.2.4 Přísady.....	21
1.2.5 Příměsi .....	24
1.3 Hydratace cementu .....	26
1.4 Zkoušky čerstvého cementového kompozitu.....	27
1.4.1 Zkouška sednutím .....	27
1.4.2 Zkouška VeBe .....	28
1.4.3 Zkouška rozlitím .....	29
1.4.4 Stanovení dob tuhnutí .....	30
1.5 Zkoušky zatvrdlého cementového kompozitu .....	32
1.5.1 Destruktivní zkouška pevnosti v tlaku. ....	32
1.5.2 Nedestruktivní zkouška pevnosti v tlaku: Schmidtovo kladívko..	33
1.5.3 Nedestruktivní zkouška ultrazvukem.....	33

1.5.4	Zkouška pevnosti v prostém tahu.....	34
1.5.5	Zkouška pevnosti v příčném tahu .....	34
1.5.6	Zkouška pevnosti v tahu ohybem .....	34
1.6	Sochařství .....	36
1.6.1	Tradiční sochaření.....	36
1.6.2	Sochaření z cementových kompozitů .....	37
1.6.3	Probarvení soch z cementových kompozitů .....	39
1.6.4	Moderní metody cementového sochařství .....	39
1.7	3D tisk.....	42
2	Praktická část .....	43
2.1	Cíle praktické části.....	43
2.2	Popis zkoumané směsi .....	44
2.3	Základní přehled .....	45
2.4	Výroba vzorků.....	46
2.5	Referenční vzorek A – 20 °C .....	51
2.5.1	Zkouška pevnosti v Tahu ohybem.....	51
2.5.2	Zkouška pevnosti v tlaku.....	53
2.5.3	Stanovení doby tuhnutí .....	54
2.5.4	Zkouška dynamického modulu pružnosti .....	58
2.6	Zkoušky při účinku vysokých teplot: Vzorek „C“ a „D“.....	62
2.6.1	Zkoušky pevnosti v Tahu ohybem.....	62
2.6.2	Zkoušky pevnosti v tlaku .....	63
2.6.3	Stanovení doby tuhnutí .....	64
2.6.4	Zkouška dynamického modulu pružnosti .....	66
2.7	Diskuze výsledků.....	69



Závěr .....	73
Seznam použité literatury .....	74

## Úvod

V této práci se zaměřuji na zpracování cementových kompozitů za různých technologických podmínek, přesněji řečeno vlivu vysokých teplot na zpracování a výsledné vlastnosti cementového kompozitu.

Toto téma jsem si vybral, protože se si myslím, že vliv teplot na nejen cementové kompozity je významným prvkem, který má vliv na výsledné vlastnosti. Dále mi přijde, že by se v určitém směru daly požadované vlastnosti betonu, hlavně v oblasti zpracovatelnosti, elegantně řešit právě změnami teplot a chtěl jsem se na řešení této teze aktivně podílet. Také mě zaujalo možné využití těchto poznatků v robotickém sochaření a hlavně 3D tisku, což je podle mě budoucnost stavebnictví.

V teoretické části se nejprve zaměřuji na základní popis cementového kompozitu a popisuji význam synergického efektu, což je alfa a omegou toho, proč jsou kompozitní materiály tak hojně využívány ve stavebnictví. Dále popisuji složky cementů, betonů včetně jejich funkce ve směsi. Další věcí, kterou je potřeba objasnit jsou zkoušky čerstvé a zatvrdlé cementové směsi. Tyto zkoušky jsem podrobně popsal, jelikož jsou využívány v praktické části této práce. Na závěr teoretické části jsem zmínil technologii a využití cementových kompozitů v oblasti robotického sochaření a 3D tisku.

V praktické části zkoumám konkrétní vlastnosti cementového kompozitu, jako jsou: Pevnost v tlaku, tahu, dobu tuhnutí a dynamický modul pružnosti za účinku vysokých teplot. Pro každou zkoušku bylo vyhotoveno několik zkušebních vzorků, které jsem vystavil na dobu 24 h. zvolené teplotě. (20, 30, 55 °C). Výsledky zkoušek jsem vzájemně porovnal a následně vyhodnotil.

Cílem práce je zjistit, jaký je vliv zvýšených teplot na vlastnosti zkoumané směsi (pevnost v tlaku, tahu, dynamický modul pružnosti a doba tuhnutí) a zdali je zkoumaná cementová směs vhodná pro využití v robotickém sochaření a 3D tisku.

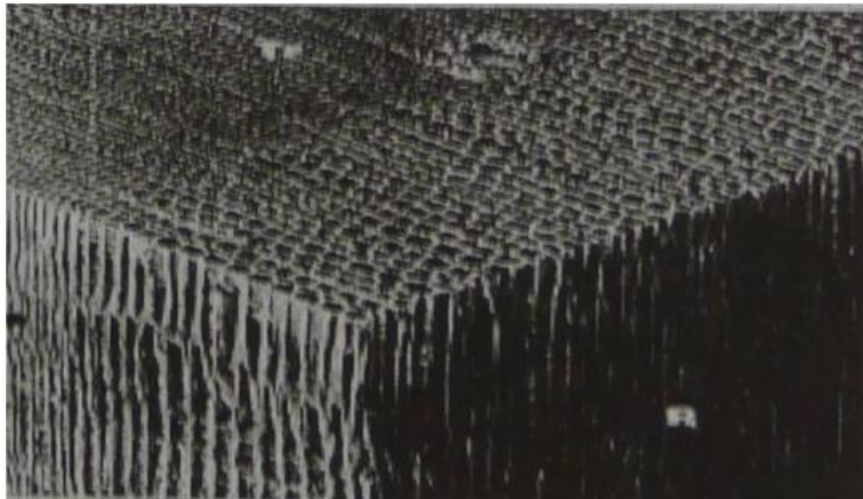
# 1 Teoretická část

## 1.1 Kompozitní materiál

### 1.1.1 Základní Charakteristika

Kompozitní materiál je heterogenní materiál skládající se ze dvou nebo více fází, u kterých jsou nehomogenity v rozměrech větších, než atomárních.

Složky v kompozitním materiálu si zachovávají svou identitu, což znamená, že se nerozpouštějí, avšak na venek se jeví a na své okolí působí v součinnosti (jako homogenní materiál).



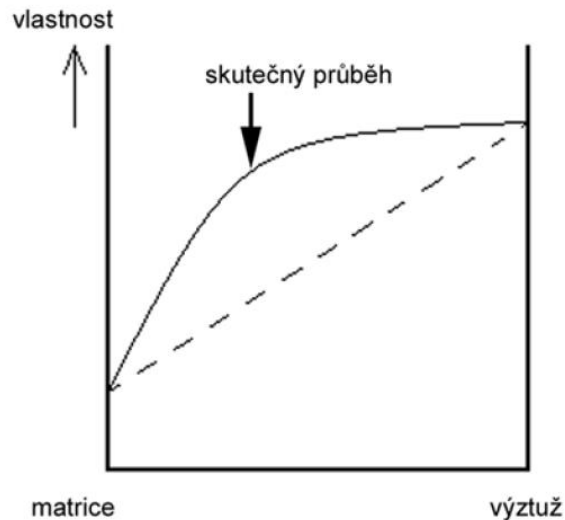
*Obr. 1.1 Příklad kompozitní struktury – Mikrostruktura dřeva. [1]*

Obecně se dá říct, že kompozitní materiál se skládá ze dvou fází. První fáze se nazývá matrice, což je fáze spojitá. Druhá fáze je nespojitá a nazývá se výztuž. Výztuž má obvykle lepší mechanické vlastnosti než matrice a slouží tudíž pro vylepšení mechanických vlastností kompozitu jako je pevnost, tvrdost, modul pružnosti aj. [1]

### 1.1.2 Vlastnosti kompozitních materiálů

Nejvýznamnější vliv na vlastnosti kompozitních materiálů má existence synergického (spolupracujícího) efektu. Synergický efekt u kompozitních materiálů je efekt, díky kterému je u celku dosahováno vlastností, které nejenom nemají jednotlivé složky, ale ani ho nelze dosáhnout jejich sumací. [1]

Obecně se tudíž snažíme navrhnout složení a připravit kompozitní materiál tak, aby bylo dosaženo co největšího synergického efektu, a to samozřejmě u těch vlastností, které jsou u daného kompozitu žádoucí.



Obr. 1.2 Synergický efekt v kompozitním materiálu. [26]

### 1.1.3 Matrice v kompozitech

Matrice v kompozitech má funkci pojiva, což znamená, že má za úkol pojit vyztužovací fázi a chránit jí před vnějšími vlivy. Bývá vyztužována vlákny, které se díky malým průřezům vkládají přímo do matrice, čímž zlepšují její mechanické vlastnosti.

V současné době se matrice dělí hlavně dle materiálu vyztužujících vláken na:

**Polymerní matrice**, konkrétně reaktoplasty a termoplasty, které zlepšují hlavně chemickou odolnost, nehořlavost a tepelnou odolnost matrice. [1]

**Kovové matrice**, kde je nejpoužívanějším materiálem hliník a jeho slitiny. Tyto matrice dosahují oproti polymerním maticím výborných výsledků hlavně v požární odolnosti a tvárnosti. [1]

**Keramické matrice**, kde je nejpoužívanějším materiálem křemík, sklo a hořčík. Tyto matrice dosahují výborných pevností i při vysokých teplotách. Mají značnou odolnost proti karbonataci, avšak nevýhodou je poměrně značná křehkost. [1]

#### 1.1.4 Výztuž v kompozitech

Mechanismus kompozitních materiálů a výsledné vlastnosti, jsou výrazně závislé nejenom na materiálu výztuže ale taktéž na geometrii vyztužení a velikosti vyztužujících fází. Dle velikosti rozdělujeme vyztužující fáze na makro, mikro a nanokompozity.

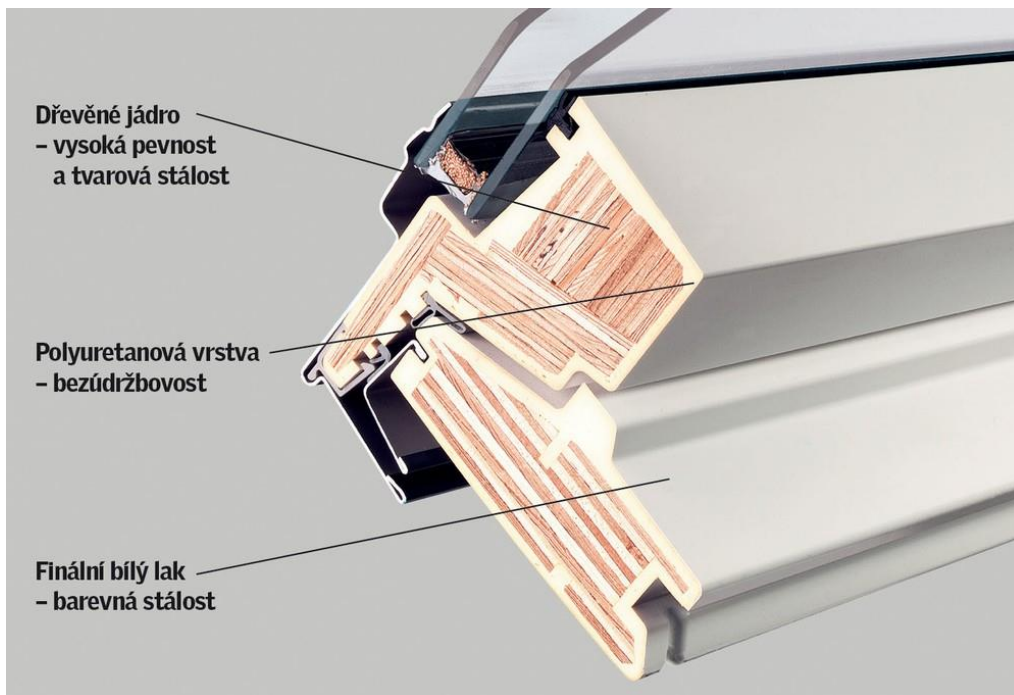
Další faktor, který ovlivňuje vlastnosti kompozitu, je tvar výztuže. Jsou to například vyztužující fáze částicové, které mají oproti ostatním tvarům výhodu ve výrazném zlepšení mechanických vlastností (elektrická a tepelná vodivost), avšak nevýhodou je jejich minimální podíl na přenosu zatížení.

Další jsou například vyztužující fáze vláknité, které mají naopak výrazný podíl na přenosu zatížení, nicméně je zde potřeba hlídat orientaci vláken, a to z důvodu jejich malé pevnosti ve směru kolmém k vláknům. Z tohoto důvodu se nejčastěji používají více vrstvé kompozity se střídavou orientací vláken v jednotlivých vrstvách. [2]

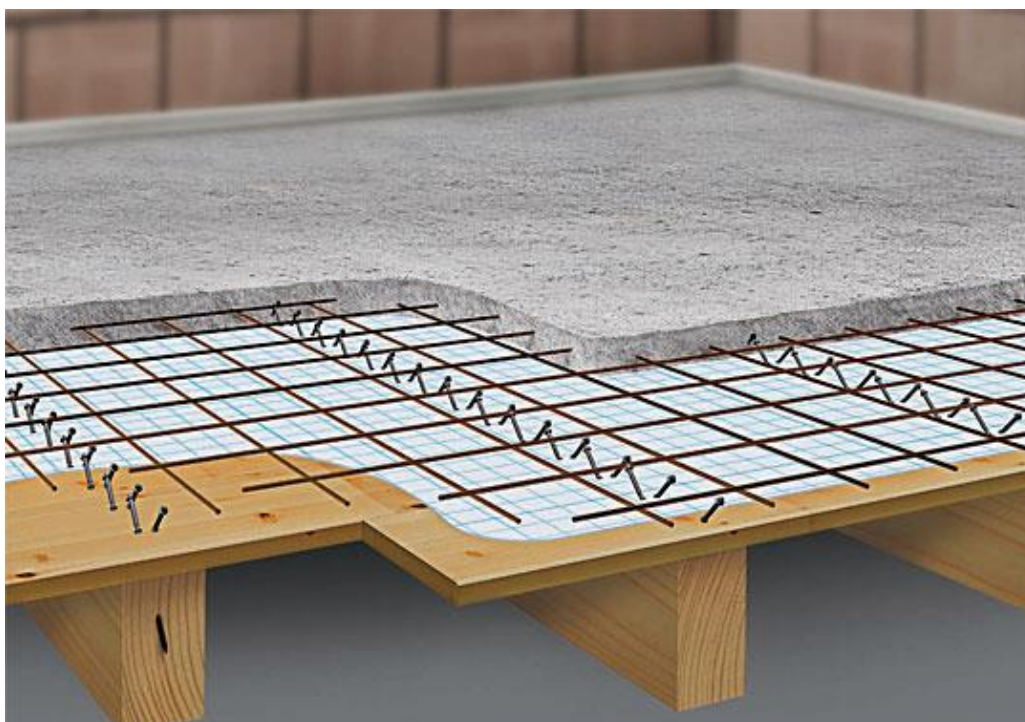
#### 1.1.5 Využití kompozitních materiálů ve stavebnictví

Výše jsme si popsali základní rozdělení, charakteristiky a princip kompozitních materiálů pro lepší pochopení jejich využívání a výhod ve stavebnictví. Kompozitní materiály se ve stavebnictví používají ve velké míře, a to ne jenom v oblasti prvků na bázi cementu, ale také v oblasti dřevěných prvků, kompozitních oken (např. okna s dřevěným jádrem a polyuretanovou vrstvou) aj.

Nicméně typickým kompozitním prvkem ve stavebnictví je železobeton. V železobetonu je synergie jednotlivých fází více než zřejmá. Beton zde zastává funkci matrice s výbornou pevností v tlaku, ale špatnou tahovou pevností. Ocelové pruty zde zastávají funkci výztuže a výslednému kompozitu dodávají potřebnou pevnost v tlaku. Výsledkem je heterogenní materiál, který na své okolí působí zcela homogenně s výbornou tlakovou a dostatečnou tahovou pevností. [3]



Obr. 1.3 Kompozitní okno s dřevěným jádrem a polyuretanovou vrstvou. [3]



Obr. 1.4 Tenká ŽB deska spřažená s trémovou dřevěnou kčí. [27]

## 1.2 Cementový kompozitní materiál

### 1.2.1 Cement

Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický prášek, ve kterém po smíchání vodou v poměru standardně okolo 1:3 začne probíhat chemická hydraulická reakce (hydratace).

Vyrábí se společným vypalováním vápence a jílu při teplotách okolo 1450°C. Vzniklý produkt se nazývá slínek, do kterého se následně můžou, dle požadovaných vlastností, přidávat příměsi, které ovlivňují výsledné vlastnosti. Tato směs se následně rozemílá a vzniká šedý prášek – Cement.

Takto vzniklý prášek nám tvoří hydraulickou (pojivou) složku, ze které po přidání vody a kameniva vzniká beton, který se následně díky stejnému součiniteli tepelné roztažnosti s ocelí, může ocelí vyztužovat a výsledný produkt se nazývá železobeton.



*Obr. 1.5 Rozemletý slínek se svým typicky šedým zbarvením. [28]*

#### 1.2.1.1 Vývoj cementu

První forma cementu se začala využívat již ve starém Římě, kde se jednalo o spojování lomového kamene pomocí páleného vápna obsahující jílové proplástky a později i směs vápna a sopečného popelu, čímž vznikla hydraulická směs tuhnoucí

pod vodou (hydraulický cement) dosahující úžasných pevností. Výraznější zlom přišel až v 18. století, kdy byl objeven a popsán význam jílu na hydraulické vlastnosti a stanoven poměr směsí: 70-75% vápence a 25-30% jílu. Další významný milník ve vývoji cementu byl rok 1824, kdy J. Aspdin zavedl postup vypalování umělé směsi vápence a jílu a tento výsledný produkt byl nazván Portlandským Cementem.

Dále byly koncem 19. století objeveny latentní hydraulické vlastnosti vysokopecní strusky. Tento poznatek byl podnětem k zavedení výroby struskoportlandských cementů (do 30 % strusky) a vysokopecních cementů (více než 70 % strusky), čímž byl položen základ pro pojiva lépe odolávajícím agresivním prostředím. [4]

### 1.2.1.2 Složení cementu

#### a) Chemické složení cementů

Cement je směsí sloučenin, obsahující ve větších množstvích zpravidla oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý, oxid železitý a oxid hořečnatý.

Chlazením a pálením slínku vznikají 4 základní minerály, tzv. Mineralogické (petrografické) složky. Tyto 4 základní minerály jsou:

-TRIKALCIUMSILIKÁT                      Mezinárodně označovaní jako C3S – Alit. Rychle se slučuje s vodou, při hydrataci dává velké množství tepla a pomáhá ke vzniku velmi pevných produktů.

-DIKALCIUMSILIKÁT                      Mezinárodně označovaný jako C2S – Belit. Vyznačuje se pomalou hydratací (malé hydratační teplo) a stejně jako alit pomáhá ke vzniku pevných produktů.

-TETRAKALCIUMALUMINÁTFERIT      Mezinárodně označovaný jako C4AF – Celit. Přispívá k dlouhodobému nárůstu pevností a zajišťuje objemovou stálost cementu.

-TRIKALCIUMALUMINÁT                      Mezinárodně označovaný jako C3A. Vyznačuje se velice prudkou hydratací, avšak dosahuje malých pevností. [5]



## b) Složky cementů

**Portlandský slínek (K)** je hydraulická látka, skládající se ze 2/3 ze silikátů vápenatých, alitu a belitu a z 1/3 z oxidu hlinitého a železného.

**Granulovaná vysokopecní struska (S)** je latentní hydraulická látka, jejíž výborné hydraulické vlastnosti jsou vyvolány při hydrataci. Vzniká ochlazením struskové taveniny při tavení železné rudy ve vysokých pecích a skládá se ze 2/3 z oxidu vápenatého, křemičitého a horečnatého a z 1/3 z převážně oxidu hlinitého.

**Pucolán (P, Q)** po smíchání s vodou je samostatně netvrdnoucí a však reaguje za přítomnosti vody s hydroxidem vápenatým za pomoci tvorby vápenných silikátů a aluminátů, které již jsou nositeli narůstající pevnosti. Rozlišujeme dvě základní formy pucolánů, a to jsou pucolány přírodní (P) a průmyslové (Q).

**Křemičitý popílek (V)** je jemně mletý prášek z kulovitých sklovitých částic. Skládá se z aktivního oxidu křemičitého a hlinitého a je zde velice důležité sledovat hmotnostní podíl  $\text{SiO}_2$  (max 25%).

**Vápenatý popílek (W)** je jemně mletý prášek s hydraulickými nebo pucolánovými vlastnostmi. Skládá se z aktivního oxidu vápenatého a křemičitého a dále z oxidu hlinitého.

**Kalcinovaná břidlice (T)** dle složení přírodního materiálu a výrobního postupu obsahuje slínkové fáze, hlavně dikalciumsilikát a monokalcium aluminát. Dále obsahuje malé množství oxidu vápenatého a křemičitého.

**Křemičitý úlet (D)** je tvořen jemnými kulovitými částicemi s obsahem oxidu křemičitého (více než 85% hmotnostních).

**Vápenec (L)** je tvořen z uhličitanu vápenatého (min 75 % hmotnostních), jílovitých a organických složek. [5]

### 1.2.1.3 Druhy cementů

Dle složení nám EN zatřídí cementy do 5 různých skupin pro obecné použití.

CEM I – cement portlandský, CEM II – cement portlandský směsný, CEM III – cement vysokopecní, CEM IV – cement pucolánový, CEM – cement směsný. [6]

### 1.2.2 Voda

Voda je jednou z hlavních složek, která umožňuje hydrataci cementu a krystalizaci nových produktů, čímž se vytváří pevné vazby mezi jednotlivými zrny kameniva. Do směsi se dává zpravidla větší množství vody, než které je potřeba na krystalizaci, a to z důvodu snadné zpracovatelnosti směsi. [7]

Voda se rozděluje na vodu záměsovou a ošetřovací.

Záměsová voda je taková voda, která se používá pro přípravu betonové směsi a jsou na ní kladeny speciální požadavky dle ČSN EN 1008 – Záměsová voda do betonu. V principu jde o to, že záměsová voda musí být čistá, bez chemických přísad, ale zároveň není vhodná hladová voda, která může absorbovat minerály ze směsi a výrazně nám tím ovlivnit výsledné vlastnosti. Část záměsové vody využitá na hydrataci se nazývá hydratační voda a část zlepšující zpracovatelnost se nazývá reologická. [8]

Vhodná je například voda pitná. K zjišťování kvality vody se používají tzv. informativní zkoušky (vzhled, zápach, PH, kyselost).

Ošetřovací voda musí být taktéž čistá, bez chemických přísad a slouží nám k ošetřování betonu.

vlastnost	požadavek	ověření
oleje a tuky	ne více než viditelné stopy	vizuálně, po 2 minutách
čisticí prostředky	jakákoli pěna zmizí do 2 min.	protřepáním 80 ml vody
barva	bleděžlutá nebo světlejší	vizuálně ve válci
rozptýlené látky	usazenina $\leq 4$ ml	80 ml vody odstavené po 30 minut
zápach	bez zápachu nebo jako pitná voda	čichem, zda zápach je jiný než pro pitnou vodu;
kyselost	pH $\geq 4$	indikátorovým papírkem, pH metrem
humusovité látky	barva jako světle žlutá nebo světlejší po přidání NaOH	5 ml vody a 5 ml 3% NaOH protřepat, 1 hodinu stát a vizuálně posoudit

Obr. 1.6 Hodnocení záměsové vody. [9]

### **Vodní součinitel ( $w$ )**

Jedná se o hmotnostní poměr vody ( $v$ ) a cementu ( $c$ ) v čerstvé betonové směsi,  $w = v/c$ . Tímto vztahem definujeme tzv. vodní součinitel, který se standardně pohybuje v rozmezí 0.3 - 0.5. Obecně se dá říct, že čím je vodní součinitel nižší, tím má výsledná směs lepší mechanické vlastnosti a trvanlivost, ale horší zpracovatelnost.

### 1.2.3 Kamenivo

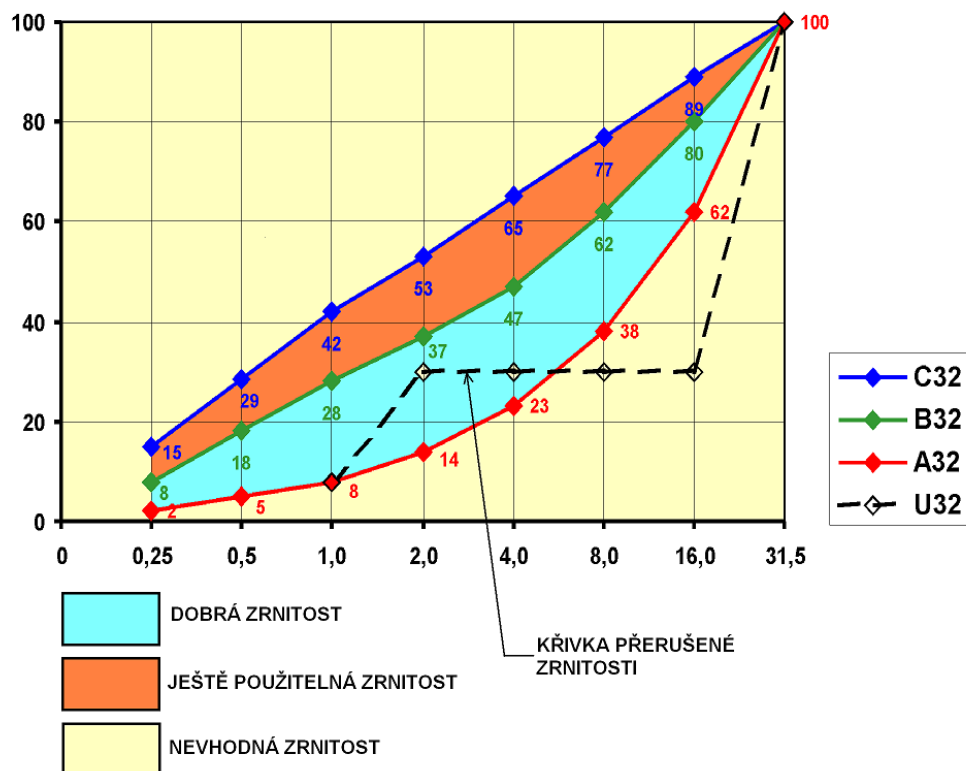
Jedná se o inertní (netečný) sypký materiál, jako např. písek, štěrk, drcený kámen, který je společně s cementem a vodou hlavní a nezbytnou složkou pro výrobu betonu. Kamenivo tvoří ve směsi až 80 % hmotnostních a je tudíž její významnou složkou, která nám přímo ovlivňuje výslední vlastnosti jako např. objemovou stálost, trvanlivost a v neposlední řadě i pevnost.

Při výběru kameniva se klade důraz na základní charakteristiky kameniva, jako je jeho druh, zrnitost, maximální velikost zrna, obsah jemných částic, tvar zrna a další specifické vlastnosti (mrazuvzdornost, odolnost proti obrusu aj.). [9]

znak	rozdělení	příklad
objemová hmotnost	lehké (pórovité) do 2000 kg.m <sup>-3</sup> hutné (2000 až 3000 kg.m <sup>-3</sup> ) těžké nad 3000 kg.m <sup>-3</sup>	Liapor, experlit aj. magnetit aj.
původ	těžené nebo drcené přírodní nebo umělé	
velikost zrn	jemné do 0,25 mm drobné od 0 do 4 mm hrubé od 4 do 63 mm  směs kameniva	moučka, filer, příměs písek (0/4) drť, štěrk (4/8, 8/16, 32/63) štěrkopísek, štěr- kodrť (0/16, 0/32)
frakce (dolní a horní velikost síta d/D)	úzká (mezi po sobě jdoucími síty) široká	2/4, 4/8, 8/16, 16/32 4/11, 8/32

Obr. 1.7 Základní rozdělení kameniva. [9]

Nicméně, základním charakterem kameniva je jeho zrnitost, jež kamenivo dělí na jemné, drobné, hrubé a směs kameniva a je vyjádřena Fullerovou křivkou zrnitosti, která graficky zobrazuje jednotlivé zastoupení frakcí ve vzorku kameniva.



Obr. 1.8 Ideální křivka zrnitosti. [9]

#### 1.2.4 Přísady

Jsou to chemické látky, které mají za úkol úpravu vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. Dávkují se ve velmi malém množství, řádově v procentech hmotnosti cementu.

Dle funkce rozeznáváme tyto druhy [9]:

- Plastifikátory, superplastifikátory
- Zpomalovače tuhnutí, tvrdnutí
- Urychlovače tuhnutí, tvrdnutí
- Provzdušňující přísady
- Inhibitory koroze
- Zpěňující přísady
- Stabilizační přísady
- Jiné

##### **Plastifikátory, superplastifikátory**

Zlepšují zpracovatelnost čerstvé betonové směsi a snižují potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti. Tímto dochází ke snížení vodního součinitele betonu pod hodnotu 0,3 a nárůstu pevnosti ztvrdlého betonu.

Mezi první plastifikační přísady patřily lignosulfonáty, připravené ze sulfitových výluhů po chemickém zpracování dřeva. U nás se používaly už v 50. letech minulého století (plastifikátor S). Jejich nedostatkem byl zbytkový obsah sacharidů. Brzy však přišly na trh další syntetické makromolekulární sloučeniny, a to produkty kondenzace sulfonovaného naftalenu nebo melaminu s formaldehydem. Tyto látky, které redukovaly obsah potřebné směšové vody o přibližně 20 %, odborná veřejnost akceptovala nejdříve s jistou nedůvěrou, neboť pevnosti betonu 20 až 30 MPa se po dlouhá léta považovaly za dostatečné. [9]

Efektivnější přísady nové generace superplastifikátorů na bázi polykarboxylátů nemusí obsahovat sulfoskupinu a umožňují snížit vodní součinitel cementové pasty (w/c) už při obsahu v desetinách procenta pod hodnotu až 0,25 při zachování téměř stejné konzistence (zpracovatelnosti) 45 – 90 minut, díky čemuž je možno připravit hutné, vysokohodnotné betony (high-performance concrete, HPC) s nízkou pórovitostí a pevností větší než 120 MPa a hlavně samozhutňující betony (selfcompacting concrete, SCC). [9]

### **Zpomalovače tuhnutí, tvrdnutí**

Používají se, pokud je potřeba prodloužit obvyklou dobu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Účinek může trvat několik dní nebo týdnů, a to dle druhu použitých zpomalovačů na základě konkrétních požadavků. Důvody využívání zpomalovačů jsou především při betonování prvků při vysokých teplotách, prodloužení doby tuhnutí při dálkové dopravě, popř. u prvků, kde by mohlo docházet k velkému a náhlému uvolňování hydratačního tepla, což má za následek zhoršení mechanických vlastností betonu. [11]

Obecně se dá říct, že se zpomalovače používají tam, kde potřebujeme prodloužit dobu zpracovatelnosti a kde hrozí přehřívání betonu, ať už z důvodu extrémního hydratačního tepla nebo vlivem vysoké teploty okolního prostředí.

Z hlediska chemického složení se jedná především o fosforečnany, sulfonové sloučeniny, oxikyseliny a sacharidy. [11]

### **Urychlovače tuhnutí, tvrdnutí**

Urychlovače tuhnutí jsou materiály, které se přidávají do betonu, aby se zkrátilo tuhnutí a urychlilo zvyšování začáteční pevnosti. Používají se hlavně při betonování pod studenou vodou, za chladného počasí a při prefabrikaci. Při betonování pod studenou vodou je možné namísto urychlovačů použít větší dávku portlandského cementu nebo předeřháté suroviny. Jako urychlovače se používají například rozpustné anorganické soli (chlorid vápenatý, fluoridy, uhličitany, tiokyanidy, dusitany a dusičnany), rozpustné organické látky (trietanolamin TEA, mravenčan vápenatý, octan vápenatý). Speciální kategorii představují urychlovače,

kteře způsobují velmi rychlé ztuhnutí betonové směsi v průběhu jen několika minut a používají se hlavně při aplikaci stříkaného betonu (křemičitan sodný, hlinitan sodný, chlorid hlinitý, fluorid sodný a jiné). [10]

### **Provzdušňující přísady**

Důvod využívání provzdušňujících přísad je hlavně z hlediska cyklického zmrazování a rozmrazování betonu a také tam, kde jsou betony vystavené účinkům látek využívajících se na chemické rozmrazování, např. povrchů vozovek.

Díky provzdušňujícím látkám se v betonu vytváří velké množství uzavřených vzduchových pórů, které nám tvoří expanzní prostor pro vytváření krystalů ledu a solí. Tento expanzní prostor je velmi důležitý vzhledem k tomu, že krystalizační síly např. solí, jsou násobně vyšší, než je pevnost betonu, tudíž by bez pórů mohlo dojít k porušení a výslednému zhoršení trvanlivosti betonu.

Jako provzdušňující přísady se používají především tenzidy a mýdla přirozených pryskyřic, které mají také plastifikační účinky. [10]

### **Inhibitory koroze**

*„V důsledku karbonatace se snižuje přirozená vysoká alkalita betonu (pH 12,5), která pasivuje výztuž. Po čase, kdy je konstrukce vystavena oxidu uhličitému, vodě, chloridům a dalším agresivním látkám, klesne pH betonu pod 9. Nastane iniciační fáze, kdy koroze sice neprobíhá, ale beton ztratil svou pasivační schopnost. Jakmile betonem prostupuje voda a kyslík, začíná postupný proces koroze výztuže – propagační fáze. Její produkty mají větší objem, než původní ocel a svým tlakem způsobují tvorbu trhlin, čímž proces ještě urychlují, odlupují se krycí vrstvy a beton ztrácí své kvality. Rychlost rozvoje koroze výztuže závisí na hutnosti betonu a i na přítomnosti chloridů.“ [12]*

Z tohoto důvodu se používají inhibitory koroze, které na výztuži vytvoří chemickou vrstvu zabraňující přístupu kyslíku.

### 1.2.5 Příměsi

Nejčastěji se jedná o práškovité anorganické látky, které se přidávají do směsi z důvodu zlepšení některých vlastností čerstvého nebo zatvrdlého betonu.

Příměsi jsou charakteristické velkým měrným povrchem s velikostí částic standardně do 0,125mm. Často se takto využívá odpad vzniklý ve stavebnictví, což je výhodné jak z ekologického, tak ekonomického hlediska.

Rozeznáváme nejčastěji dva typy příměsí:

- Inertní (typ I)
- Aktivní (typ II)

#### **Inertní příměsi**

Přidávají se většinou z důvodu vzniku hutnějšího betonu, popř. z důvodu vylepšení reologických vlastností čerstvého betonu, čímž zlepšují zpracovatelnost směsi, popř. mění barevnost betonů. Vlivem svého mineralogického a chemického složení se tento druh příměsí nepodílí na hydrataci v betonu (netuhne, netvrdne) a to ani při případném přidání budičů.

Do směsi se inertní příměsi přidávají obvykle ve formě kamenné moučky, popř. pigmentů. [13]

#### **Aktivní příměsi**

Aktivní příměsi jsou takové příměsi, které se podílejí na hydrataci, tudíž aktivně ovlivňují nárůst pevnosti cementového tmelu. Dělí se na látky pucolánové a latentně hydraulické.

Latentně hydraulické látky musí být aktivovány pomocí budičů, které se dělí na síranové a alkalické. Nejpoužívanější latentně hydraulická látka je vysokopecní struska, která vzniká při tavení železné rudy ve vysokých pecích.

Pucolánové látky po smíchání s vodou samostatně netvrdnou, a však reagují za přítomnosti vody s hydroxidem vápenatým za pomoci tvorby vápenných silikátů a aluminátů, které již jsou nositeli narůstající pevnosti. Rozlišujeme dvě základní



formy pucolánů, a to jsou pucolány přírodní (P) a Průmyslové (Q). Velice důležitý je obsah aktivního oxidu křemičitého, který musí být nejméně 25 % hmotnostních. [13]

## 1.3 Hydratace cementu

Hydratace je fyzikálně-chemická reakce, při které reagují především slínkové minerály cementu za přítomnosti vody. Tímto vznikají sloučeniny, které se pevně spojují a vytvářejí pevnou mikrostrukturu cementového kamene. Hydratace je exotermní reakce, což znamená, že se při ní uvolňuje teplo (hydratační teplo).

*„Hydratace začíná probíhat hned po prvním kontaktu cementových zrnků s vodou, jednotlivé složky slínku však nereagují stejnou rychlostí. První hydratuje C3A (trikalciumaluminát). Jeho rychlá hydratace musí být zpomalena přidáním retardéru, jinak by připravený beton ztuhl ještě před začátkem betonáže. Jako retardér se používá sádrovec, který se do cementu přidává v množství max. 5 % již během mletí slínku. Na druhém místě, z hlediska rychlosti hydratace, je C4AF (tetrakalciumaluminátferit) spolu s C3S (trikalciumpilikát). Nejpomaleji hydratuje C2S (dikalciumsilikát).“ [14]*

Hydratační proces se dělí na dvě fáze:

- Tuhnutí
- Tvrdnutí

### **Tuhnutí**

Při procesu tuhnutí, dochází k houstnutí cementové kaše a rozeznáváme zde dle legislativy dva základní pojmy jako je začátek a konec doby tuhnutí udávaných v minutách. Začátek doby tuhnutí je důležitý časový interval hlavně pro betonáž, protože je nutné uložit směs do bednění ještě před začátkem doby tuhnutí.

### **Tvrdnutí**

Při procesu tvrdnutí nám ztuhlá cementová kaše při ideální teplotě +15 až +25 °C nabývá na pevnosti, kdy je z počátku pevnostní nárůst intenzivní a s narůstajícím časem se zvolňuje. Následné pevnostní zkoušky sloužící pro zařazení betonu do pevnostních tříd, se provádí po 28 dnech, kdy beton dosáhne zhruba 75 % maximální pevnosti.

## 1.4 Zkoušky čerstvého cementového kompozitu

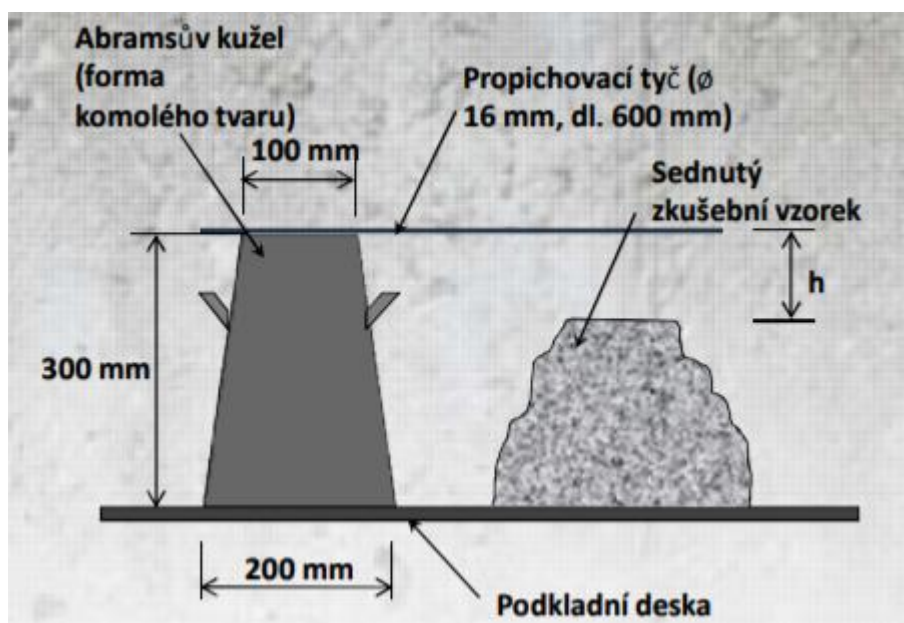
### 1.4.1 Zkouška sednutím

Zkouška sednutí čerstvé směsi se provádí z důvodů zjištění konzistence prostřednictvím sednutí betonu dle ČSN 12350-3.

Zkouška je pro danou směs vhodná v případě, že se sednutí pohybuje v rozmezí 10-210mm.

**Popis zkoušky:** Forma ve tvaru komolého kužele výšky 300 mm, se položí na podkladní navlhčenou nenasákavou desku. Poté se forma naplní čerstvou směsí po 3 vrstvách. Každá vrstva je následně zhutněna 25 normovými, rovnoměrně rozmístěnými vpichy pomocí tyče, přičemž u druhé a třetí vrstvy by hloubka vpichů měla lehce zasahovat do vrstvy předchozí. Poté se forma plynulým pohybem odstraní a měří se sednutí směsi vůči původnímu nedoformovanému vzorku (viz. obr č.1.9). [15]

Dle změřené výšky sednutí se směs zatřídí do jednotlivých kategorií konzistence (viz Obr.č.1.10).



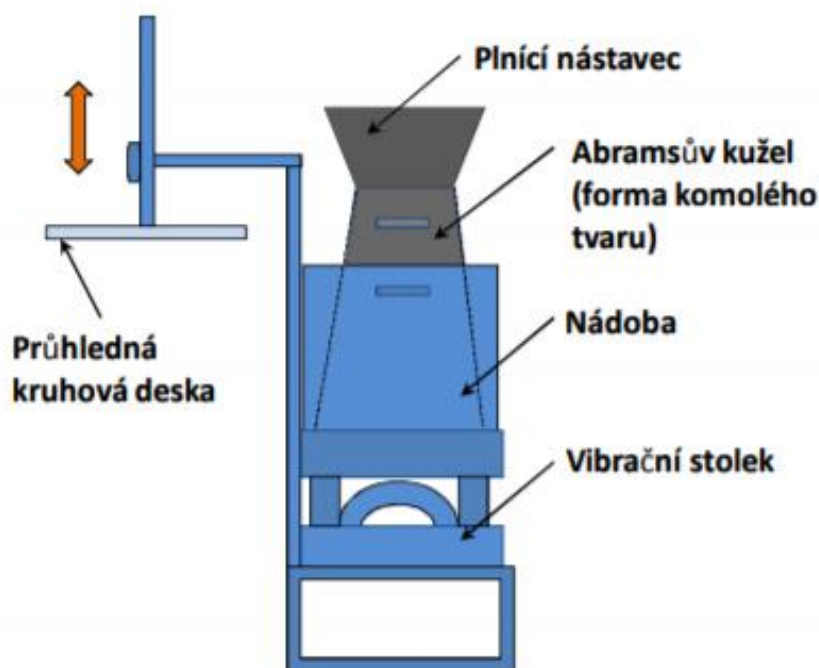
Obr. 1.9 Zkouška sednutím – měření výšky sednutí. [15]

Stupeň	Sednutí [mm]
S1	10 – 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	≥ 220

Obr. 1.10 Klasifikace konzistence dle výšky sednutí. [15]

#### 1.4.2 Zkouška VeBe

**Popis zkoušky:** Při zkoušce přístrojem VeBe, se forma ve tvaru komolého kužele položí do kruhové nádoby, která je pevně uchycena na vibračním stolek. Zhutnění a plnění se provádí stejným způsobem, jako u výše zmíněné zkoušky sednutí. Poté se forma plynulým pohybem odstraní, a pokud se vzorek po odstranění nedotýká stěn nádoby, zaznamená se sednutí směsi. V dalším kroku se uvolní průhledná deska, která dosedne na směs. Poté se spustí vibrace a měří se čas, kdy se deska celou svojí plochou dotýká čerstvé cementové směsi. Tento čas slouží pro vyhodnocení stupně konzistence dle VeBe (viz obr. č. 1.12). [15]



Obr. 1.11 Zkouška VeBe-schéma komponentů. [15]

Stupeň	Čas VeBe [s]
V0	≥ 31
V1	21 – 30
V2	20 – 11
V3	10 – 6
V4	5 – 3

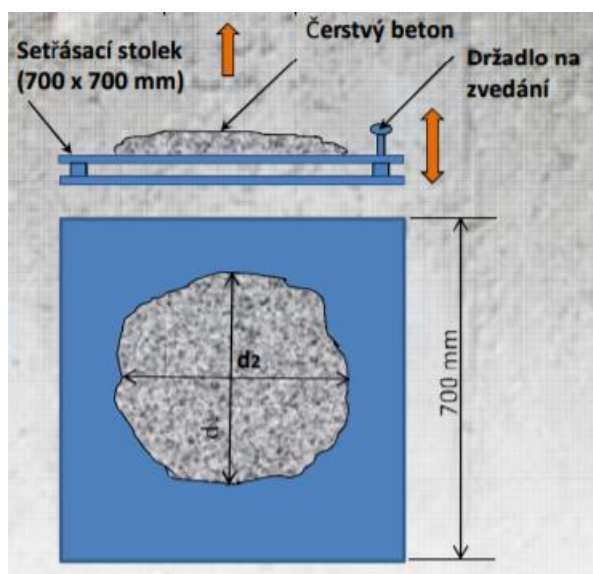
Obr. 1.12 Klasifikace konzistence dle zkoušky VeBe. [15]

### 1.4.3 Zkouška rozlitím

**Popis zkoušky:** Forma ve tvaru komolého kužele výšky 200 mm se navlhčí a položí se na taktéž navlhčený střešací stolek. Plnění formy čerstvou směsí probíhá ve dvou vrstvách, přičemž každá vrstva je 10krát ztuhněna dusadlem. Poté se plynulým pohybem odstraní forma a dochází k rozlití pomocí střešacího stolku, a to v podobě 15-ti zdvihů. [15]

Stupeň rozlití se stanoví ze vztahu:  $F = (d_1 + d_2) / 2$

Výsledná hodnota F se zaokrouhlí na celých 10mm, přičemž hodnota F (průměrné rozlití) by se měla pochybovat v rozmezí 340-630mm. [15]



Obr. 1.13 Schéma zkoušky rozlitím. [15]

Stupeň	Průměr rozlité [mm]
F1	≤ 340
F2	350 – 410
F3	420 – 480
F4	490 – 550
F5	560 – 620
F6	≥ 630

Obr. 1.14 Klasifikace dle zkoušky rozlité. [15]

#### 1.4.4 Stanovení dob tuhnutí

Stanovení doby tuhnutí popisuje ČSN EN 196-3 takto [16]:

##### **Stanovení počátku tuhnutí – postup zkoušky:**

*„Vicatův přístroj se nastaví do nulové polohy (hrot jehly se spustí na podkladní skleněnou destičku, stupnice se vynuluje). Následně se jehla zvedne. - Vicatův prstenec se naplní cementovou kaší normální hustoty a povrch se zarovná. - Naplněný Vicatův prstenec umístěný na skleněné destičce se vloží do nádoby a doplní se vodou tak, aby povrch byl nejméně 5 mm pod hladinou vody, a uloží se do prostředí s kontrolovanou teplotou (20±1) °C. - Po určité době se naplněný Vicatův prstenec vloží do zkušebního zařízení, jehla se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše (1 až 2 s). Jehla začne vnikat do cementové kaše. Po uvolnění zajišťovacího šroubu jehla vniká do cementové kaše, hloubka vniknutí se odečte nejpozději do 30 sekund.“*

##### **Stanovení počátku tuhnutí – vyhodnocení:**

*„Odečtená hodnota, která udává vzdálenost mezi hrotem jehly a skleněnou destičkou se uvede do protokolu o zkoušce společně s dobou, která uplynula od vsypání cementu do míchačky (nulový čas). - Počátek doby tuhnutí se uvádí na stejném vzorku např. po 10 min. a na vhodných místech (vzdálenost nejméně 8 mm od okraje prstence a 5 mm od sebe a nejméně 10 mm od posledního vpichu). - Počátkem tuhnutí se rozumí doba, která uplyne od vsypání cementu do míchačky*

*(nulový čas) až do okamžiku, kdy vzdálenost mezi jehlou a destičkou činí (6±3) mm. - V protokolu o zkoušce se uvádí s přesností na 5 min.“*

#### **Stanovení konce tuhnutí – postup zkoušky:**

*„Vicatův prstenec se po zkoušce počátku doby tuhnutí na skleněné destičce otočí a vloží se zpět do prostředí s kontrolovanou teplotou (20±1) °C. Současně se vymění část zkušebního zařízení, které vniká do cementové kaše. Intervaly zkoušení např. 30 minut. - Po určité době se naplněný Vicatův prstenec s podložní destičkou a nádobkou s vodou vloží do zkušebního zařízení, jehla s kruhovým nástavcem se zajistí v takové poloze, aby se hrotem dotýkala povrchu cementové kaše (1 až 2 s). Jehla začne vnikat do cementové kaše. Po uvolnění zajišťovacího šroubu jehla s kruhovým nástavcem vniká do cementové kaše, hloubka vniknutí se odečte nejpozději do 30 sekund.“*

#### **Stanovení konce tuhnutí – vyhodnocení:**

*„Koncem tuhnutí se rozumí doba, která uplynula od vsypání cementu do míchačky (nulového času) po okamžik, kdy jehla pronikla do zatvrdlé cementové kaše jen do hloubky 0,5 mm. Do protokolu o zkoušce se uvádí s přesností na 15 min. Konec tuhnutí je tehdy, když kruhový nástavec na jehle již nezanechává otisk na povrchu zkoušeného tělesa. Konec doby tuhnutí se uvádí na stejném vzorku např. po 30 min. a na vhodných místech (vzdálenost nejméně 8 mm od okraje prstence a 5 mm od sebe a nejméně 10 mm od posledního vpichu).“*

*Pozn.: Pro účely této Bakalářské práce je tato zkouška stěžejní, tudíž byla celá citována z normy (ČSN EN 196-3). Pro měření byla použita automatická obdoba Vicatova přístroje, která bude podrobněji popsána v praktické části této Bakalářské práce.*

## 1.5 Zkoušky zatvrdlého cementového kompozitu

Pokud není řečeno jinak, zkoušky se provádějí po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí při teplotě 20°C a jsou popsány v normách z řady ČSN EN 12 390.

Zkoušky se provádějí na zkušebních tělesech, z nichž nejpoužívanější jsou v dnešní době tato:

- Krychle o hranách 100, 150, 200 nebo 300 mm
- Válce 150/300 mm
- Trámce 150/150/400 mm
- Trámečky 160/40/40 mm

### 1.5.1 Destruktivní zkouška pevnosti v tlaku.

Dle tvaru zkušebních těles rozeznáváme dvě základní pevnosti cementových kompozitů v tlaku: Pevnost krychelná a pevnost válcová.

Dále se pevnost může zkoušet na jádrových vývrtech, což je využíváno u zjišťování pevností u stávajících konstrukcí. V takovém případě je nutné zkoušet minimálně 3 vzorky z posuzované konstrukce a ověřit geometrii zkušebního vzorku.

Zkušební těleso je po odformování pootočeno o 90° a následně vloženo mezi desky lisu, kde je zatěžováno tlakovou silou. Ve chvíli porušení vzorku dojde k záznamu pevnosti v tlaku a následně se vypracuje protokol o zkoušce. Tlaková pevnost se vypočte ze vzorce  $R=F/A$ , kde  $A$  je tlačná plocha [mm<sup>2</sup>] a  $F$  je maximální dosažená síla [N]. Výsledná tlaková pevnost se uvádí a vychází v [MPa].

Pevnost v tlaku v této práci byla zkoušena na trámečkách o rozměrech 160/40/40mm.





Obr. 1.15 zkouška pevnosti v tlaku

### 1.5.2 Nedestruktivní zkouška pevnosti v tlaku: Schmidtovo kladívko

*„Povrch zkoušeného materiálu se připraví pomocí abrazivního kolečka, aby vznikla hladká a suchá plocha 10x10 cm s odstraněnou povrchovou vrstvou. Pevnost betonu se určuje z tvrdosti cementové malty, spojující jednotlivá zrna kameniva v betonu. Proto se zkoušky provádí v místě malty, a ne v místech kamínků. Proti povrchu zkoušeného materiálu je pružinou vymrštěn ocelový úderník kladívka, který se od něj odrazí. Úderník odrazem napne pracovní pružinu s mechanickým ukazatelem odrazu. Na základě velikosti odrazu kladívka od podkladu se na stupnici zobrazí tvrdost podkladu a z něj se odvodí jeho pevnost v tlaku. Při zkoušce Schmidtovým kladívkem vznikají v betonu v místech dopadu úderníku vtisky. Pro vyhodnocení jednoho zkušebního místa potřebujeme alespoň pět platných vtisků. Tvrdoměrem se také musí zaznamenat i poloha, ve které byl přístroj při zkoušce (vodorovně, svisle dolů, svisle vzhůru). Tato skutečnost se totiž projeví při vyhodnocení ve formě opravy vlivu gravitace na funkci přístroje.“ [17]*

### 1.5.3 Nedestruktivní zkouška ultrazvukem

Princip ultrazvukové impulzní metody spočívá v měření rychlosti šíření ultrazvukových vln ve zkoušeném materiálu v m/s. Ve stavebnictví se využívá

frekvence vln mezi 20 kHz až 500 kHz. Ultrazvukovou impulzní metodou je možno zjistit rovnoměrnost vnitřní struktury betonu a dynamický modul pružnosti materiálu, který se spočte ze vztahu:  $E_{cu}=D*v_L^2*k^{-2}$ , kde D je objemová hmotnost vzorku,  $v_L$  je rychlost šíření impulzů ultrazvukového vlnění, k je součinitel rozměrnosti. Dynamický modul pružnosti lze přepočíst na statický modul pružnosti dle následujícího vztahu:  $E_c=k_u*E_{cu}$ , kde  $k_u$  je zmenšovací součinitel, jehož hodnotu je možno nalézt např. v ČSN 73 2011. [18]

Velká výhoda této metody spočívá v tom, že ji lze aplikovat na již realizované konstrukce, a to bez jakéhokoliv mechanického poškození dané konstrukce. Standardně se používá například pro zjištění modulu pružnosti a rovnoměrnosti u sloupů, průvlaků, popř. stěn.

#### 1.5.4 Zkouška pevnosti v prostém tahu

Zkouška se provádí na trámci, výjimečně na válci nebo na jádrových vývrtech. Vždy se zkouší minimálně tři tělesa. Před vlastní zkouškou se ověří geometrie zkušebního tělesa. Vzorky, které se nestandardně poruší, se ze zkoušky vyloučí - předpokládá se u nich nějaká chyba. O každé zkoušce a jejích výsledcích se vede záznam - protokol.

Zkouška betonu v prostém tahu se provádí jen výjimečně. Její provedení komplikuje nutnost přilepení ocelových desek ke vzorku. Přilepení musí mít perfektní geometrii a pevnost vyšší, než je pevnost zkoušeného betonu. [19]

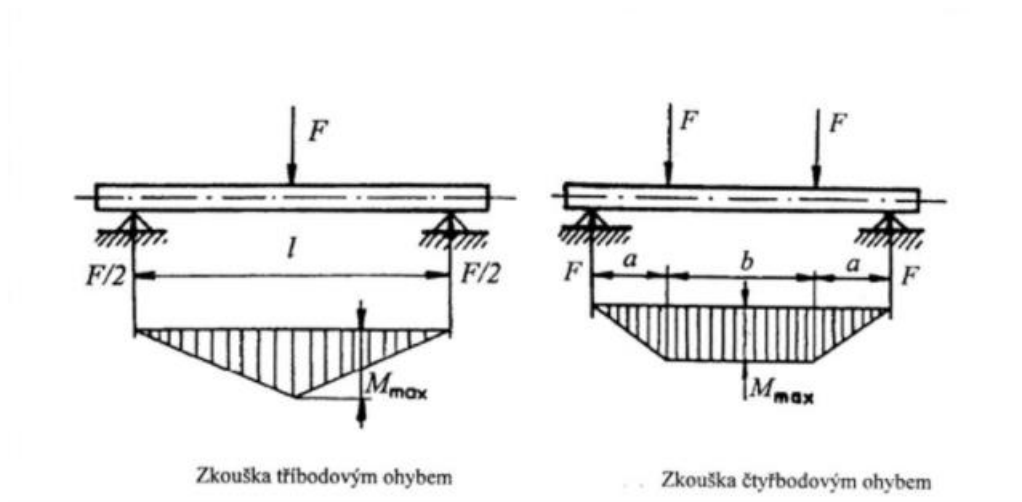
#### 1.5.5 Zkouška pevnosti v příčném tahu

Využívají se typologicky stejné vzorky, jako ve zkoušce v tlaku. Vzorky jsou vkládány mezi čelisti lisu, které jsou uzpůsobené pro bodové přenášení zatížení, díky čemuž vznikají ve vzorku příčná tahová napětí, která jsou způsobena zakřivením izostatických čar.

#### 1.5.6 Zkouška pevnosti v tahu ohybem

Zkouška se provádí na betonovém trámci rozměrů 400/150/150 mm. Vždy se zkouší nejméně tři vzorky. Před zkouškou je potřeba ověřit geometrii tělesa a pak

ho správně osadit do zkušebního zařízení – lisu. Podle způsobu zatížení se jedná o tří- nebo čtyřbodové uspořádání. Čtyřbodové uspořádání zkoušky má vyšší vypovídací hodnotu o pevnosti betonu v tahu ohybem – těleso se poruší ve střední třetině mezi oběma silami od zatížení. Protože jsou v této části nosníku při uvedeném zatížení posouvající síly rovny nule, dojde k porušení v oblasti namáhání čistým ohybem. U tříbodového uspořádání zkoušky se vždy jedná o kombinaci ohybu a smyku. Proto je čtyřbodové uspořádání zkoušky vhodnější. [20]



Obr. 1.16 Schéma způsobu zatížení. [20]

## 1.6 Sochařství

Jedná se o druh výtvarného umění, který má pomocí prostorových objektů vyobrazovat umělecké představy či reálné objekty. Původně sochařství, stejně jako jiné umělecké směry, vznikalo na základě náboženských idejí za účelem šíření náboženství a jeho vyobrazení do reálné podoby.

### 1.6.1 Tradiční sochaření

Dle techniky, která vychází z vlastností použitého materiálu, se sochařství dělí na sochařství skulptivní, kde je dílo vytvářeno pomocí odebrání hmoty z masivu. Skulptivní metoda se používá především v kamenosochařství, řezbářství a glyptice. Další technikou je plastické sochařství, kde je dílo vytvářeno naopak modelováním a přidáváním hmoty. Plastická metoda se používá především ve štukatérství, ceroplastice a v terakotářství. [21]

Tato bakalářská práce je zaměřená především na robotické sochaření, které patří do metody plastického sochaření.

Sochařských nástrojů využívaných dnešní době je celá škála. Mezi nejvýznamnější a nejzákladnější patří například špachtle, dláta, sochařské sekery, rycí nástroje, teslice, sekáče, hladítka, nože, očka.



Obr. 1.17 Nástroje učené pro tradiční sochaření. [29]

Tradiční materiály a z nich vycházející metody využívané v sochaření jsou například: kámen (kamenictví), kovy (kovolitectví), dřevo (řezbářství), pálená hlína (keramické sochaření) odlévání do sádry aj.

### 1.6.2 Sochaření z cementových kompozitů

Pro účely sochaření se v nynější době používá hlavně cement portlandský s různými dalšími specifickými přísadami, jako je například jíla pro dosažení přirozenosti díla, žulové prášky nebo slída, která výslednému dílu dodává lesk. Nejdůležitější vlastnosti takto využívaných cementů jsou například pevnost, objemové změny, jemnost mletí a barva. Velice důležitá je doba zpracovatelnosti a rychlost nárůstu pevnosti, které určují následnou pracnost při vytváření díla.

Sochaření z cementů bez využívání moderních technologií, jako jsou například stroje a 3D tiskárny, využívá v dnešní době stále velké množství uznávaných umělců. Z těchto umělců můžeme například jmenovat tyto: Adrián Villar Rojas, který patří mezi světově uznávané umělce, vytvořil s použitím 1,5 tun portlandského cementu plastiku slona v životní velikosti, k příležitosti slavnostního otevření Serpentine Sackler Gallery v Londýně. Zajímavostí toho díla je využití betonu s jílem, které sám autor vysvětluje takto:

*„Pro mou práci je základním materiálem směs betonu s jílem. Díky jílu mohou moje díla působit křehce, s přirozenými prasklinami, které vznikají postupem času, zatímco cement dodává pevnost a odolnost po dobu vystavení díla. Při realizaci této výstavy jsme použili mnoho tun cementu od společnosti CEMEX,“.* [22]



*Obr. 1.18 Adrián Villar Rojas: Plastika slona v životní velikosti. [22]*

Mezi další umělce využívající cement patří například český umělec Lubomír Dostál, který často využívá k vyztužení svých soch prokládané pletivo. Dále Josef Klimeš využívající metodu torketování, kde do předem připravené formy s pletivem nahazuje beton s tím, že po odbednění zůstane zepředu otisk bednicích prvků. Zajímavou techniku využívá Kurt Gebauer, český sochař a vysokoškolský profesor, který mimo jiné dává na vnitřní vrstvu polystyrenu malou povrchovou vrstvu betonu tak, aby celek vypadal jako monolit. [23]



*Obr. 1.19 Kurt Gebauer: Sousoší na pražském náměstí Jana Palacha. [30]*

### 1.6.3 Probarvení soch z cementových kompozitů

V první řadě je potřeba si uvědomit, že termín probarvený, popřípadě barevný beton, v žádném případě neznamená barvou natřený beton. Barvou natřený beton vzniká konečnou povrchovou úpravou betonu ve formě nátěru, kdežto barevný beton vzniká výběrem vhodných složek betonu.

Probarvení betonu lze docílit buďto přímo, například volbou barvy kameniva a velký význam na barvu betonu má použití běžného (šedého) cementu nebo bílého cementu. Dále lze změnit barvu betonu nepřímo, kde se používají různé barevné pigmenty což je v podstatě prášková barva na bázi oxidů železa přidávaná do záměsové vody betonu v řádech jednotek hmotnostních procent.



*Obr. 1.20 Barevné betonové obklady*

### 1.6.4 Moderní metody cementového sochařství

#### *1.6.4.1 Robotické sochaření*

Robotické sochaření patří mezi nejmladší způsoby vytváření uměleckých děl. Jedná se o poměrně mladou technologii, která ještě není vyzkoumaná. Nicméně se v poslední době těší vzrůstajícímu zájmu odborné veřejnosti, a tudíž bylo robotické

sochaření, i přes to že se jedná o málo vyzkoumanou technologii, vybráno jako jedno z hlavních témat a bude mu věnována praktická část této bakalářské práce, kde se zaměříme na vhodný materiál pro tuto „budoucí“ metodu sochaření.

Představa tkví ve vytvoření vzoru do směsi pomocí robotického ramena, kde směs bude již dostatečně tuhá, aby zachovala vytvořený tvar, ale zároveň dostatečně měkká aby v ní bylo možné vytvořit požadovaný tvar bez problémů. Bude se tedy jednat o skulptivní metodu sochaření.

#### 1.6.4.1.1 Roboti pro robotické sochaření

Hlavním důvodem plánovaného využívání robotů pro sochaření je ten, že v poslední době, kdy vzniká stále více abstraktních děl rozmanitých tvarů, je vytváření forem pro následná díla velice náročné ne-li nemožné. Proto vznikla vize robotů, přetvářející digitální modely do hmotné podoby.

Principem této metody je odebrání hmoty z kompozitního základu, čímž vznikne výsledné dílo o požadovaném tvaru. Jedná se tudíž o skulpturní metodu sochaření.

Zajímavostí je, že jako jedna z mála veřejných institucí využívající robotické sochaření v Evropě je SPŠ kamenická a sochařská v Hořovicích, jejichž cílem je ve spolupráci s podnikatelskou sférou zavést tyto špičkové technologie v podobě know-how do praxe na vzdělávací instituci, bez ambicí na ziskovost projektu. [24]

Roboti pro robotické sochaření jsou tvořeny robotickým ramenem, které pracuje v sedmi osách v systému sférických nebo cylindrických souřadnic, na rozdíl od drtivé většiny obráběcích stojů, které pracují v kartézských (pravoúhlých) souřadnicích. Rameno má stejný počet stupňů volnosti jako lidské rameno, díky čemuž ho dokáže plnohodnotně nahradit.

Koncovým prvkem ramena je vřeteno, nesoucí rotační nástroj, které nám nahrazuje lidské zápěstí. Vřeteno je právě ten prvek, který nám fyzicky zajišťuje rytí (obrábění) požadovaného tvaru do cementového kompozitu. [24]



Zajímavostí je, že si robot nástroje zvládne vyměňovat sám a také přesnost rytí, která se pohybuje okolo 0,05 mm, což je přesnost, již by lidská ruka nikdy nemohla dosáhnout. [24]

Další možnou částí těchto strojů je 3D skener, který nachází uplatnění v oblasti restaurování, kdy je možné objekt pomocí skeneru zdokumentovat, a pak následná data využít pro restaurování. Jeho měřicí přesnost je o dva řády vyšší, než jsou potřeby pro praxi v oblasti restaurování, dokumentaci a tvorbu 3D objektů. Díky této přesnosti skenování bude možné data využít i pro měření deformací objektu a identifikaci originálů v setinách mm. [24]

## 1.7 3D tisk

Jedná se o aditivní proces, kdy se přidáváním materiálu vytváří fyzický objekt, na základě digitální předlohy. V poslední době se jedná o jednu z nejprogressivnějších metod vytváření fyzických objektů.

V dnešní době je v oblasti 3D tisku nejpoužívanější metodou FDM (Fused De - position), jejíž princip je vytváření objektů na základě nanášení tenkých vrstev materiálu na sebe, čímž vzniká požadovaný objekt. V první fázi si systém virtuální model objektu rozloží do tenkých vrstev a následně jej pomocí tavné pistole sestaví v pracovním prostoru tiskárny. [25]

Pro úspěšné aplikování technologie 3D tisku do oblasti stavebnictví, je potřeba si uvědomit základní úskalí používaného materiálu, kterým jsou betony, popřípadě cementové kompozity. Problémem těchto materiálů je, že podléhají hydratačním procesům (tuhnutí a tvrdnutí) a je velký problém tento proces přesně řídit, což je pro technologii 3D tisku zásadní.

V současné době se u nás touto technologií zabývá mnoho lidí, ať už v akademickém, či soukromém sektoru. Z nich je jeden z nejvýznamnějších Michal Kovářík, odborný asistent na Katedře technologie staveb Fakulty stavební ČVUT. Podle jeho názoru je pro budoucí rozšíření této technologie do běžné stavební výroby zásadní uvědomit si slabiny i výhody technologie aditivní výroby nebo také 3D tisku z betonu. Za velmi obtížné považuje dosáhnout vysoké rychlosti tisku při zachování vysokého rozlišení. Vysoké rozlišení zásadně ovlivňuje kvalitu a přesnost povrchu tištěných dílců. S tím souvisí i cena a nezbytnost postprodukce. [25]

Z těchto důvodů je nutné přidávat do cementových kompozitů přísady zpomalující proces tuhnutí a také proto, aby bylo možné kvalitní nanesení v jednotlivých vrstvách, ale zároveň je nutné přidávat urychlovače s pomalejším nástupem, aby po nanesení došlo k co nejrychlejšímu zatuhnutí směsi a umožnila se tak aplikace další vrstvy a nebylo potřeba bednicích prvků. [25]

## 2 Praktická část

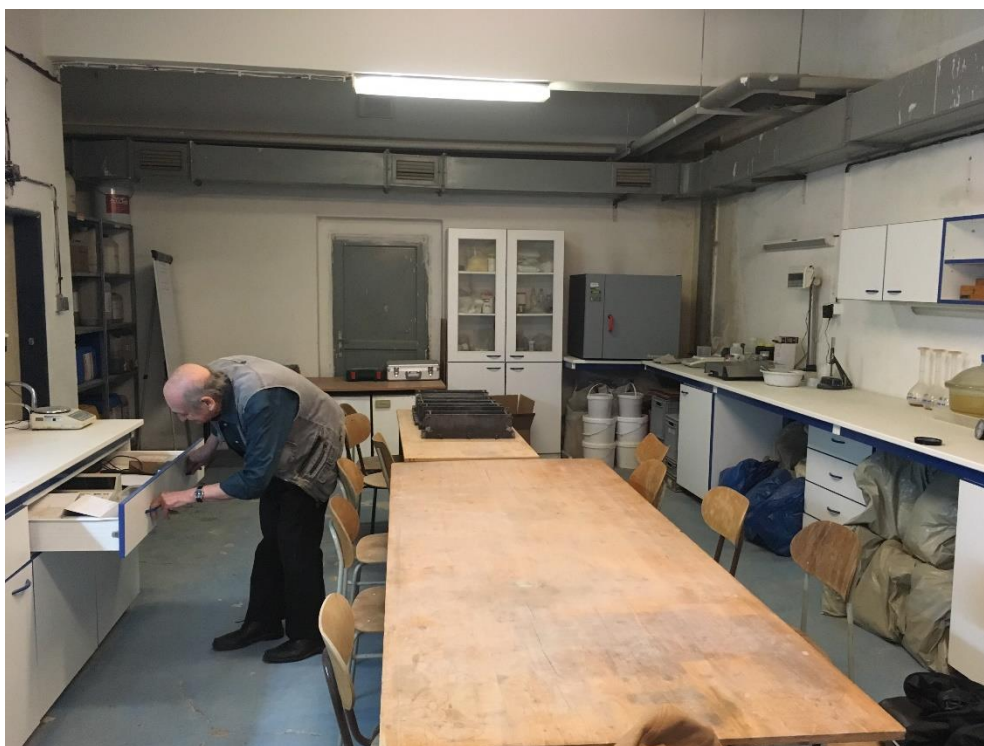
### 2.1 Cíle praktické části

Cílem praktické části této bakalářské práce je posouzení a určení vlivu vysokých teplot na zkoumané směsi z cementového kompozitu a posouzení využitelnosti tohoto vlivu v oblasti robotického sochaření a 3D tisku.

Vliv vysokých teplot bude posuzován z hlediska začátku a konce tuhnutí. Budeme se tedy snažit vypořádat závislost a vliv teploty na čerstvou směs.

Dále podrobíme po stanovených časových intervalech vzorky této směsi mechanickým zkouškám, jako jsou: prostý tlak, tah za ohybu a zkoušky ultrazvukem.

Tyto zkoušky byly prováděny v laboratoři Experimentálního centra fakulty stavební ČVUT, za dozoru doc. Ing. Karla Koláře, CSc.



*Obr. 2.1 Část laboratoře experimentálního centra ČVUT*

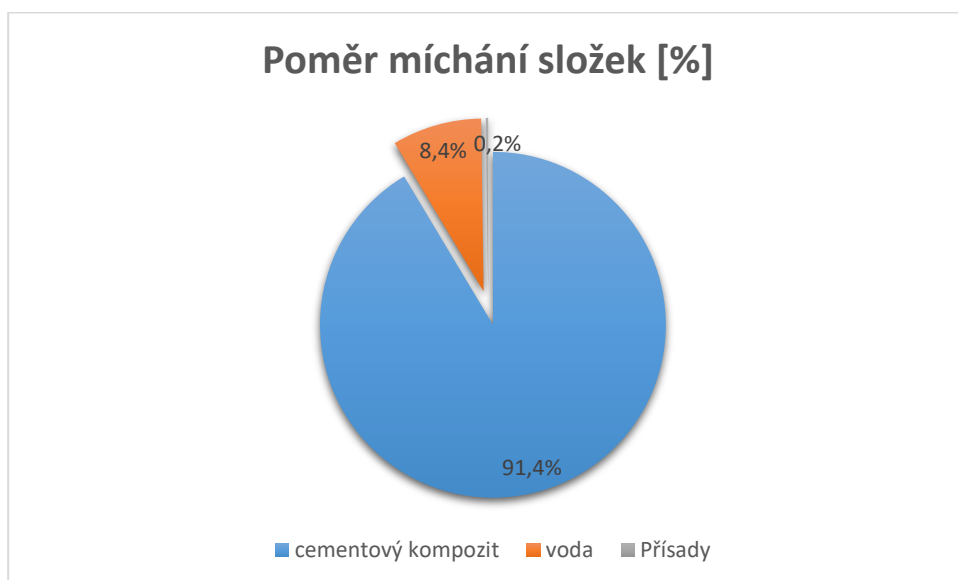
## 2.2 Popis zkoumané směsi

Směs cementového kompozitu, využívaná pro účely této bakalářské práce, je ve finální fázi vývoje a podléhá zákonné ochraně vynálezů (patent č.: CZ 306663), nebude tudíž zveřejněno její složení.

Jedná se o cementový kompozit (hotový prefabrikát) s pracovním označením MSK1, do kterého nebylo nutné po přidání přísady a vody přidávat žádné jiné složky. Zvolené hmotnostní složení při míchání je následující:

1. Suchá cementová kompozitní směs	3 500g
2. Voda	320g
3. Přísady	8,75g

Vodní součinitel byl dle výše zmíněných poměrů stanoven dle výpočtu:  $w=v/c$ , kde  $v$  je hmotnost vody,  $c$  je hmotnost cem. kompozitu na:  $w=0,1$ .



Graf 2.1 Poměr míchání složek ve směsi

## 2.3 Základní přehled

Jako první byl v laboratoři vytvořen referenční vzorek, sloužící pro následné porovnání se vzorky vystaveným vysokým teplotám. Referenční vzorek (dále jako vzorek A) byl po celou dobu umístěn ve stálé teplotě 20 °C.

Dále byly vytvořeny vzorky s pracovním označením „C“. Tyto vzorky byly po dobu 24 h vystavovány teplotě 30 °C. Poté byly umístěny do místnosti s pokojovou teplotou 20 °C.

Jako poslední byly vytvořeny vzorky s pracovním označením „D“. Pro tyto vzorky byla určená teplota 55 °C a stejně, jako v předchozím případě, jí byly vystavovány po dobu 24 h. Poté, byly taktéž umístěny do místnosti s pokojovou teplotou 20 °C.

U všech vzorků byl zkoumán počátek a konec tuhnutí, byly provedeny mechanické zkoušky na prostý tah a tlak za ohybu a byly podrobené zkoušce ultrazvukem.

Vzhledem k působení vyšších teplot, díky čemuž byl předpokládán rychlý nárůst pevnosti zkoušených vzorků, byl časový interval mechanický zkoušek zvolen v intervalech 5 h, 24 h a 28 dní.

Suchá cementová kompozitní směs byla dodávána v pytlích o hmotnosti 25kg.



Obr 2.2 Pytlovaná cementová směs

## 2.4 Výroba vzorků

Výroba všech vzorků probíhala ve stejných podmínkách, v laboratořích experimentálního centra fakulty stavební ČVUT při pokojové teplotě 20 °C.

Jako první bylo potřeba připravit formičky pro výrobu vzorků (trámečků). K tomuto účelu byly zvoleny ocelové formičky, s vnitřními rozměry 160x40x40 mm. U formiček byla nejprve zkontrolována těsnost veškerých komponentů a čistota. Poté se formičky z vnitřní strany vymazaly mazivem, které sloužilo k lepšímu odformování tak, aby nedocházelo k přichycení cementové směsi ke stěnám formičky.



*Obr. 2.3 Mazání formičky*

Dále bylo potřeba navážít potřebné množství všech základních složek, jako jsou suchá cementová směs, voda a přísady. Vážení probíhalo na homologovaných váhách s přesností na 0,01 a 1 g.

Vážení přísady se provádělo v kelímcích, na jejichž hmotnost byla váha s přesností na 0,01 g vynulována. Poté se přistoupilo k samotnému navážení potřebného množství, které činilo 8,75g na jednu dávku směsi. Vážení suché cementové směsi bylo prováděno na váze s přesností na celé gramy. Váha byla

nejdříve vynulována na mističku, ve které se následně suchá směs vážila. Suché směsi se na jednu dávku dávalo přesně 3500 g. Jako poslední bylo potřeba navážit vodu, jejíž vážení probíhalo na stejné váze, jako vážení přísady. Hmotnost vody na jednu dávku směsi činila 320 g.



*Obr. 2.4 Vážení jednotlivých složek cementového kompozitu*

Po navážení jednotlivých složek se přistoupilo k samotnému míchání. Nejdříve byla do nádoby nalita voda a do ní se přidala přísada. Po přidání přísady bylo zahájeno ruční míchání tak, aby došlo k co nejlepšímu rozpuštění přísady ve vodě. Toto ruční míchání probíhalo za pomoci špachtle a trvalo v průměru jednu minutu.



*Obr. 2.5 Ruční „před míchání“ záměsové vody s přísadou*

Po dostatečném rozpuštění přísady ve vodě se přistoupilo k samotnému přidávání suché cementové kompozitní směsi (dále i jako směs) s tím, že byl tento čas zaznamenán. Suchá směs byla přidávána postupně s tím, že zhruba první polovina směsi byla ještě míchána v ruce a až po dosažení hustší konzistence byla nádoba vložena do automatické míchačky. Tento postup byl zvolen z toho důvodu, aby nedocházelo vlivem příliš řídké konzistence ke stříkání směsi v automatické míchačce.

Po vložení nádoby s před míchanou směsí do míchačky byl přístroj zapnut a postupně, v krátkých časových intervalech v řádech vteřin, byl do nádoby přidán zbytek suché směsi. Samotné míchání v automatické míchačce probíhalo cca 1 minutu. Čas míchání se u jednotlivých vzorků lišil v řádu několika vteřin, a to z toho důvodu, že konec míchání byl určován vizuálně a to ve chvíli, kdy se směs zdála být dostatečně tekutá k vkládání do forem.





*Obr. 2.6 Míchání směsi v automatické míchačce*

Samotné vkládání do forem bylo nutné realizovat bezprostředně po ukončení míchání, a to co nejrychleji. Tekutá směs se nedříve do forem nalila do cca ½ výšky a byla pěchováním lehce zhutněna. Poté se směsí doplnila zbylá polovina, která byla taktéž pěchováním a dusáním lehce zhutněna a pomocí ocelového hladítka srovnána s horní hranou formičky.



*Obr. 2.7 Lití směsi do forem*

Tento postup přípravy vzorků byl aplikován u všech vzorků (A, C, D) stejně. Následně byly vzorky dle toho, jaké teplotě budou vystavovány, přesunuty do předem předeřtých klimatizačních komor a poté na nich byly provedeny zkoušky popsané níže.

## 2.5 Referenční vzorek A – 20 °C

Trámečků s označením „A“ bylo pro mechanické zkoušky vyrobeno celkem 9 (A1-A9) s tím, že pro každou zkoušku byly použity 3 trámečky. Vzorky byly po celou dobu ponechány ve stálé teplotě 20°C.

### 2.5.1 Zkouška pevnosti v Tahu ohybem

Zkouška pevnosti v tahu ohybem se prováděla na 3 trámečkách ve zkušebním stroji EU40 a to po 5h, 24h a 28 dnech.

Ještě před započítím samotné zkoušky bylo potřeba každý vzorek zvážit a změřit ve třech místech s tím, že výsledná hodnota byla brána jako průměrná hodnota ze všech třech měření. Měření probíhalo pomocí posuvného měřidla SOMET, s přesností na 0,01 mm, vážení probíhalo na váze s přesností 1 g.



*Obr. 2.8 Měření vzorku pomocí posuvného měřidla*

Po změření a zvážení každého vzorku byly trámečky vloženy mezi čelisti lisu a mohlo započnout samotné měření pevnosti.



Obr. 2.9 Zkouška pevnosti v tahu ohybem.

Přístroj zaznamená maximální dosaženou sílu působící na vzorek před jeho porušením. K porušení vzorku dochází standardně uprostřed, a to po celém průřezu (díky čemuž se nám vzorek rozpůlí a vzniklé zlomky se dále používají na zkoušky pevnosti v tlaku).



Obr. 2.10 Typické porušení při zkoušce v tahu ohybem

Výsledné hodnoty ze všech měření byly zapisovány do tabulky, kde je taktéž uvedena průměrná výška a hmotnost vzorku. Hodnota odečtená z přístroje není hodnota pevnosti v MPa, nýbrž hodnota maximální dosažené síly v kN.

Přepočítání maximální dosažené síly na pevnost se provede podle následujícího vztahu:  $R=(3*F*I)/(2*b*h^2)$ , kde F je maximální dosažená síla v [N], b je šířka vzorku, h je výška vzorku, I je rozpětí podpor při zkoušce.

Výsledky zkoušek pevnosti v tahu pro vzorek „A“:

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost [MPa]
5h	A1	0,594	40,15	<b>1,41</b>
	A2	0,591	40,45	<b>1,41</b>
	A3	0,596	40,50	<b>1,41</b>
24h	A4	0,590	40,50	<b>6,09</b>
	A5	0,600	41,10	<b>6,21</b>
	A6	0,598	40,90	<b>6,45</b>
28 dní	A7	0,600	41,2	<b>12,89</b>
	A8	0,608	41,6	<b>13,13</b>
	A9	0,600	40,9	<b>12,77</b>

Tab. 2.1 Výsledky zkoušek pevnosti v tahu pro vzorek „A“

## 2.5.2 Zkouška pevnosti v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku byla prováděna na zlomcích trámeček vzniklých díky zkoušce tahu ve zkušebním stroji EU40 a to po 5h, 24h a 28 dnech. K dispozici bylo tudíž 6 vzorků.

Výsledné hodnoty ze všech měření byly zapsány do tabulky, kde je taktéž uvedena průměrná výška a hmotnost vzorku. Hodnota při této zkoušce odečtená z přístroje, stejně jako u zkoušky pevnosti v tahu, není hodnota pevnosti v MPa nýbrž hodnota maximální dosažené síly v kN.



Obr. 2.11 Tlaková zkouška na ½ trámečku

Přepočítání maximální dosažené síly na pevnost se provede podle následujícího vztahu:  $R=F/A$ , kde  $F$  je maximální dosažená síla v [N],  $A$  je tlačná plocha vzorku (40x40mm).

Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku pro vzorek „A“:

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost 1 [MPa]	Pevnost 2 [MPa]
5h	A1	0,594	40,15	<b>3,06</b>	<b>3,19</b>
	A2	0,591	40,45	<b>3,44</b>	<b>3,69</b>
	A3	0,596	40,50	<b>3,81</b>	<b>3,84</b>
24h	A4	0,590	40,50	<b>35,63</b>	<b>36,25</b>
	A5	0,600	41,10	<b>36,56</b>	<b>36,56</b>
	A6	0,598	40,90	<b>36,88</b>	<b>36,25</b>
28 dní	A7	0,600	41,2	<b>88,13</b>	<b>85,00</b>
	A8	0,608	41,6	<b>85,63</b>	<b>88,13</b>
	A9	0,600	40,9	<b>86,88</b>	<b>87,50</b>

Tab. 2.2 Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku pro vzorek „A“

### 2.5.3 Stanovení doby tuhnutí

Stanovení počátku a konce tuhnutí této směsi bylo provedeno pomocí Automatického Vicatova přístroje.



Obr. 2.12 Automatický Vicatův přístroj

Tento přístroj provádí celou zkoušku stanovení dob tuhnutí z celá automaticky, je pouze nutné nastavit frekvenci vpichů, která byla zvolena po 1 minutě a vložit do zapisovací hlavy papírek, kam bude stroj zaznamenávat průběh zkoušky (hloubku vpichů). Dále byla na tomto přístroji namazána zapichovací jehlice, aby nedocházelo k uvíznutí jehlice v postupně tuhnoucí směsi.

Poté, vzhledem k charakteru této zkoušky, bylo nutné přenést automatický Vicatův přístroj se zkušební mističkou co nejlíže k místu míchání směsi.

Po namíchání směsi byla touto směsí naplněna do příslušné úrovně mistička, která se následně umístila do přednastaveného automatického Vicatova přístroje. Zbývající prostor v mističce byl k hornímu okraji dolit vodou a to proto, aby nedocházelo k povrchovému vysychání směsi a nebyla tudíž zkouška nepříznivě ovlivněna.



*Obr. 2.13 Zkouška vzorku A v automatickém Vicatově přístroji*

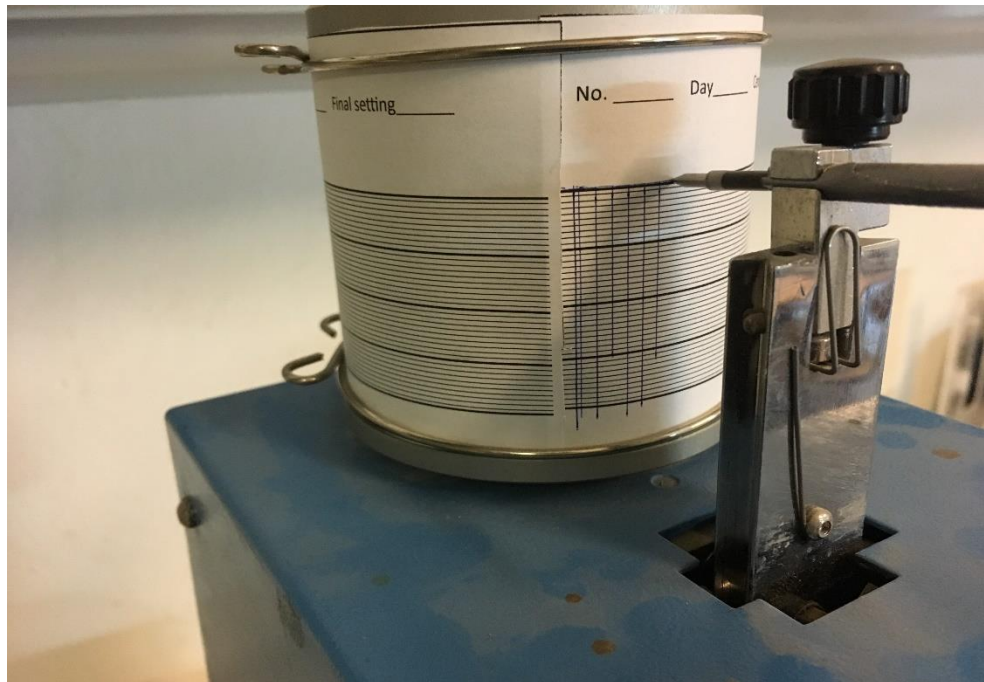
Po umístění a dolití mističky vodou zbývá jen automatický Vicatův přístroj zapnout a dále probíhá zkouška zcela automaticky. Při zapnutí přístroje je také nutné zapsat dobu uplynulou od přidání vody do směsi, do chvíle zapnutí přístroje, který u vzorku „A“ činil 7 minut. Tento čas se poté přičte k výsledkům zkoušky.

Vicatův přístroj přesně dle předem stanovených intervalů spouští jehlici do směsi s tím, že v horní části se pomocí tužky, která je připevněná na ose jehly, zaznamenává hloubka vpichu. Pro lepší představu se dá říct, že je to podobné principu zápisu jaký provádí běžný seismograf.

I přesto, že přístroj provádí zkoušku zcela automaticky, je nutné na celou zkoušku po celou dobu dohlížet. Při zkoušení se několikrát tato zkouška z různých důvodů nepovedla a byla prohlášena za neplatnou. Došlo například k uvíznutí zapichovací jehlice v tuhnoucí směsi a jejímu následnému vytržení z přístroje. Z tohoto důvodu jsme začali na jehlici nanášet mazivo. Další nehoda se týkala špatného zapisování pera na zapisovací papírek v hlavě automatického Vicata. Tento problém byl vyřešen přisunutím pera těsněji k papírku tak, aby tužka vyvíjela na zapisovací papírek větší tlak. Pokaždé, když došlo k podobným nehodám, byla



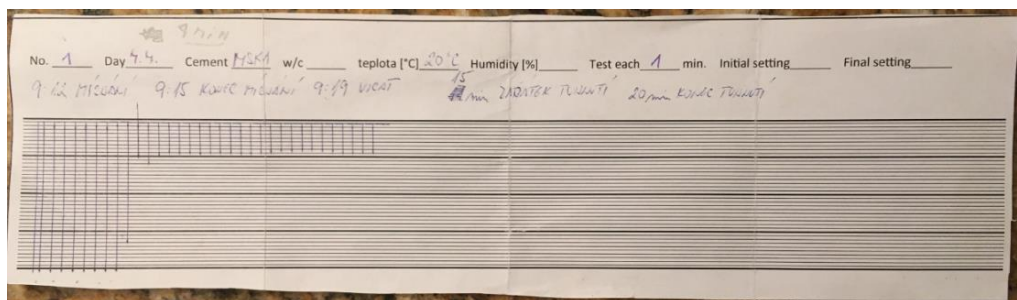
zkouška okamžitě ukončena a prohlášena za neplatnou. Poté byla namíchána další várka směsi a zkouška započala celá nanovo.



Obr. 2.14 Zapisovací hlava automatického vicatova přístroje

Zkouška byla ukončena ve chvíli, kdy se jehlice několikrát za sebou zastavila minimálně 0,5mm pod horním okrajem směsi a bylo tudíž jasné, že nastal konec doby tuhnutí. Následně byl papírek se zápisem vyjmut a byl podle něj určen začátek a konec tuhnutí směsi.

Jako začátek byla určena chvíle, kdy se zapichovací jehlice zastavila minimálně  $6 \pm 3$ mm nade dnem mističky. Konec tuhnutí byl, jak je již výše zmíněno, určen v první chvíli, kdy došlo k průniku jehly do max. hloubky 0,5mm pod povrch směsi s tím, že žádný z dalších několika vpichů nepronikl hlouběji.



Obr. 2.15 Zápis automatického vicatova přístroje pro vzorek „A“

**Vyhodnocení zkoušky vzorku „A“:** Začátek tuhnutí: 15 min.

Konec tuhnutí: 20 min.

Veškeré časové hodnoty jsou uváděny od chvíle přidání záměsové vody do suché cementové směsi. K časům zaznamenaných na obrázku 2.15 byl, jak je již výše zmíněno, přičten čas, který uplynul od chvíle přidání záměsové vody do suché směsi do zapnutí vikatova přístroje (+ 7 minut).

#### 2.5.4 Zkouška dynamického modulu pružnosti

Zkouška ultrazvukem byla prováděna na přístroji Vikasonic, který nám v čase zaznamenává dynamický modul pružnosti a změnu teploty vzorku.



*Obr. 2.17 Měřicí jednotka ultrazvuku*

Jako první bylo potřeba Vikasonic připravit k měření. Přístroj se skládá z měřicí jednotky a ze zkušební mističky s čidly, do které se umísťuje zavlhlá směs. Nejdříve se rozebrala zkušební mistička a to na 4 části. První část tvoří dno mističky s umístěným čidlem po celé ploše. Druhá část přístroje je naopak „víko“ mističky, taktéž po celé

ploše tvořeno čidlem. Třetí částí je plastový kroužek tvořící stěny mističky a poslední částí mističky je teploměr umístěný v ochranné trubičce.

Dále bylo potřeba namazat obě čidla a ochrannou trubičku teploměru hydrofobním gelem, který zajišťuje dokonalý vodivý kontakt mezi čidly a směsí. Po namazání gelem se čidla překryla potravinářskou folií, a to tak, aby mezi folií a gelem nevznikaly vzduchové bublinky rušící kontakt.

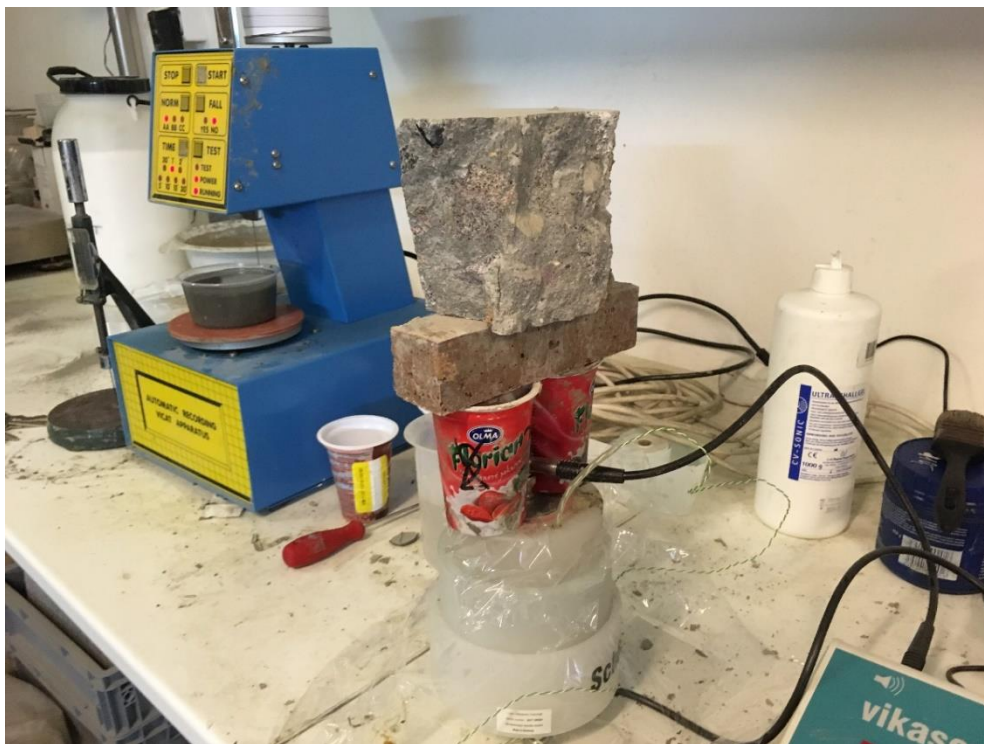


*Obr. 2.17 Mazání přístroje pomocí hydrofobního gelu*

Poté byla na měřící jednotce tohoto přístroje nastavena frekvence měření a zda-li chceme provádět zápis a ukládání dat (Ano). Jelikož nemá přístroj interní paměť, je nutné k němu připojit externí databanku, v našem případě v podobě USB Flash disku.

V dalším kroku už mohla započnout samotná příprava směsi za stejných podmínek, postupů a složení, jako v předchozích zkouškách. Stejně, jako u zkoušky počátku a konce tuhnutí, byl zaznamenán čas přidání záměsové vody.

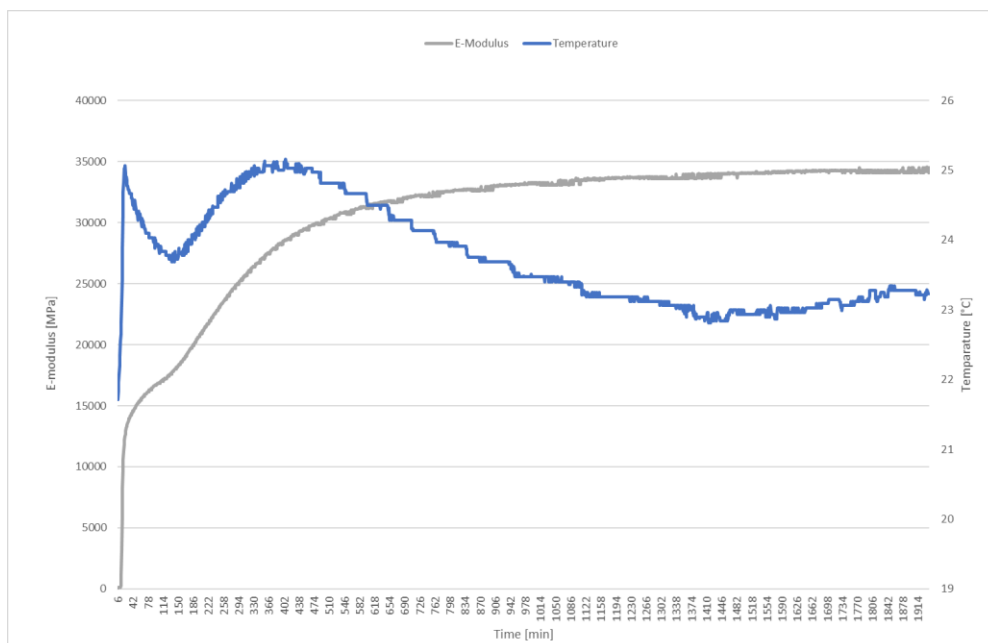
Zavlhá směs byla dále umístěna do zkušební mističky s tím, že bylo nutné zajistit řádný kontakt mezi čidly a směsí. Toho se docílilo přitížením „víka“ mističky závažím.



*Obr. 2.18 Přitížení mističky se zkušebním vzorkem*

Poté byl přístroj zapnut a mohlo započnout samotné, zcela automatické měření, které trvalo 5 dní.

Výsledky měření byly převedeny do grafu (viz Obr 2.19), kde je jasně vidět změna modulu pružnosti a teploty v čase. V grafu je také krásně viditelný prudký nárůst teploty vlivem hydratačního tepla a poté, jak se v čase teplota snižovala až na ustálenou hodnotu.



Obr 2.19 Graf modulu pružnosti a teploty v čase pro vzorek „A“

**Naměřená hodnota modulu pružnosti vzorku „A“ činí: 34 GPa**

## 2.6 Zkoušky při účinku vysokých teplot: Vzorek „C“ a „D“

Veškeré postupy, zkoušky a systémy vyhodnocování byly u těchto vzorků prováděny v souladu s postupy, které byly podrobně popsány v předchozí kapitole (2.5 Referenční vzorek „A“). Jakákoliv změna bude ihned u příslušného vzorku, popř. zkoušky popsána.

Veškeré vzorky byly po nalití do forem umístěny do předem přehřáté klimatizační jednotky, ve které byly vystavovány zkušební teplotě po dobu 24 h. Poté byly přesunuty do místnosti s teplotou 20 °C.

**Přehled teplot:** Vzorek „C“: 30 °C

Vzorek „D“ 55 °C



*Obr. 2.20 Klimatizační jednotka*

### 2.6.1 Zkoušky pevnosti v Tahu ohybem

Zkoušení probíhalo vždy na 3 trámečcích po 5, 24h a 28 dnech. Postup celé zkoušky je shodný, jako v případě referenčního vzorku „A“ (kapitola 2.5.1). Výsledky z měření jsou pro vzorek „C“ zaneseny do tabulky 2.3 a pro vzorek „D“ do tabulky 2.4

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost [MPa]
5h	C1	0,618	41,00	<b>5,16</b>
	C2	0,620	41,20	<b>4,80</b>
	C3	0,620	41,20	<b>6,09</b>
24h	C4	0,610	41,80	<b>7,73</b>
	C5	0,606	41,70	<b>8,20</b>
	C6	0,605	41,60	<b>9,38</b>
28 dní	C7	0,610	41,70	<b>10,55</b>
	C8	0,610	41,60	<b>10,08</b>
	C9	0,605	41,20	<b>9,84</b>

Tab. 2.3 Výsledky zkoušek pevnosti v tahu pro vzorek „C“

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost [MPa]
5h	D1	0,618	41,50	<b>3,28</b>
	D2	0,600	41,60	<b>3,98</b>
	D3	0,596	41,50	<b>4,22</b>
24h	D4	0,608	42,40	<b>6,33</b>
	D5	0,602	42,00	<b>6,09</b>
	D6	0,603	41,75	<b>5,63</b>
28 dní	D7	0,623	42,60	<b>6,80</b>
	D8	0,615	42,60	<b>6,80</b>
	D9	0,605	41,20	<b>6,09</b>

Tab. 2.4 Výsledky zkoušek pevnosti v tahu pro vzorek „D“

## 2.6.2 Zkoušky pevnosti v tlaku

Zkoušení probíhalo vždy na šesti zlomcích trámečků vzniklých po zkoušce v tahu a to po 5, 24h a 28 dnech. Postup celé zkoušky je shodný, jako v případě referenčního vzorku „A“ (kapitola 2.5.2). Výsledky z měření jsou pro vzorek „C“ zaneseny do tabulky 2.5 a pro vzorek „D“ do tabulky 2.6.

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost 1 [MPa]	Pevnost 2 [MPa]
5h	C1	0,618	41,00	<b>22,81</b>	<b>21,56</b>
	C2	0,620	41,20	<b>20,94</b>	<b>20,00</b>
	C3	0,620	41,20	<b>20,00</b>	<b>19,38</b>
24h	C4	0,610	41,80	<b>37,19</b>	<b>35,63</b>
	C5	0,606	41,70	<b>34,38</b>	<b>36,56</b>
	C6	0,605	41,60	<b>37,50</b>	<b>36,25</b>
28 dní	C7	0,610	41,70	<b>62,50</b>	<b>69,38</b>
	C8	0,610	41,60	<b>69,38</b>	<b>68,75</b>
	C9	0,605	41,20	<b>71,88</b>	<b>62,50</b>

Tab. 2.5 Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku pro vzorek „C“

Čas	Značení	Hmotnost[kg]	Výška [mm]	Pevnost 1 [MPa]	Pevnost 2 [MPa]
5h	D1	0,618	41,50	<b>27,81</b>	<b>28,44</b>
	D2	0,600	41,60	<b>29,06</b>	<b>26,88</b>
	D3	0,596	41,50	<b>27,81</b>	<b>25,00</b>
24h	D4	0,608	42,40	<b>33,13</b>	<b>32,19</b>
	D5	0,602	42,00	<b>28,75</b>	<b>30,63</b>
	D6	0,603	41,75	<b>30,63</b>	<b>34,06</b>
28 dní	D7	0,623	42,60	<b>37,50</b>	<b>48,13</b>
	D8	0,615	42,60	<b>42,50</b>	<b>50,00</b>
	D9	0,605	41,20	<b>53,75</b>	<b>50,63</b>

Tab. 2.6 Výsledky zkoušek pevnosti v tlaku pro vzorek „D“

### 2.6.3 Stanovení doby tuhnutí

Postup zkoušky je shodný, jako v případě referenčního vzorku „A“ (kapitola 2.5.3) s tím rozdílem, že samotná zkouška probíhala po celou dobu v klimatizačních jednotkách předeřátých na požadované teploty pro jednotlivé vzorky.

Jednotka byla nastavená na příslušnou teplotu, poté do ní byl vložen automatický Vicatův přístroj. Mezi tím, co se jednotka temperovala na příslušnou teplotu, byla namíchána směs, která se bezprostředně po namíchání přenesla do místa s klimatizační jednotkou. Směs byla následně ve zkušební misce vložena do Vicatova přístroje umístěného v jednotce a přístroj byl zapnut. Prodleva mezi přidáním záměsové vody do směsi a začátkem měření byla u obou vzorků shodně 5 minut.





Obr. 2.21 Vicatův přístroj umístěný v klimatizační jednotce

Výsledky z měření jsou pro vzorek „C“ zaneseny do obrázku 2.21 a pro vzorek „D“ do obrázku 2.22.

45-1  
*znice C (30°C)*  
 No. 2 Day 8.4.18 Cement M3k1 w/c \_\_\_\_\_ teplota [°C] 30°C Humidity [%] \_\_\_\_\_ Test each 1 min. Initial setting 9' Final setting 11'

Obr. 2.22 Zápis automatického vicatova přístroje pro vzorek „C“

11.4.18  
*D (55°C)*  
 No. 3 Day 16.4.18 Cement M3k1 w/c \_\_\_\_\_ teplota [°C] 55°C Humidity [%] \_\_\_\_\_ Test each 1 min. Initial setting 9' Final setting 11'

Obr. 2.23 Zápis automatického vicatova přístroje pro vzorek „D“

**Vyhodnocení zkoušky vzorku „C“:** Začátek tuhnutí: 9 min.

Konec tuhnutí: 11 min.

**Vyhodnocení zkoušky vzorku „D“:** Začátek tuhnutí: 9 min.  
Konec tuhnutí: 10 min.

#### 2.6.4 Zkouška dynamického modulu pružnosti

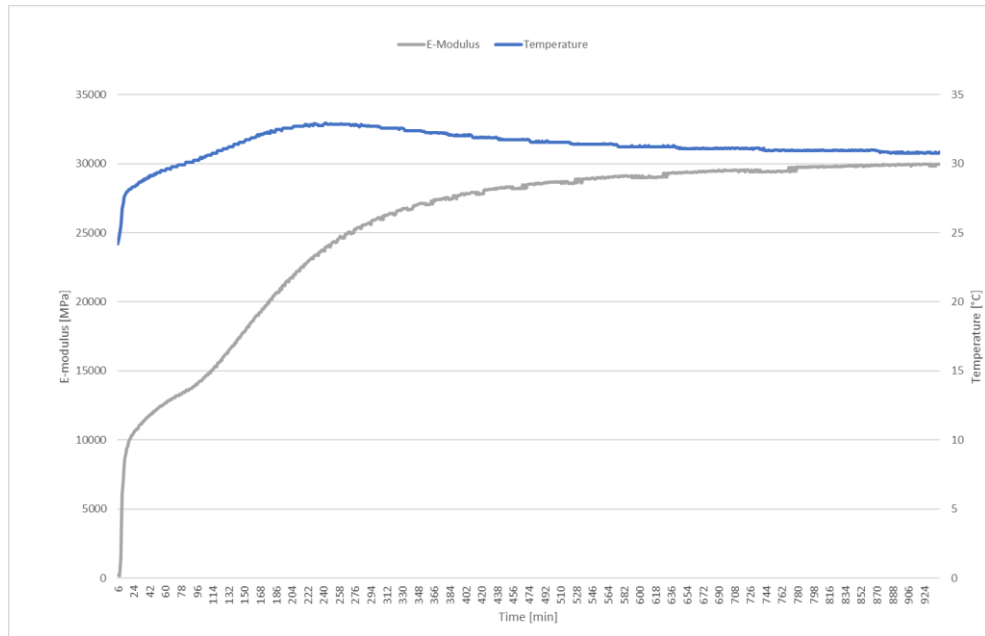
Postup zkoušky je shodný, jako v případě referenčního vzorku „A“ (kapitola 2.5.4) s tím rozdílem, že samotná zkouška probíhala stejně, jako zkouška „stanovení dob tuhnutí“ po celou dobu v klimatizačních jednotkách přehřátých na požadované teploty pro jednotlivé vzorky.

Klimatizační jednotka byla nastavená na příslušnou teplotu, poté do ní byl vložen ultrazvukový přístroj. Mezitím, co se jednotka temperovala na příslušnou teplotu, byla namíchána směs, která se bezprostředně po namíchání přenesla do místa s klimatizační jednotkou. Směs byla následně ve zkušební misce položena do klimatizační jednotky společně s měřicí jednotkou ultrazvuku. Následně byl přístroj zapnut a po celou dobu měření byl v klimatizační jednotce ponechán.



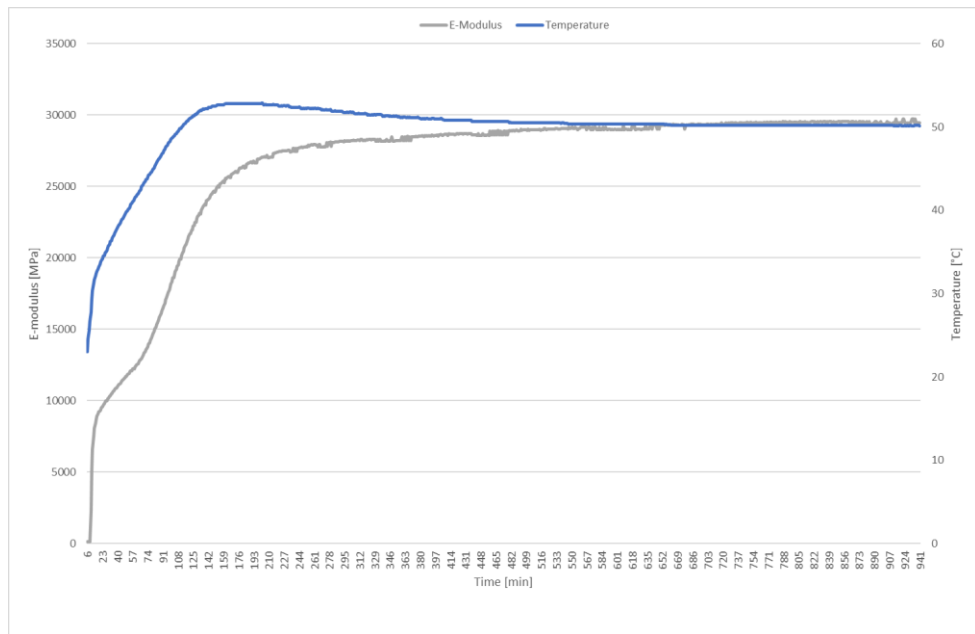
Obr. 2.24 Vikasonic umístěný v klimatizační jednotce (vlevo)

Zkouška ultrazvukem probíhala vždy souběžně se zkouškou „stanovení dob tuhnutí“. Výsledky z měření jsou pro vzorek „C“ uvedeny na obrázku 2.25 a pro vzorek „D“ na obrázku 2.26.



Obr. 2.25 Graf modulu pružnosti a teploty v čase pro vzorek „C“

**Naměřená hodnota modulu pružnosti vzorku „C“ činí: 30 GPa**



Obr. 2.26 Graf modulu pružnosti a teploty v čase pro vzorek „D“

**Naměřená hodnota modulu pružnosti vzorku „D“ činí: 29 GPa**

## 2.7 Diskuze výsledků

### Zkouška pevnosti v Tahu ohybem

Při vzájemném porovnání výsledků ze zkoušek všech tří vzorků (A, C, D) jsem došel k následujícím závěrům z hlediska vlivu teploty na tahovou pevnost zkoumané směsi.

Po prvním měření, v intervalu 5h, vyšla nejvyšší tahová pevnost u vzorku „C“ a to s průměrnou hodnotou 8,6 MPa. Následoval vzorek „D“ s průměrnou hodnotou 6,1 MPa a poté vzorek „A“ s průměrnou hodnotou 2,3 MPa.

Po druhém měření v intervalu 24h, měl stále nejvyšší hodnotu pevnosti v tahu vzorek „C“. U vzorku „A“ došlo k rychlejšímu růstu pevnosti, tudíž pevnost vzorku „A“ přeskočila pevnost vzorku „D“ a výrazně se přiblížila pevnosti vzorku C.

Po posledním měření, v intervalu 28 dní, došlo ke změnám v pořadí. Absolutně nejvyšší pevnosti v tahu dosahoval vzorek „A“ s průměrnou hodnotou 20,7 MPa. Druhou nejvyšší hodnotu měl vzorek „C“ s průměrnou pevností 16,3 MPa. Nejnižší výslednou hodnotu vykazoval vzorek „D“ s průměrnou hodnotou pevnosti 10,5 MPa, což je 50,7% pevnosti referenčního vzorku A.

Obecně se dá říct, že při zvýšené teplotě docházelo vlivem rychlého nástupu hydratace k rychlejšímu nárůstu pevnosti v čase, nicméně došlo ke snížení výsledné pevnosti měřené po 28 dnech.

Tahová pevnost betonu je velice citlivá veličina, závislá na mnoha okolnostech, která by se měla zkoušet na velice citlivých přístrojích. Hodnoty týkající se pevnosti betonu v tahu uvedené v této práci doporučuji tudíž brát pouze, jako orientační. Veškeré uvedené hodnoty byly brány z tabulek: 2.1, 2.3, 2.4

## Zkouška pevnosti v tlaku

Při vzájemném porovnání výsledků ze zkoušek všech tří vzorků (A, C, D) jsem došel k následujícím závěrům z hlediska vlivu teploty na tlakovou pevnost zkoumané směsi.

Po prvním měření, v intervalu 5h, vyšla nejvyšší tlaková pevnost u vzorku „D“ a to s průměrnou hodnotou 27,5 MPa. Následoval vzorek „C“ s průměrnou hodnotou 20,8 MPa a poté vzorek „A“ s průměrnou hodnotou 3,51 MPa.

Zde je vidět extrémní dopad vyšších teplot na počáteční hodnoty pevnosti vzorku v tlaku. Vzorek A dosahuje po 5h pouze 12,7% pevnosti vzorku „D“.

Po druhém měření v intervalu 24h, došlo ke kompletní změně pořadí z hlediska pevností. Nejvyšší pevnosti náhle dosahoval vzorek „A“, následován vzorkem „C“ a „D“.

Po posledním měření v intervalu 28 dní, absolutně nejvyšší pevnosti v tahu dosahoval vzorek „A“ s průměrnou hodnotou 86,9 MPa. Druhou nejvyšší hodnotu měl vzorek „C“ s průměrnou pevností 67,4 MPa. Nejnižší výslednou hodnotu vykazoval vzorek „D“ s průměrnou hodnotou pevnosti 47,1 MPa, což je 54,2% pevnosti referenčního vzorku „A“.

Je zřejmé, že vliv vysokých teplot má za následek extrémně rychlý nárůst pevnosti v prvních hodinách. Nicméně, po 24 hodinách nám již pořadí vzorků dle pevnosti odpovídalo finálnímu pořadí po 28 dnech, z čehož plyne, že vlivem vysokých teplot se následně zvyšování pevnosti po prvních pár hodinách naopak extrémně „zpomaluje“.

Dá se tedy říct, že čím vyšší teplota, tím větší počáteční nárůst pevnosti ale nižší výsledná pevnost měřená po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí. Veškeré uvedené hodnoty byly brány z tabulek: 2.2, 2.5, 2.6.

## Zkouška stanovení doby tuhnutí

Při vzájemném porovnání výsledků ze zkoušek všech tří vzorků (A, C, D) jsem došel k následujícím závěrům z hlediska vlivu teploty na počátek a konec tuhnutí zkoumané směsi.

Co se týče počátku tuhnutí směsi, tak jednoznačně nejpomalejší začátek tuhnutí vykazoval referenční vzorek „A“, kde jsem naměřil hodnotu 15 minut od přidání záměsové vody. U vzorků „C“ a „D“ došlo k začátku tuhnutí shodně po 9 minutách.

Co se týče konce tuhnutí směsi, tak zde pokračoval trend nastolený při počátku tuhnutí. Dobu uplynulou do konce tuhnutí směsi měl zcela jednoznačně nejdelší vzorek „A“ s hodnotou 20 minut. Jako druhý nejpomalejší byl vzorek C s koncem tuhnutí směsi 11 minut. Nejkratší konec tuhnutí byl naměřen u vzorku „D“ o hodnotě 10 minut, což je 50% doby konce tuhnutí referenčního vzorku „A“.

Zde se dá jednoduše říci, že čím vyšší teplota, tím rychlejší nástup počátku a konce tuhnutí směsi. Veškeré uvedené hodnoty byly brány z obrázků: 2.15, 2.22, 2.23.

## Zkouška dynamického modulu pružnosti

Při vzájemném porovnání výsledků ze zkoušek všech tří vzorků (A, C, D) jsem došel k následujícím závěrům z hlediska vlivu teploty na modul pružnosti zkoumané směsi.

Nejvyšší hodnotu modulu pružnosti vykazoval vzorek „A“ a to 34 GPa. Druhou nejvyšší hodnotu jsem naměřil u vzorku „C“ a to 30 GPa a nejnižší hodnotu vykazoval vzorek „D“ a to 29 GPa.

Při porovnání grafů vzorků se zdá, že vliv vysoké teploty nemá extrémní dopad na průběh nárůstu modulu pružnosti. Z grafů se dá vypozařovat, že při vzrůstající teplotě nám pevnost stoupá rychleji a strměji, nicméně nedosahuje takových výsledných hodnot jako u teplot nižších, kde je křivka sice plošší, ale dosahuje vyšších finálních pevností.

Tento jev je podobný jako u předchozích zkoušek, nicméně ne tak výrazný. Tudíž soudím, že má vliv zvýšených teplot nejmenší dopad právě na modul pružnosti směsi.



## Závěr

Cílem bakalářské práce bylo posouzení vlivu vysokých teplot na zkoumaný cementový kompozit z hlediska počátku a konce tuhnutí, tlakové pevnosti, tahové pevnosti a modulu pružnosti.

Tento cíl byl splněn pouze částečně, protože jeho plné splnění by vyžadovalo násobně více zkoušek dat a přesnějšího měření, přesahující rozsah této práce.

Obecně se dá říci, že vysoké teploty ovlivňují směs především zvýšením hydratačního tepla, což na jedné straně vede sice k rychlejším a vyšším nárůstům počátečních pevností, ale na straně druhé k nižším finálním pevnostem měřených po 28 dnech.

Toto je velmi důležité zjištění pro další využívání směsi a určení technologie při aplikaci. Pokud nám půjde především o rychlý nárůst počátečních pevností, modulu pružnosti a urychlení doby tuhnutí, stojí za uvážení snažit se toho docílit právě pomocí zvýšené teploty při realizaci například v dávkovacích strojích, což by mohl být případ 3D tisku a robotického sochaření. V případě, že by byl kladen požadavek primárně na vysokou finální pevnost, doporučuji neurychlovat nárůst pevnosti, modul pružnosti a dobu tuhnutí pomocí teploty, ale řešit to jiným způsobem.

Dalším zajímavým faktem je, že při porovnání 5h tahových pevností vzorků „C“ a „D“ vykazuje vzorek „C“ vyšší pevnost (viz Tab. 2.3). K popsání této anomálie by bylo potřeba se v dalším zjišťování vlastností této směsi více a podrobněji zaměřit na vliv vysokých teplot na tahovou pevnost směsi, udělat více vzorků a hlavně snížit časový interval zkoušení pevnosti této směsi na například první zkoušku po 3h tuhnutí a tvrdnutí, kde by byla jasněji viditelná závislost teploty na tahové pevnosti v čase.

Dle mého názoru bude směs v budoucnu použitelná pro robotické sochaření a 3D tisk, nicméně je potřeba podrobit jí dalším výzkumům v podobě zkoumání jejich vlastností.

## Seznam použité literatury

- [1] Doc. Ing. Karel Daďourek. Kompozitní materiály: definice a rozdělení [online]. Liberec, 2008 [cit. 2018-05-09]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/KM/Kompozity%20Dad/02defrozd.pdf). Technická univerzita v Liberci.
- [2] BOHUMIL, Kratochvíl, Švorčík VÁCLAV a Vojtěch DALIBOR. *Úvod do studia materiálů* [online]. 1. VŠCHT Praha: Vydavatelství VŠCHT Praha Content, 2005 [cit. 2018-03-09]. ISBN 978-80-7080-568-8. Dostupné z: [https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid\\_isbn-80-7080-568-4](https://vydavatelstvi.vscht.cz/katalog/publikace?uid=uid_isbn-80-7080-568-4)
- [3] REJL, Oldřich. *Kompozitní materiály ve stavebnictví* [online]. 16.5.2013 [cit. 2018-03-09]. Dostupné z: <https://stavba.tzb-info.cz/stresni-okna/9909-kompozitni-materialy-ve-stavebnictvi>
- [4] Vznik Cementu: Jak cement vznikl a jakým prošel vývojem?. Ebeton.cz: encyklopedie [online]. [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/encyklopedie/vznik-cementu>
- [5] Složky cementů. Stavebnikomunita.cz: složky-cementu [online]. 2012, 12. října 2012 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/slozky-cementu>
- [6] Anorganická pojiva. Geologie.vsb.cz: anorganická pojiva [online]. [cit. 2018-03-11]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html#surcem](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html#surcem)
- [7] Voda do betonu: voda. Stavebnikomunita.cz: blog [online]. 2012, 12. října 2012 [cit. 2018-03-15]. Dostupné z: <http://stavebnikomunita.cz/profiles/blogs/voda-do-betonu>
- [8] Záměsová voda do betonu. Mujbeton.cz [online]. [cit. 2018-03-17]. Dostupné z: <http://www.mujbeton.cz/zamesova-voda-do-betonu>

- [9] Stavební hmoty: Přednáška 7 [online]. Katedra materiálového inženýrství a chemie [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/24313227-Stavebni-hmoty-prednaska-7.html>. Přednáška. Stavební fakulta ČVUT v Praze.
- [10] TÁBORSKÝ, Tomáš a Petr SCHLATTAUER. Urychlovače tuhnutí a tvrdnutí betonu. Realizace staveb [online]. 25. prosince 2009 [cit. 2018-03-18]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/urychlovace-tuhnuti-atvrdnuti-betonu>
- [11] Přísady zpomalující tuhnutí. Ebeton.cz: pojmy [online]. [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/prisady-zpomalujici-tuhnuti>
- [12] SCHÖNFELDER, Daniel. Účinnost migrujících inhibitorů koroze. Imaterialy.dumabyt.cz: stavební chemie [online]. 2014, 25. června 2014 [cit. 2018-03-23]. Dostupné z: [https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/stavebni-chemie/ucinnost-migrujicich-inhibitoru-koroze\\_41260.html](https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/stavebni-chemie/ucinnost-migrujicich-inhibitoru-koroze_41260.html)
- [13] Příměsi. Ebeton.cz: pojmy [online]. [cit. 2018-03-21]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/primesi>
- [14] ŠČUČKA, Jiří a Petr MARTINEC. Stavební hmoty 1: Beton [online]. 2013 [cit. 2018-03-25]. Dostupné z: [http://www.stavebniinzenyrstvi.cz/wp-content/uploads/2014/07/Scucka\\_Martinec-SH1-Betony.pdf](http://www.stavebniinzenyrstvi.cz/wp-content/uploads/2014/07/Scucka_Martinec-SH1-Betony.pdf). Přednáška. FAST VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA.
- [15] Zkoušení čerstvého betonu: 1.Část. [Http://ecentrum.fsv.cvut.cz](http://ecentrum.fsv.cvut.cz) [online]. 2010 [cit. 2018-04-08]. Dostupné z: [http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010\\_2/pouster12.pdf](http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010_2/pouster12.pdf)

- [16] ČSN EN 196-3 (722100). Metody zkoušení cementu - Část 3: Stanovení dob tuhnutí a objemové stálosti: Stanovení dob tuhnutí. Praha, 2017.
- [17] Schmidtovo kladívko. Fyzmatik.pise.cz [online]. 2013, 8. května 2013 [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <http://fyzmatik.pise.cz/1484-schmidtovo-kladivko.html>
- [18] CIKRLE, Petr a Tomáš VYMAZAL. Nedestruktivní metody zkoušení železobetonových konstrukcí. Betonuniversity.cz [online]. Praha, 2014, 13. března 2014 [cit. 2018-04-22]. Dostupné z: <http://www.betonuniversity.cz/stahnout-soubor?id=1671>
- [19] Pevnost betonu v prostém tahu - zkouška. Ebeton.cz [online]. [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-prostem-tahu-zkouska>
- [20] Pevnost betonu v tahu ohybem - zkouška. Ebeton.cz [online]. [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>
- [21] Sochařství. Zsstrani.cz [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: [http://www.zsstrani.cz/dum/Digitalni%20Ucebni%20Materialy/2\\_stu\\_pen/Vytvarna%20vychova/9.%20rocnik/Socharstvi%20-%2018/Socharstvi.pdf](http://www.zsstrani.cz/dum/Digitalni%20Ucebni%20Materialy/2_stu_pen/Vytvarna%20vychova/9.%20rocnik/Socharstvi%20-%2018/Socharstvi.pdf)
- [22] Materiál od CEMEXu v nové londýnské galerii: Uznávaný moderní umělec používá cement společnosti CEMEX pro vytvoření ústřední sochy pro novou londýnskou galerii umění. [online]. 2013 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <http://www.cemex.cz/uznavany-umelec-pouziva-material-od-cemexu.aspx>
- [23] BETON TKS: BETON A ARCHITEKTURA. Praha, 2016, 16. května 2016  
ISSN 1213-3116

- [24] 3D robot na kamenické a sochařské SPŠ v Hořicích [online]. 2013, 21. února 2013 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:  
<http://www.lomyatezba.cz/2012/2012-4/item/216-3d-robot-na-kamenicke-a-socharske-sps-v-horicich>
- [25] PETRŠ, Jan, ed. TISKNOU SE SOCHY, DOMY I MOSTY. Materialtimes.com [online]. 2016, 18. července 2016 [cit. 2018-05-10]. Dostupné z: <https://www.materialtimes.com/tema-tydne/tisknou-se-sochy-domy-i-mosty.html>
- [26] DANĚK, Lukáš. Využití kompozitních materiálů v automobilovém průmyslu [online]. Brno, 2012 [cit. 2018-05-01]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18040337-Vyuziti-kompozitnich-materialu-v-automobilovem-prumyslu-bakalarska-prace.html>. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně, Agronomická fakulta, Ústav techniky a automobilové dopravy. Vedoucí práce Jiří Votava.
- [27] DAŇKOVÁ, Jana a Jiří ŠAFRATA. Vývoj a použití dřevobetonových kompozitních prefabrikovaných dílců v pozemním stavitelství. In: Imaterialy.dumabyt.cz [online]. 2015, 30. ledna 2015 [cit. 2018-03-10]. Dostupné z:  
[https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/vyvoj-a-pouziti-drevobetonovych-kompozitnich-prefabrikovanych-dilcu-v-pozemnim-stavitelstvi\\_41996.html](https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/vyvoj-a-pouziti-drevobetonovych-kompozitnich-prefabrikovanych-dilcu-v-pozemnim-stavitelstvi_41996.html)
- [28] Cement. In: Heidelbergcement.com [online]. 2017 [cit. 2018-04-01]. Dostupné z: <https://www.heidelbergcement.com/en/cement>
- [29] Nástroje určené pro tradiční sochaření. In: Gr.depositphotos.com [online]. 2011, 8. ledna 2011 [cit. 2018-04-25]. Dostupné z: <https://gr.depositphotos.com/4619584/stock-photo-tools-sculpture.html>

- [30] Instalace Kurta Gebauera na pražském Náměstí Jana Palacha. In:  
Lidovky.cz [online]. Praha [cit. 2018-05-10]. Dostupné z:  
[https://www.lidovky.cz/foto.aspx?c=A110817\\_111008\\_lide\\_glu&foto=WOK3a9deb\\_3510\\_P1400571.JPG](https://www.lidovky.cz/foto.aspx?c=A110817_111008_lide_glu&foto=WOK3a9deb_3510_P1400571.JPG)