

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

Fakulta stavební



Bakalářská práce

Vliv nízkých teplot na hydrataci a pevnost speciálního cementového kompozitu



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: <u>Martin</u>	Jméno: <u>Schicht</u>	Osobní číslo: <u>439154</u>
Zadávací katedra: <u>Experimentální centrum</u>		
Studijní program: <u>Stavitelství</u>		
Studijní obor: <u>Realizace pozemních a inženýrských staveb</u>		

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv nízkých teplot na hydrataci a pevnost speciálního cementového kompozitu

Název bakalářské práce anglicky: Influence of low temperature on hydration and strength of special cement composite

Pokyny pro vypracování:
Zpracování literární rešerše se zaměřením na využití zkoumané směsi pro bezpražcové kolejové lože a jako vysrávkové směsi. Příprava experimentálního programu. Výroba zkušebních vzorků vytvrzovaných 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 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“.

.....
21.2.2018 Datum převzetí zadání Podpis studenta(ky)

České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Experimentální centrum

**Vliv nízkých teplot na hydrataci a pevnost
speciálního cementového kompozitu**

**Influence of low temperature on hydration
and strength of special cement composite**

Bakalářská práce

Autor: Martin Schicht
Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Litoš, Ph.D.
Akademický rok: 2017/2018

Prohlašuji, že jsem předloženou bakalářskou práci vypracoval samostatně
a že všechny použité literární zdroje jsou citovány.

Praha, 25. května 2018

.....

Martin Schicht

Poděkování

Chtěl bych poděkovat doc. Ing. Jiřímu Litošovi, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a cenné konzultace. Dále pak doc. Ing. Karlu Kolářovi, CSc. za vedení při výrobě zkušebních vzorků a předání cenných zkušeností. Další poděkování patří panu Lukáši Joglovi za pomoc při zkoušení vzorků a Ing. Jaroslavě Kořátkové za spolupráci v laboratoři. V neposlední řadě bych rád poděkoval všem zaměstnancům Experimentálního centra, kteří se podíleli na vzniku mé práce.

Abstrakt

Cílem této práce bylo zjistit chování speciálního vysokohodnotného cementového kompozitu, vyvinutého v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze, při zatížení nízkými teplotami. V rámci této práce byly zjišťovány mechanické vlastnosti daného materiálu. Sledoval se nárůst modulu pružnosti, pevnosti v tahu ohybem a tlaku, dále pak doby tuhnutí kompozitu. Všechny tyto vlastnosti byly pozorovány při teplotách 10, 0 a -5 °C a ty se dále porovnávaly s referenčními vzorky, které byly zhotoveny při teplotě 20°C. I přes použití běžné jemnosti mletí cementu bylo dosahováno až 3x vyšších pevnostních hodnot než u běžných betonů.

Klíčová slova: vysokohodnotný beton, pevnost v tlaku, pevnost v tahu ohybem, modul pružnosti, nízká teplota

Abstract

The aim of this work was to investigate the behaviour of special high-performance cementitious composites while stressing under low temperature. The special composite was developed in the Experimental centre of Faculty of Civil Engineering ČVUT in Prague. Mechanical attributes of said material were investigated in this work, such as module of elasticity, tensile strength by bending and compressing, and also the time of solidification of the composite. All of these attributes were investigated under the temperature of 10, 0 and -5 °C and compared to referential samples created at 20°C. Despite the use of common fineness of cement milling, three times higher values compared to regular concrete were achieved.

Key words: high-performance concrete, compressive strength, tensile strength by bending, module of elasticity, low temperature

Obsah

1	Úvod.....	1
1.1	Motivace.....	1
1.2	Cíle práce	1
1.3	Rozsah práce	2
2	Materiál a jeho složky	3
2.1	Vysokohodnotný beton	3
2.2	Složení.....	5
2.2.1	Cement	5
2.2.2	Voda	6
2.2.3	Kamenivo	7
2.2.4	Křemičitá moučka	8
2.2.5	Mikrosilika	8
2.2.6	Superplastifikátory	9
2.2.7	Odpěňovače.....	10
3	Zkoušky betonu	11
3.1	Pevnost v tlaku	11
3.2	Pevnost v tahu ohybem	12
3.3	Počátek a konec tuhnutí cementu	13
3.4	Modul pružnosti betonu	14
4	Multifunkční silikátový kompozit.....	15
4.1	Využití MSK v kolejovém loži pražského metra.....	17
4.2	Vysprávkové směsi	18
5	Experimentální program	20
5.1	Materiál	20
5.2	Zkušební vzorky	20
6	Výsledky	23
6.1	Pevnost MSK 1 v tahu ohybem.....	23
6.2	Pevnost MSK 1 v tlaku	27
6.3	Modul pružnosti	32
6.4	Doby tuhnutí	35
7	Závěr.....	37

7.1	Diskuse a zhodnocení.....	37
7.2	Směr dalšího výzkumu.....	38
8	Literatura.....	39

Seznam obrázků

Obrázek č. 1: Stavba z vysokohodnotného betonu	4
Obrázek č. 2: Složky vysokohodnotného betonu.....	5
Obrázek č. 3: Cement.....	6
Obrázek č. 4: Voda.....	7
Obrázek č. 5: Křemičitá moučka.....	8
Obrázek č. 6: Vyplnění mezer v cementu mikrosilikou.....	9
Obrázek č. 7: Rozdíl povrchu kompozitu při použití odpěňovače.....	10
Obrázek č. 8: Tlačný přípravek BTP 300 k drcení polovin trámečků	11
Obrázek č. 9: Ohybový přípravek BOP 15 k namáhání trámečků ohybem.....	12
Obrázek č. 10: Automatický Vicatův přístroj	13
Obrázek č. 11: Ultrazvukový měřič modulu pružnosti - Vikasonic.....	14
Obrázek č. 12: Výroba suché prefabrikované směsi.....	15
Obrázek č. 13: Výrobní linka - MSK v pytlomaném balení	16
Obrázek č. 14: Podbetonávka bezpražcového uložení z MSK	18
Obrázek č. 15: Příklad betonové konstrukce před sanací	19
Obrázek č. 16: Příprava referenčních vzorků při laboratorní teplotě.....	21
Obrázek č. 17: Připravená forma pro měření nárůstu modulu pružnosti.....	22
Obrázek č. 18: Měření připraveného vzorku.....	23
Obrázek č. 19: Vzorek před zatížením.....	24
Obrázek č. 20: Kolaps vzorku.....	24
Obrázek č. 21: Vykreslení průměrných pevností v tahu ohybem	26
Obrázek č. 22: Laboratorní lis.....	27
Obrázek č. 23: Vzorek před zatížením.....	28
Obrázek č. 24: Porušení vzorku zatížením.....	28
Obrázek č. 25: Ideální tvar zkoušeného tělesa po porušení.....	28
Obrázek č. 26: Vykreslení průměrných pevností v tlaku.....	31
Obrázek č. 27: Chladicí box.....	32
Obrázek č. 28: Průběh modulu pružnosti při 20°C	33
Obrázek č. 29: průběh modulu pružnosti při 10°C	33
Obrázek č. 30: Průběh modulu pružnosti při 0°C	34
Obrázek č. 31: Průběh modulu pružnosti při -5°C.....	34

Obrázek č. 32: Porovnání všech průběhů modulu pružnosti.....	35
Obrázek č. 33: Graf z Vicatova přístroje při 20°C.....	36
Obrázek č. 34: Graf z Vicatova přístroje při 10°C.....	36
Obrázek č. 35: Graf z Vicatova přístroje při 0°C.....	36
Obrázek č. 36: Graf z Vicatova přístroje při -5°C	36

Seznam tabulek

Tabulka č. 1: Dávkování složek.....	20
Tabulka č. 2: Harmonogram zkoušek	23
Tabulka č. 3: Pevnost v tahu ohybem série A - teplota 20°C	24
Tabulka č. 4: Pevnost v tahu ohybem série B - teplota 10°C.....	25
Tabulka č. 5: Pevnost v tahu ohybem série C - teplota 0°C.....	25
Tabulka č. 6: Pevnost v tahu ohybem série D - teplota -5°C	26
Tabulka č. 7: Pevnost v tlaku série A - teplota 20°C	29
Tabulka č. 8: Pevnost v tlaku série B - teplota 10°C	29
Tabulka č. 9: Pevnost v tlaku série C - teplota 0°C	30
Tabulka č. 10: Pevnost v tlaku série D - teplota -5°C.....	31
Tabulka č. 11: Modul pružnosti po 5 dnech.....	32

1 Úvod

1.1 Motivace

Ve světě stavitelství je dnes již mnoho modifikací klasického betonu. Problém však stále nastává, když se provádí výstavba v nepříznivých teplotních podmínkách. Betony klasického složení jsou limitovány teplotou nad bodem mrazu a při betonáži je jejich ošetřování nákladné a není dosahováno potřebných parametrů. Nastává tedy otázka, jestli je ekonomičtější ošetřování betonu nebo použití jiného vhodného složení směsi. V Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze se touto otázkou zabývají již mnoho let. Bylo potřeba vyvinout materiál, který by měl dobrou zpracovatelnost, možnost regulace hydratačních procesů, vysoké pevnosti a hutnou strukturu. Na základě těchto požadavků byl vytvořen multifunkční silikátový kompozit, který má oproti obyčejným betonům výrazně vylepšené vlastnosti a je tvořen z běžně dostupných materiálů. Je použitelný na běžné aplikace, ale vzhledem k jeho vyšší ceně je prozatím určen především k využití v náročných podmínkách. Tento materiál se vyznačuje říditelnou dobou vytvrzovacích procesů, od minut po hodiny, a je tedy vhodný na vysprávkové práce nebo realizace prvků, u kterých je vyžadován rychlý nárůst pevností a jejich brzká použitelnost. Dosud však nebylo laboratorně ověřováno chování tohoto kompozitu při zatěžování nízkými teplotami v počátcích vytvrzovacího procesu a právě tato problematika byla hlavní motivací této práce.

1.2 Cíle práce

Cílem této práce je zjistit, jak se daný multifunkční silikátový kompozit (MSK) chová při zpracování za nízkých teplot. Především se jedná o dobu zpracovatelnosti a následný nárůst pevností a modulu pružnosti v teplotách pohybujících se kolem bodu mrazu.

1.3 Rozsah práce

Součástí této práce je literární rešerše na téma vysokohodnotný beton, zkoušky betonu, dále pak využití MSK v kolejovém loži pražského metra a jako vysprávkové směsi. V rámci této práce se provádí výroba zkušebních vzorků, ve formě trámek o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které jsou temperovány na teploty 10, 0 a -5 °C po dobu 24 h, následně uloženy při laboratorní teplotě a poté zkoušeny v různých časových intervalech v laboratořích Experimentálního centra stavební fakulty ČVUT v Praze. Trámky jsou namáhány v tahu ohybem a tlakem. Dále se měří doby tuhnutí za pomoci automatického Vicatova přístroje a nárůst modulu pružnosti v čase za použití ultrazvukového měřiče. Tyto dvě zkoušky se provádějí za stálého namáhání nízkými teplotami v chladícím boxu. Následuje vyhodnocení a porovnání výsledků zkoušek na referenčních vzorcích, které jsou zhotoveny v laboratorních podmínkách, tj. 20 °C.

2 Materiál a jeho složky

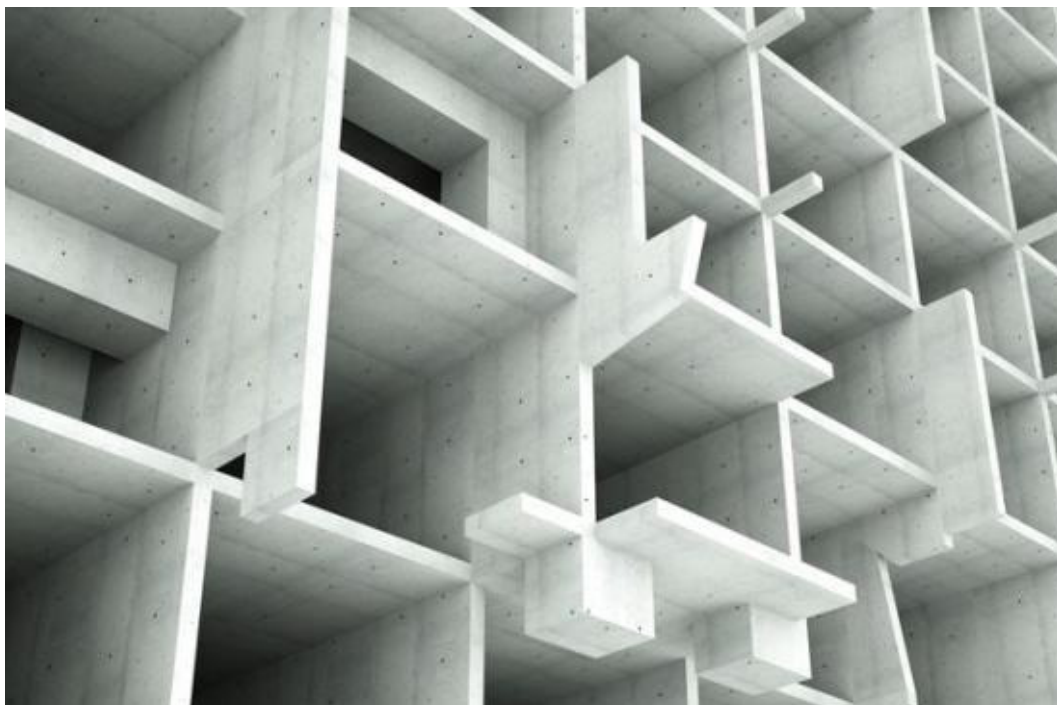
2.1 Vysokohodnotný beton

Se stále vyššími nároky architektů na subtilnost konstrukcí narůstají požadavky na vlastnosti materiálů a jejich pevnost. Právě vysokohodnotné kompozity jsou materiálem, který splňuje ty nejpřísnější požadavky na pevnost, modul pružnosti, odolnost vůči prostředí a další [1]. Vysokých pevnostních parametrů je dosaženo kombinováním vybraných vstupních surovin, kterými jsou: portlandský cement s danou granulometrií zrn, superplastifikátory a mikrosilika, který vzniká při výrobě ferrosilicia [2]. Dále vysokým podílem cementu, přidáním latentně hydraulických příměsí a nízkým vodním součinitelem. Další příznivou vlastností je samozhutitelnost za použití vhodných plastifikátorů. Od běžně používaných betonů se vysokohodnotné betony liší především vysokým obsahem cementu, přísad, příměsí a naopak nízkým vodním součinitelem a absencí hrubého kameniva [3]. Vysoká trvanlivost a odolnost vysokohodnotného kompozitu je zajištěna vysokou hutností materiálu a také díky tomu dosahují tyto kompozity vyšších pevností. Můžeme také říci, že díky velké pevnosti a trvanlivosti můžeme snížit tloušťku krycí vrstvy výztuže a navrhovat subtilnější konstrukce, které budou vystavovány agresivním prostředím [4]. Použitím superplastifikátorů také zajišťujeme nízkou pórovitost materiálu a tudíž minimální vodní nasákavost kompozitu. I to přispívá k jeho trvanlivosti a odolnosti vůči agresivním látkám, které se do konstrukce dostávají prostřednictvím vody.

Pro míchání vysokohodnotných kompozitů je potřeba dodržovat zvláštní postup při míchání. Jako první se smíchá nejhrubší složka s nejjemnější, tj. kamenivo, mikrosilika a míchá se 5 minut. Následně se přidá křemičitá moučka s cementem a míchá se opět 5 minut. Poté se přidá voda s plastifikátory a znovu se míchá 5 minut. Pokud se jedná o vláknobeton, tak se vlákna přidávají jako poslední složka a míchá se 5 minut. Tento postup se používá jako prevence proti tvorbě shluků [3]. V této práci je však použita prefabrikovaná pytlovaná směs, do které je potřeba přidat pouze vodu, tudíž se výrazně zkracuje doba míchání směsi a vyhýbáme se tím nadměrnému zahřívání směsi a její zkrácené době

zpracovatelnosti, která je u našeho systému nežádoucí, jelikož počátek tuhnutí je zde nastavena v řádech minut.

Již od konce minulého století se jako univerzální regulátor rychlosti tuhnutí směsi cementu s vodou používá sádrovec. Posouvá počátek tuhnutí časově tak, aby mohla být čerstvá cementová směs dokonale zpracována i nejjednodušším způsobem. Sádrovec reaguje s aluminátovou a ferrátovou fází slínku ihned po smíchání směsi s vodou a oddaluje počátek tuhnutí, přičemž mechanismus a kinetika prvních reakcí závisí především na obsahu trikalcium aluminátu CA ve slínku, ale také na množství alkálií a síranů. Produkty reakcí těchto substancí brzdí další hydrataci a oddalují tak dosažení potřebné manipulační či konstrukční pevnosti kompozitu. Další možností, jak ovlivnit proces tuhnutí a tvrdnutí betonu je změna chemického složení cementářských surovin spojená se změnou režimu výpalu. Takto lze dosáhnout maximálního obsahu trikalcium silikátu C_3S ve slínku, který je hlavním nosičem pevnosti po zatuhnutí [2].



Obrázek č. 1: Stavba z vysokohodnotného betonu [27]

2.2 Složení

Mezi základní složky betonu patří cement, voda a kamenivo. Dále pak příměsi a přísady. Přísady mohou být provzdušňující, plastifikační, superplastifikační, odpěňovací a mnoho dalších. Příměsi rozdělujeme do dvou skupin - inertní a latentně hydraulické. Inertní jsou příměsi, které se nepodílejí na hydrataci a patří mezi ně například kamenné moučky. Latentně hydraulické příměsi jsou látky s takzvanými pucolánovými vlastnostmi, a to například popílek nebo křemičitý úlet [3].



Obrázek č. 2: Složky vysokohodnotného betonu [25]

2.2.1 Cement

Cement je základním představitelem pojivového systému betonu. Pro výrobu vysokohodnotných kompozitů se používá cement portlandský (CEM I) nebo struskový portlandský (CEM II) třídy 42,5 R nebo 52,5 R. Při volbě měrného povrchu cementu je nutné volit optimální hodnotu, která umožní dosažení potřebně zpracovatelnosti a pevnosti (v ČR 300 - 550 m²/kg). Při použití třídy cementu 52,5 R se obvykle dosahuje menší hodnoty ztekucení. Důležitá je

charakteristika slínku a množství obsaženého síranu vápenatého, který slouží jako regulátor tuhnutí. Pro snadnější ovlivnění reologie se doporučuje cement s nižším obsahem trikalciium aluminátu C_3A (do 10%), na němž závisí mechanismus a kinetika prvních reakcí tuhnutí. V některých druzích cementů se může vyskytovat větší množství minerálních příměsí nebo i superplastifikátorů v tuhé formě. Množství cementu představuje u HPC 15 - 22% hmotnosti kompozitové směsi, což odpovídá dávce 375 - 550 kg/m^3 kompozitu. V některých případech lze použít i dávky větší, ale do 700 kg/m^3 . Vedle pevnostní třídy a měrného povrchu cementu je také důležitým parametrem množství vody potřebné pro jeho hydrataci [5].



Obrázek č. 3: Cement [23]

2.2.2 Voda

Voda plní v betonové směsi dvojí funkci. Je to složka, která v betonu startuje hydratační proces cementu a její dávka má zásadní vliv na konzistenci a zpracovatelnost směsi. V běžné betonové směsi tvoří voda 6 - 7,2% hmotnosti, což představuje 150 - 180 kg/m^3 betonu a vodní součinitel okolo 0,5. U vysokohodnotných kompozitů je vysoké pevnosti a hutnosti dosaženo snížením obsahu vody na minimální hodnotu, která je k hydrataci cementových zrn potřeba. Veškerá voda nespotebovaná na hydrataci se odpaří, ve směsi vznikají póry a tím se snižuje pevnost a celková odolnost kompozitu. U vysokohodnotných betonů a kompozitů se vodní součinitel pohybuje v rozmezí 0,25 - 0,4, čímž se dosáhne požadované hutnosti směsi a minimalizuje se množství pórů. Pro vysoké pevnosti je hodnota vodního součinitele stlačena dokonce pod hodnotu 0,2 - pro

ultravysokohodnotné kompozity, které dosahují pevností přes 150 MPa je potřeba držet množství záměsové vody v rozsahu 120 - 130 l/m³ betonu. Požadované zpracovatelnosti pro takové betony je dosaženo přidáním větší dávky superplastifikátorů. Při dávkování je nutné snížit množství záměsové vody o hodnotu obsaženou v dávce tekutých superplastifikátorů. Je také potřeba přihlídnout k vlhkosti a nasákavosti použitého kameniva, jelikož změna jeho vlhkosti o 1% může znamenat změnu vodního součinitele o 2 setiny, což se u vysokohodnotného kompozitu projevuje výraznou změnou pevnosti a zpracovatelností směsi [5].

Jedním z nejdůležitějších parametrů použité vody je její kvalita. Je potřeba se vyvarovat vodě se sníženým (hladové vody, destilovaná voda) i příliš zvýšeným obsahem iontů (vody minerální). Naprosto vyloučená je například voda odpadní. Jako ideální se naopak jeví voda pitná [5].



Obrázek č. 4: Voda [28]

2.2.3 Kamenivo

Ve složení vysokohodnotných kompozitů se obecně objevují menší frakce kameniva, než tomu je u běžných betonů, a max. zrno kameniva by nemělo přesáhnout 10 - 12 mm. Větší frakce pro toto použití nejsou vhodné z důvodu nerovnoměrnosti kompozitu, výskytu dislokací a následnému snižování pevnosti. Vhodný tvar zrn kameniva je kubický nebo kulovitý. Pevnost kompozitu roste ruku v ruce s jeho hutností, tudíž by měla být jeho mezerovitost co nejmenší a je potřeba používat kamenivo s optimalizovanou granulometrickou křivkou.

2.2.4 Křemičitá moučka

Jedná se o rozemletý křemen o velikosti $< 75 \mu\text{m}$. Za normálních teplot se křemičitá moučka chová jako inertní materiál. Směsi s obsahem křemičité moučky a mikrosiliky vykazují obecně velkou hustotu a homogenní mikrostrukturu [6]. Pro snížení výrobní ceny vysokohodnotných kompozitů může být křemičitá moučka nahrazena přírodním pískem.

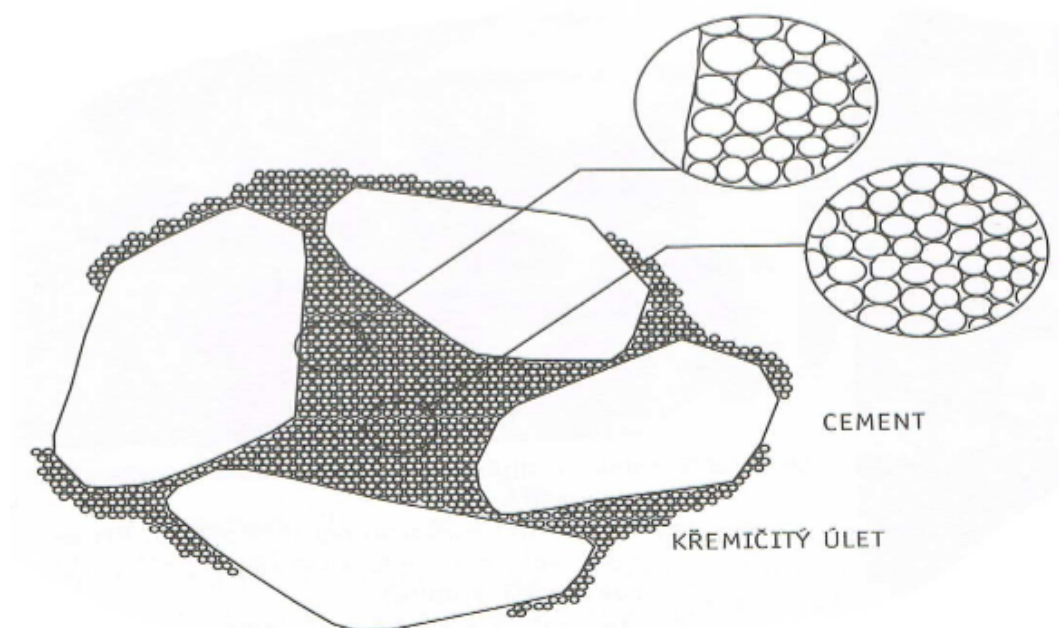


Obrázek č. 5: Křemičitá moučka [29]

2.2.5 Mikrosilika

Křemičitý úlet neboli mikrosilika je důležitou složkou ve vysokohodnotném kompozitu. Jedná se o amorfni minerální příměs, která je odpadním produktem v některých hutnických provozech [7]. V minulém století, hlavně před polovinou 70. let byla mikrosilika vypouštěna do ovzduší [8]. Mikrosilika je vedlejší produkt výroby ferosilicia a křemíku v elektrické peci [5]. Křemičitý úlet zvyšuje pevnost v důsledku pucolánové reakce za tvorby kalciumhydrosilikátů a je aktivním plnivem cementového kamene [7]. Důležitým efektem mikrosiliky je zlepšení mezifázových přechodových zón mezi pojivem a plnivem [9]. Jsou to velmi jemné částice SiO_2 kulovitého tvaru s průměrem 0,1 - 2 μm , což je 10x méně než u zrna cementu. Objemová hmotnost mikrosiliky se pohybuje kolem 2200 kg/m^3 a jeho specifický povrch se pohybuje v rozmezí

15000 - 25000 m²/kg. Kvalita mikrosiliky se hodnotí podle poměru obsahu SiO₂ a nečistot (alkálie, uhlík), pucolanitou, měrným povrchem částic a případně množstvím přítomné nežádoucí krystalické fáze. Dle teorie je možno do betonové směsi přidat 25 - 30% mikrosiliky z hmotnosti cementu, ale v praxi se toto množství pohybuje v rozmezí 3 - 10%. Při tomto dávkování se projevuje podstatný nárůst pevnosti. Jemné částice vyplňují mezery mezi zrny cementu, tudíž je pak cementová pasta hutnější a materiál se vyznačuje nižší porozitou [5].



Obrázek č. 6: Vyplnění mezer v cementu mikrosilikou [10]

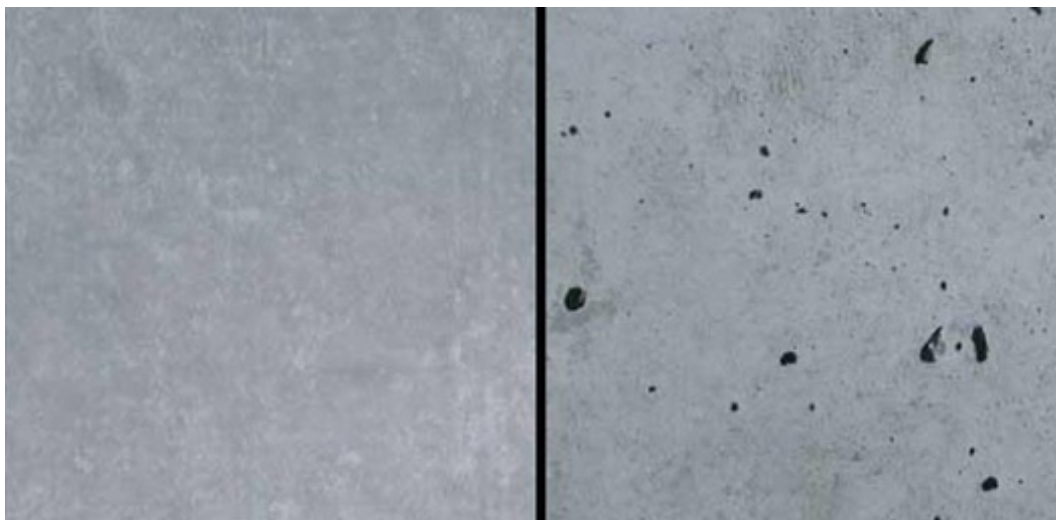
2.2.6 Superplastifikátory

Snížením hodnoty vodního součinitele dochází k rychlejšímu tuhnutí čerstvého betonu a zhoršení zpracovatelnosti směsi. Pro zajištění manipulovatelnosti a zpracovatelnosti dle požadavků a potřeb, je nutné zajistit potřebnou konzistenci jinými prostředky [5]. Superplastifikátory vstupují do hydratace cementu, kladně ovlivňují rozptýlení cementových zrn a rozpustnost síranů, které jsou zodpovědné za reologii a kompatibilitu směsi [5]. Díky tvorbě elektrostatických nábojů na povrchu zrn cementu při mletí vznikají shlukování těchto zrn tzv. flokule. Této flokulaci superplastifikátory zabraňují a umožňují tím

výrazně snížit dávku záměsové vody [10]. V dnešní době se používají 4 druhy superplastifikátorů: sulfonáty naftalenu, sulfonáty melaninu, lignosulfonáty s velmi malým obsahem sacharidů a polykarboxyláty (PCE superplastifikátory). Polykarboxyláty se z těchto čtyř jeví jako nejúčinnější. Důležitou roli pro účinnost superplastifikátorů je jejich kompatibilita s používaným druhem cementu a dalšími přísadami přidávanými do směsi [5].

2.2.7 Odpěňovače

Odpěňovací přísada je určena k vytěsnění vzduchových bublin z kompozitové směsi. Vzduch je vytěsňován během míchání, dopravy a hutnění. Vytěsněním vzduchových bublin se dosahuje vyšší hutnosti materiálu, tudíž je pak kompozit odolnější vůči mrazu a agresivnímu prostředí. Často se odpěňovací přísady také využívají pro vyhlazení povrchu kompozitu, což také přispívá k odolnosti materiálu. Dále snižují viskozitu a brání rozměšování směsi. Tyto přísady jsou nejčastěji vyráběny z látek na bázi esterů minerálních kyselin, polyglykolů a mastných kyselin [11].



Obrázek č. 7: Rozdíl povrchu kompozitu při použití odpěňovače [11]

3 Zkoušky betonu

3.1 Pevnost v tlaku

Jednou z nejdůležitějších charakteristik betonu je pevnost v tlaku. Pevnost betonu v tlaku je velikost napětí, kterého dosáhneme v místě porušení po zániku jeho celistvosti - pevnost, při které se zkoušené těleso poruší. Podle tvaru zkoušeného prvku se rozlišuje pevnost betonu v tlaku na krychelnou a válcovou. Pevnost v tlaku $f_{ck,cyl}$ se provádí na válcích o průměru 150 mm a výšce 300 mm a $f_{ck,cube}$ na krychlích o délce hrany 150 mm nebo na zlomcích trámečku po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu. Tyto zlomky mají rozměry 40 x 40 x 80 mm. Pevnost betonu se stanovuje po 28 dnech zrání betonu [12]. Zkouška se provádí na vyrobených vzorcích nebo na jádrových vývrtech o rozměrech normového zkušebního válce. Před započítáním zkoušky se ověřují rozměry a geometrie daného tělesa. Pokaždé se zkouší minimálně 3 zkušební vzorky, ze kterých se poté získává průměrná hodnota. Nestandardně porušené vzorky se ze skupiny vyloučí a jejich hodnoty nejsou do průměru započítávány [13].



Obrázek č. 8: Tlačný přípravek BTP 300 k drcení polovin trámečků

3.2 Pevnost v tahu ohybem

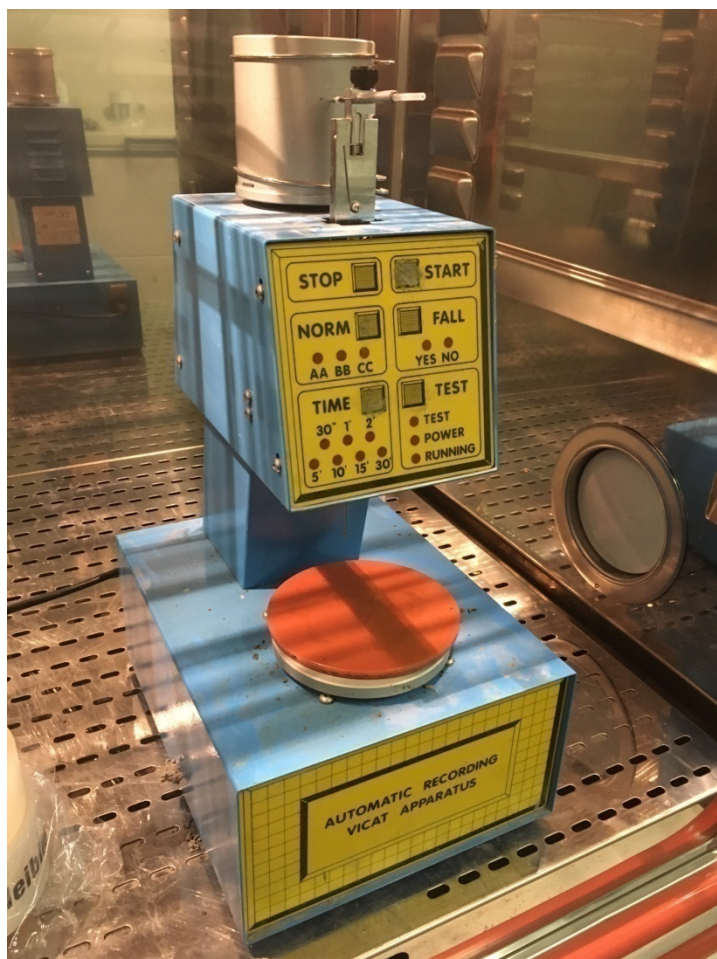
Zkouška betonu pevnosti v tahu ohybem se provádí na vzorcích o rozměrech 100 x 100 x 400 mm nebo 40 x 40 x 160 mm. Stejně jako u zkoušky pevnosti v tlaku se vždy provádí měření na minimálně třech vzorcích po 28 dnech zrání betonu. Před zkouškou je třeba ověřit rozměry a geometrii vzorku [14]. Zkušební těleso je vystaveno ohybovému momentu, který vzniká od zatížení přenášeného prostřednictvím horního zatěžovacího válečku v polovině délky vzorku. Spodní válečky slouží jako podpory a jsou ode sebe vzdáleny 100 mm. Porušení vzorku je očekáváno pod zatěžovacím válečkem. Zatěžování vzorku musí být plynulé, bez nárazu a rychlost zatěžování je konstantní až do porušení vzorku [15].



Obrázek č. 9: Ohybový přípravek BOP 15 k namáhání trámečků ohybem

3.3 Počátek a konec tuhnutí cementu

Počátek a konec tuhnutí cementu určujeme pomocí Vicatova přístroje za použití jehly o průřezu 1 mm^2 . Přístroj můžeme použít manuální nebo automatický. Vpichy provádíme v pravidelných časových intervalech a po každém vpichu pootočíme obroučku tak, aby od sebe byly vzdáleny 2 až 3 mm. Začátek tuhnutí je doba, která uplyne od přidání vody k cementu do okamžiku, kdy se jehla zastaví 3 - 5 mm nad podložkou. Konec tuhnutí nastává, když jehla pronikne nejvýše 0,5 mm pod povrch zkoušeného cementu nebo směsi. Doba tuhnutí je doba mezi začátkem a koncem tuhnutí směsi nebo cementu. Výsledky těchto zkoušek se uvádějí v minutách nebo hodinách [16].



Obrázek č. 10: Automatický Vicatův přístroj

3.4 Modul pružnosti betonu

Modul pružnosti betonu E vyjadřuje závislost mezi přetvořením ε a namáháním neboli napětím σ ztvrdlého betonu. Je to jedna ze základních charakteristik betonu používaná pro výpočet deformací v čase. Závisí na složení betonu, vlastnostech a kvalitě kameniva. Stejně jako u pevnosti betonu závisí na složení čerstvého betonu a pokud chceme modul pružnosti změnit, je třeba změnit složení směsi:

- změna vodního součinitele,
- změna kameniva (kvalita, druh, čára zrnitosti, množství),
- změna druhu a kvality cementu,
- změna druhu a množství příměsí a přísad.

Je třeba si uvědomit, že snahou zvýšit například pevnost betonu se může modul pružnosti naopak snížit. Modul pružnosti nabývá v čase, tím pádem má zralý beton vyšší modul pružnosti než beton mladý. Beton s vyšším modulem pružnosti je odolnější vůči projevům deformace při stejném zatížení [17].



Obrázek č. 11: Ultrazvukový měřič modulu pružnosti - Vikasonic

4 Multifunkční silikátový kompozit

Prefabrikované směsi pro přípravu betonů jsou dnes již běžně známé. Směsi jsou na místo určení dopravovány již připravené k použití nebo jsou připravovány přímo na stavbě přidáním záměsové vody. Suché prefabrikované směsi mají několik základních součástí. Je to pojivová matrice, která zajišťuje soudržnost tuhnoucího betonu, plniva a regulační systémy, které zajišťují kontrolovatelné tuhnutí a tvrdnutí kompozitu [18].

Multifunkční silikátový kompozit (MSK) je nový typ vysokohodnotných kompozitů, které se v posledních letech vyvíjejí v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze [19]. Jednotlivé složky multifunkčního silikátového kompozitu jsou běžně dostupné od komerčních dodavatelů a jejich pojivové složky jsou k mání od českých cementářských firem z lokalit Lochkov, Čížkovice, Mokrý, Prachovice a Hranice. Potřebné přísadové systémy v práškovém stavu jsou k dispozici od firem SIKA, BASF, STACHEMA, CHRYSO, RADKA a dalších. Hrubší součásti plniv i mikroplniva jsou také běžně dostupné na domácím trhu v různých cenových relacích [18].



Obrázek č. 12: Výroba suché prefabrikované směsi [24]

Tento kompozit je tvořen ze složek s širokými možnostmi variant jeho složení [19]. Kombinace těchto složek a jejich, někdy i protichůdných, parametrů vedou k výhodnému efektu [18]. MSK lze použít jak pro běžné aplikace na nenáročných konstrukcích, tak i pro použití v extrémních podmínkách, například při zatížení nízkou teplotou. Jeho hlavními přednostmi jsou:

- programovatelnost vytvrzovacích procesů založených na hydraulickém principu,
- dosažení požadované zpracovatelnosti čerstvé směsi za použití nízkého vodního součinitele,
- nenáročné požadavky na způsob zpracování a ukládání materiálu na místo spotřeby,
- objemová stabilita kompozitu v průběhu vytvrzování v různých zatěžovacích podmínkách [19].



Obrázek č. 13: Výrobní linka - MSK v pytlovaném balení [24]

4.1 Využití MSK v kolejovém loži pražského metra

Na základě inovačních programů skupiny Služby, stavby a tratě Dopr. Podniku hl. m. Prahy - dopravní cesta Metro bylo realizováno ověření dynamické stability multifunkčního silikátového kompozitu pro aplikace v kolejovém loži pražského metra [19].

Plastbetonové lavice, které se doposud používají v kolejovém svršku pražského metra mají některé nevýhody i při dokonalém zpracování. Mezi ně patří například potenciální nesplnění požadavků na zdravotní nezávadnost, nedostatečně rychlý nárůst požadovaných pevností v tlaku a vysoká cena. Materiál vhodný na realizaci podkladové lavice kolejového svršku metra musí splňovat několik základních požadavků jako jsou:

- rychlý nárůst pevností v tlaku min. 20 - 30 MPa do 4 - 5 hodin,
- dosažení vysoké dynamické stability v raném stáří,
- rychlá technologie přípravy, doprava a jednoduchá zpracovatelnost,
- zdravotně nezávadný materiál,
- rychlost a jednoduchost aplikace např. v nočních hodinách,
- co nejnižší elektrická vodivost,
- nízké náklady na materiál [19].

Všem těmto požadavkům velice dobře vyhovuje výše zmiňovaný multifunkční silikátový kompozit. Jeho vlastnosti byly v první fázi ověřovány Vědeckovýzkumným centrem Praha ve spolupráci s Experimentálním centrem Fakulty stavební ČVUT v Praze [19]. Výsledky těchto zkoušek jsou zveřejněny ve zprávě Vědeckovýzkumného centra Praha [20]. Druhou fází bylo ověřování chování tohoto materiálu při zatěžování účinky nápravových / kolových tlaků, které bylo provedeno opět ve spolupráci s Vědeckovýzkumným centrem Praha [21]. Dále byly zkoumány vlastnosti multifunkčního silikátového kompozitu při dlouhodobém dynamickém namáhání již od raného stáří [19]. V této práci se budeme zabývat zkouškami multifunkčního silikátového kompozitu, který bude namáhán nízkými teplotami již v raném stáří.



Obrázek č. 14: Podbetonávka bezpražcového uložení z MSK

4.2 Vysprávkové směsi

Sanace betonů a vysprávkové směsi je velmi široké téma. Stejně tak i normy a definice, které se touto záležitostí zabývají, jsou velice obsáhlé [22]. U vysprávkových směsí betonových konstrukcí jsou kladeny vysoké požadavky na jejich kvalitu, parametry při zpracování a průběh jejich životnosti. Je potřeba, aby zaujaly místo po stávajícím nevyhovujícím materiálu a fungovaly v konstrukci lépe. Tyto parametry musejí být ověřovány kontrolními zkouškami v laboratořích, kde jsou vzorky směsí namáhány různými způsoby zatížení.

Vysprávkové směsi na opravu betonových povrchů a vrstev nezatížených provozem vyžadují:

- soudržnost vrstev hmot pro sanaci podle ČSN 73 6242,
- odolnost proti působení chemických rozmrazovacích látek,
- pevnost v tlaku 30 MPa pro opravy nosných prvků,
- pevnost v tlaku 25 MPa pro opravy ostatních částí konstrukce,
- pevnost v tahu ohybem 5,5 MPa,
- objemová hmotnost směsi po vytvrdnutí minimálně 1800 kg/m³,
- pH > 11,
- nenáchylnost směsi po vytvrdnutí na tvorbu trhlin [22].

Nedílnou součástí všech sanačních prací je hned na začátku příprava povrchu sanovaného betonu, která zahrnuje odstranění všech narušených částí a všech vrstev zasažených agresivními látkami. Homogenní struktura betonu nesmí být narušena trhlinami, mikrotrhlinami a nesmí dojít k drcení betonu. Také nesmí dojít ke snížení statické způsobilosti povrchových vrstev betonu při jejich odstraňování [22].

Tyto požadavky splňuje multifunkční silikátový kompozit a jeví se jako ideální materiál k realizaci sanačních a vysprávkových prací. Jeho proces vytvrzování se dá volitelně regulovat, nárůst počátečních pevností je více než dostatečný a při dodržení technologických postupů při přípravě povrchu sanovaného betonu disponuje velice dobrou soudržností.



Obrázek č. 15: Příklad betonové konstrukce před sanací [26]

5 Experimentální program

5.1 Materiál

Pro dále popsané zkoušky byla použita směs multifunkčního silikátového kompozitu s rychlým náběhem počátečních pevností - MSK 1, která byla vyvinuta v Experimentálním centru Fakulty stavební ČVUT v Praze. Tato verze směsi MSK je nastavena tak, aby se počátek a konec tuhnutí dostavil co nejdříve od kontaktu vody s cementem, a to cca po 15 minutách. Jelikož je tato směs chráněná patentem, není možné uvést procentuální zastoupení jednotlivých složek. Hlavní složky této směsi jsou cement, mikrosilika, jemné kamenivo, plastifikátor a odpeňovač. Směs MSK 1 je dodávána v prefabrikovaném pytlovaném balení od firmy Stachema. Prefabrikovanou výrobou se odstraní rozdílné dávkování jednotlivých složek a je tak jistota, že se pracuje s totožným materiálem i v rámci výzkumu. Pytlovaná verze je ideální pro laboratorní podmínky, vysrávky malého rozsahu, a také pro manipulaci v Pražském metru, kde je tato směs v současné době používána pro bezpražcové uložení kolejnic.

5.2 Zkušební vzorky

Pro zkoušky pevnosti kompozitu v tlaku a tahu ohybem byly vyrobeny trámečky o rozměrech 40 x 40 x 160 mm. Před začátkem betonáže byla nastavena požadovaná teplota v chladícím boxu (10, 0, -5 °C), poté byly formy očištěny a vymazány olejem pro lepší odbedňování. Po vymazání se formy přesunuly do chladícího boxu a byly temperovány na nastavenou teplotu. Během temperování forem se připravila směs pro betonáž. Do prefabrikované směsi se přidala přísada v práškové formě, která působila jako urychlovač tuhnutí a zároveň jako plastifikátor. Všechny složky výsledného kompozitu byly dávkovány dle následující tabulky.

Tabulka č. 1: Dávkování složek

Název	MSK 1 [kg]	Přísada [g]	Voda [g]
Množství	3.5	8.75	320

Po navážení všech složek kompozitu se přidala přísada do vody a míchalo se až do úplného rozpuštění prášku. Poté se část směsi rozmíchala s vodou ručně a vzápětí se míchací nádoba vložila do laboratorní míchačky, kde se směs míchala 2 minuty. Jelikož byl chladicí box v jiné laboratoři, tak se směs domíchala ručně až do jejího ztekucení. Celková doba míchání směsi byla 3,5 minuty. Čerstvá směs byla uložena do připravených forem, které při dané konzistenci nebylo nutné umísťovat na vibrační stolek. Formy byly zakryty folií, aby nedocházelo k nechtěnému odpařování vody. Odformování bylo provedeno po pěti hodinách a u vybraných vzorků byla ihned provedena zkouška pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu. Nezkoušené vzorky byly vloženy do polyetylenových sáčků a ponechány v chladicím boxu. Následující den se vzorky po 24 hodinách vyjmuly z chladicího boxu a byly vloženy do boxu skladovacího s laboratorní teplotou cca 20°C. Následně byly vzorky zkoušeny dle předepsaného harmonogramu. Referenční vzorky byly do forem vkládány a uchovávány mimo chladicí box při laboratorní teplotě 20°C.



Obrázek č. 16: Příprava referenčních vzorků při laboratorní teplotě

Společně s výrobou vzorků se v chladícím boxu prováděla zkouška Vicatovým přístrojem a měření nárůstu modulu pružnosti. Pro zjištění doby počátku a konce tuhnutí se naplnila forma směsí a vložila se do automatického přístroje, který byl osazen zkušební jehlou. Po dokončení zkoušky byl vyjmut a uložen záznam. Měření nárůstu modulu pružnosti se provádělo na ultrazvukovém přístroji Vikasonic od firmy Schleibinger Geräte. Přístroj byl uložen mimo chladné prostředí a forma přístroje byla vložena a temperována v chladícím boxu. Po dosažení požadované teploty byla do formy vložena směs. Vzorek byl temperován po celou dobu zkoušky.



Obrázek č. 17: Připravená forma pro měření nárůstu modulu pružnosti

6 Výsledky

6.1 Pevnost MSK 1 v tahu ohybem

Na zkušebních trámečcích o rozměrech 40 x 40 x160 mm byla jako první ze dvou destruktivních zkoušek prováděna zkouška v tahu ohybem. Zkoušky byly prováděny dle následující tabulky.

Tabulka č. 2: Harmonogram zkoušek

MSK 1	20°C	10°C	0°C	-5°C
5 hodin	•	•	/	/
1 den	•	•	•	•
3 dny	/	/	•	•
7 dní	/	/	•	•
28 dní	•	•	•	•

Po vyjmutí vzorků z chladicího boxu byly vzorky očištěny a povrch byl vysušen hadříkem. Vzorky byly zváženy na laboratorní váze a následně byly změřeny jejich rozměry.



Obrázek č. 18: Měření připraveného vzorku

Před samotnou zkouškou byl nejprve připraven hydraulický lis. Jelikož je lis osazen dvěma kruhovými tlačnými deskami, bylo potřeba použít ohybový přípravek BOP 15. Po překontrolování správného uložení a vycentrování přípravku i samotného vzorku se mohlo přistoupit ke zkoušce. Výsledky měření všech vzorků jsou uvedeny v tabulkách a dále porovnány v následujícím grafu. V tabulce jsou uvedeny naměřené rozměry a hmotnosti jednotlivých vzorků, výsledné hodnoty v grafu jsou průměrem tří vzorků z každé série.



Obrázek č. 19: Vzorek před zatížením



Obrázek č. 20: Kolaps vzorku

Tabulka č. 3: Pevnost v tahu ohybem série A - teplota 20°C

Vzorky A MSK 1 20°C	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
A1	594	40.15	1606	0.60	1.41
A2	591	40.45	1618	0.60	1.41
A3	596	40.50	1620	0.60	1.41
Průměrná pevnost v tahu - A - 5 hodin					1.41
A4	590	40.50	1620	2.60	6.09
A5	600	41.10	1644	2.65	6.21
A6	598	40.90	1636	2.75	6.45
Průměrná pevnost v tahu - A - 1 den					6.25
A7	600	41.20	1648	5.50	12.89
A8	608	41.60	1664	5.60	13.13
A9	602	40.90	1636	5.45	12.77
Průměrná pevnost v tahu - A - 28 dní					12.93

Tabulka č. 4: Pevnost v tahu ohybem série B - teplota 10°C

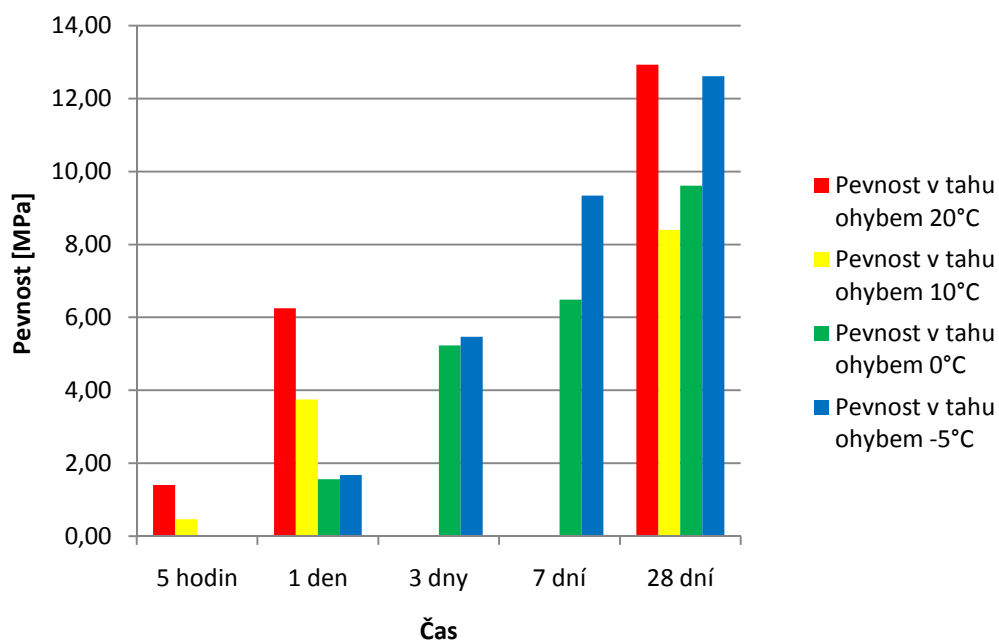
Vzorky B MSK 1 10°C	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
B1	600	41.45	1658	0.20	0.47
B2	605	41.50	1660	0.20	0.47
B3	595	41.15	1646	0.20	0.47
Průměrná pevnost v tahu - B - 5 hodin					0.47
B4	598	40.30	1612	1.60	3.75
B5	595	41.00	1640	1.65	3.87
B6	601	41.10	1644	1.55	3.63
Průměrná pevnost v tahu - B - 1 den					3.75
B7	602	40.80	1632	3.60	8.44
B8	600	40.50	1620	3.65	8.55
B9	601	40.70	1628	3.50	8.20
Průměrná pevnost v tahu - B - 28 dní					8.40

Tabulka č. 5: Pevnost v tahu ohybem série C - teplota 0°C

Vzorky C MSK 1 0°C	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
C1	605	41.00	1640	0.65	1.52
C2	600	40.50	1620	0.65	1.52
C3	600	40.80	1632	0.70	1.64
Průměrná pevnost v tahu - C - 1 den					1.56
C4	595	40.60	1624	2.15	5.04
C5	590	40.80	1632	2.35	5.51
C6	600	40.90	1636	2.20	5.16
Průměrná pevnost v tahu - C - 3 dny					5.23
C7	580	40.90	1636	2.55	5.98
C8	580	40.60	1624	2.75	6.45
C9	576	40.50	1620	3.00	7.03
Průměrná pevnost v tahu - C - 7 dní					6.48
C10	603	40.20	1608	4.00	9.38
C11	609	40.30	1612	4.00	9.38
C12	612	40.30	1612	4.30	10.08
Průměrná pevnost v tahu - C - 28 dní					9.61

Tabulka č. 6: Pevnost v tahu ohybem série D - teplota -5°C

Vzorky D MSK 1 -5°C	Hmotnost [g]	Výška [mm]	Plocha [mm ²]	Síla [kN]	Pevnost v tahu ohybem [MPa]
D1	600	40.6	1624	0.75	1.76
D2	595	40.6	1624	0.7	1.64
D3	601	40.8	1632	0.7	1.64
Průměrná pevnost v tahu - C - 1 den					1.68
D4	602	40.9	1636	2.2	5.16
D5	595	40.3	1612	2.5	5.86
D6	600	40.8	1632	2.3	5.39
Průměrná pevnost v tahu - C - 3 dny					5.47
D7	610	40.9	1636	4	9.38
D8	608	40.6	1624	3.9	9.14
D9	610	40.8	1632	4.05	9.49
Průměrná pevnost v tahu - C - 7 dní					9.34
D10	602	40.8	1632	5.2	12.19
D11	608	40.9	1636	5.5	12.89
D12	600	41	1640	5.45	12.77
Průměrná pevnost v tahu - C - 28 dní					12.62



Obrázek č. 21: Vykreslení průměrných pevností v tahu ohybem

6.2 Pevnost MSK 1 v tlaku

Zkouška pevnosti v tlaku se prováděla u každého vzorku z 2 polovin, které jsme získali po dokončení zkoušky pevnosti v tahu ohybem. Rozměry vzorků byly tedy 40 x 40 x 80 mm. Do lisu se osadil tlačný přípravek BTP 300 k drcení polovin trámečků. Rozměry tlačných ploch jsou 40 x 40 mm. Stejně jako u předchozí zkoušky bylo potřeba pečlivě vycentrovat přípravek i vzorek, aby nedocházelo k excentrickému zatížení a tím pádem k naměření nepřesných hodnot. Jelikož zkouška pevnosti v tlaku přímo navazovala na zkoušku v tahu ohybem, jsou tudíž harmonogramy totožné.



Obrázek č. 22: Laboratorní lis

Na následujících fotografiích je zachycen vzorek během zkoušky a jeho destrukce. Výsledky zkoušek všech vzorků jsou uvedeny v následujících tabulkách a dále porovnány v grafu. V tabulce jsou uvedeny pevnosti jednotlivých vzorků a výsledné hodnoty v grafu jsou průměrem tří vzorků z každé série.



Obrázek č. 23: Vzorek před zatížením



Obrázek č. 24: Porušení vzorku zatížením



Obrázek č. 25: Ideální tvar zkoušeného tělesa po porušení

Tabulka č. 7: Pevnost v tlaku série A - teplota 20°C

Vzorky A MSK 1 20°C	Plocha [mm ²]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Pevnost v tlaku 1 [MPa]	Pevnost v tlaku 2 [MPa]	Průměr pevnosti v tlaku [MPa]
A1	1606	4.90	5.10	3.06	3.19	3.13
A2	1618	5.50	5.90	3.44	3.69	3.56
A3	1620	6.10	6.50	3.81	3.84	3.83
Pevnost v tlaku - A - 5 hodin				3.44	3.57	3.51
A4	1620	57.00	58.00	35.63	36.25	35.94
A5	1644	58.50	58.50	36.56	36.56	36.56
A6	1636	59.00	58.00	36.88	36.25	36.56
Pevnost v tlaku - A - 1 den				36.35	36.35	36.35
A7	1648	141.00	136.00	88.13	85.00	86.56
A8	1664	137.00	141.00	85.63	88.13	86.88
A9	1636	139.00	140.00	86.88	87.50	87.19
Pevnost v tlaku - A - 28 dní				86.88	86.88	86.88

Tabulka č. 8: Pevnost v tlaku série B - teplota 10°C

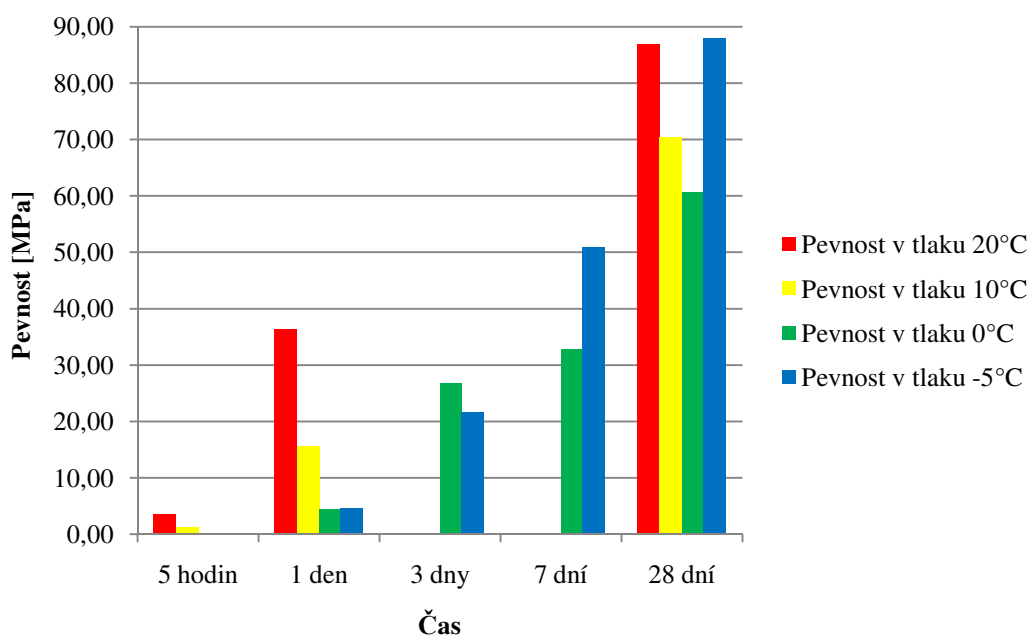
Vzorky B MSK 1 10°C	Plocha [mm ²]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Pevnost v tlaku 1 [MPa]	Pevnost v tlaku 2 [MPa]	Průměr pevnosti v tlaku [MPa]
B1	1658	2.45	1.90	1.53	1.19	1.36
B2	1660	1.80	1.80	1.13	1.13	1.13
B3	1646	1.85	1.70	1.16	1.06	1.11
Pevnost v tlaku - B - 5 hodin				1.27	1.13	1.20
B4	1612	24.60	25.60	15.38	16.00	15.69
B5	1640	24.00	23.50	15.00	14.69	14.84
B6	1644	26.00	25.50	16.25	15.94	16.09
Pevnost v tlaku - B - 1 den				15.54	15.54	15.54
B7	1632	114.00	109.00	71.25	68.13	69.69
B8	1620	115.00	110.00	71.88	68.75	70.31
B9	1628	112.00	116.00	70.00	72.50	71.25
Pevnost v tlaku - B - 28 dní				71.04	69.79	70.42

Tabulka č. 9: Pevnost v tlaku série C - teplota 0°C

Vzorky C MSK 1 0°C	Plocha [mm ²]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Pevnost v tlaku 1 [MPa]	Pevnost v tlaku 2 [MPa]	Průměr pevnosti v tlaku [MPa]
C1	1640	7.1	7.3	4.44	4.56	4.50
C2	1620	7	7.3	4.38	4.56	4.47
C3	1632	7.3	7.35	4.56	4.59	4.58
Pevnost v tlaku - C - 1 den				4.46	4.57	4.52
C4	1624	42	43.5	26.25	27.19	26.72
C5	1632	42	44	26.25	27.50	26.88
C6	1636	41.5	44	25.94	27.50	26.72
Pevnost v tlaku - C - 3 dny				26.15	27.40	26.77
C7	1636	52.5	50.5	32.81	31.56	32.19
C8	1624	52.5	52	32.81	32.50	32.66
C9	1620	53	54.5	33.13	34.06	33.59
Pevnost v tlaku - C - 7 dní				32.92	32.71	32.81
C10	1608	110	103.5	68.75	64.69	66.72
C11	1612	105	98	65.63	61.25	63.44
C12	1612	80	85	50.00	53.13	51.56
Pevnost v tlaku - C - 28 dní				61.46	59.69	60.57

Tabulka č. 10: Pevnost v tlaku série D - teplota -5°C

Vzorky D MSK 1 - 5°C	Plocha [mm ²]	Síla 1 [kN]	Síla 2 [kN]	Pevnost v tlaku 1 [MPa]	Pevnost v tlaku 2 [MPa]	Průměr pevnosti v tlaku [MPa]
D1	1624	7.3	7.6	4.56	4.75	4.66
D2	1624	8.3	7	5.19	4.38	4.78
D3	1632	7	7	4.38	4.38	4.38
Pevnost v tlaku - C - 1 den				4.71	4.50	4.60
D4	1636	33.5	34	20.94	21.25	21.09
D5	1612	34	34.5	21.25	21.56	21.41
D6	1632	36.5	35.5	22.81	22.19	22.50
Pevnost v tlaku - C - 3 dny				21.67	21.67	21.67
D7	1636	81	82.5	50.63	51.56	51.09
D8	1624	80	83	50.00	51.88	50.94
D9	1632	82	80	51.25	50.00	50.63
Pevnost v tlaku - C - 7 dní				50.63	51.15	50.89
D10	1632	143	144	89.38	90.00	89.69
D11	1636	139	136	86.88	85.00	85.94
D12	1640	140	142	87.50	88.75	88.13
Pevnost v tlaku - C - 28 dní				87.92	87.92	87.92



Obrázek č. 25: Vykreslení průměrných pevností v tlaku

6.3 Modul pružnosti

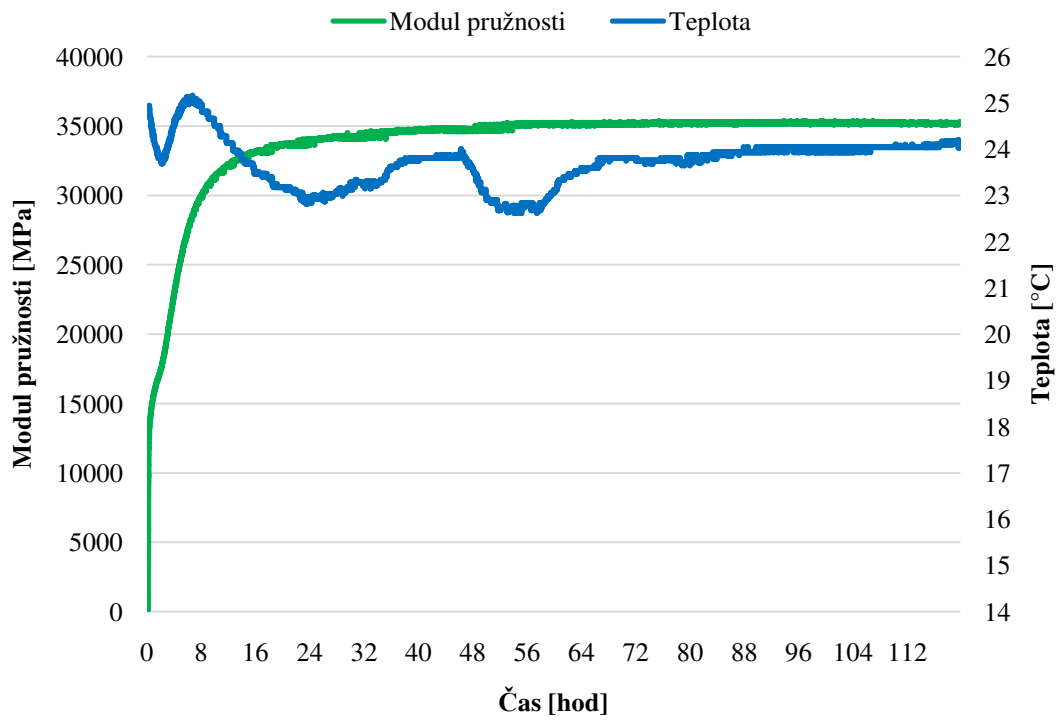
Pro zjištění nárůstu modulu pružnosti v čase jsme použili ultrazvukový přístroj Vikasonic. Před samotným měřením se důkladně vymazala forma olejem pro lepší odformování. Na snímací plochy se naněsl ultrazvukový gel, který se spolu s částmi přístroje zakryl folií, aby nedošlo k jejich poškození a znečištění. Pro kontinuální monitorování teploty a nárůstu hydratačního tepla se osadil snímač teploty a celá forma byla vložena do chladicího boxu. Po dosažení požadované teploty se navázila a namíchala čerstvá směs MSK 1 a vložila se do formy. Forma se pro zvýšení přitlaku zatížila. Zkouška probíhala cca týden a po celou dobu jejich trvání se udržovala stálá teplota. Po dokončení měření se získaná data přenesla do výpočetního zařízení. Pro možnost porovnání chování kompozitu při různých teplotách byly doby měření přizpůsobeny nejkratšímu intervalu, tj. 5 dní. Maximální hodnoty modulu pružnosti jsou uvedeny v následující tabulce a průběh nárůstu modulu pružnosti a průběh teplot je znázorněn v grafech.

Tabulka č. 11: Modul pružnosti po 5 dnech

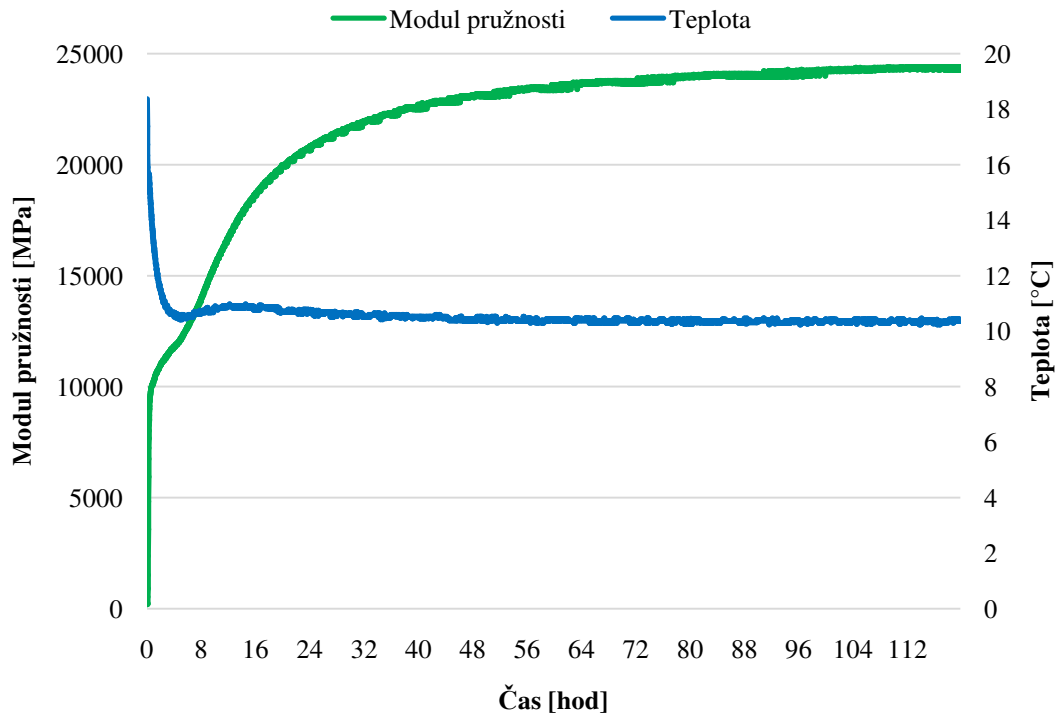
MSK 1 - 5 dní	20°C	10°C	0°C	-5°C
Modul pružnosti [GPa]	35.16	24.36	28.52	33.13



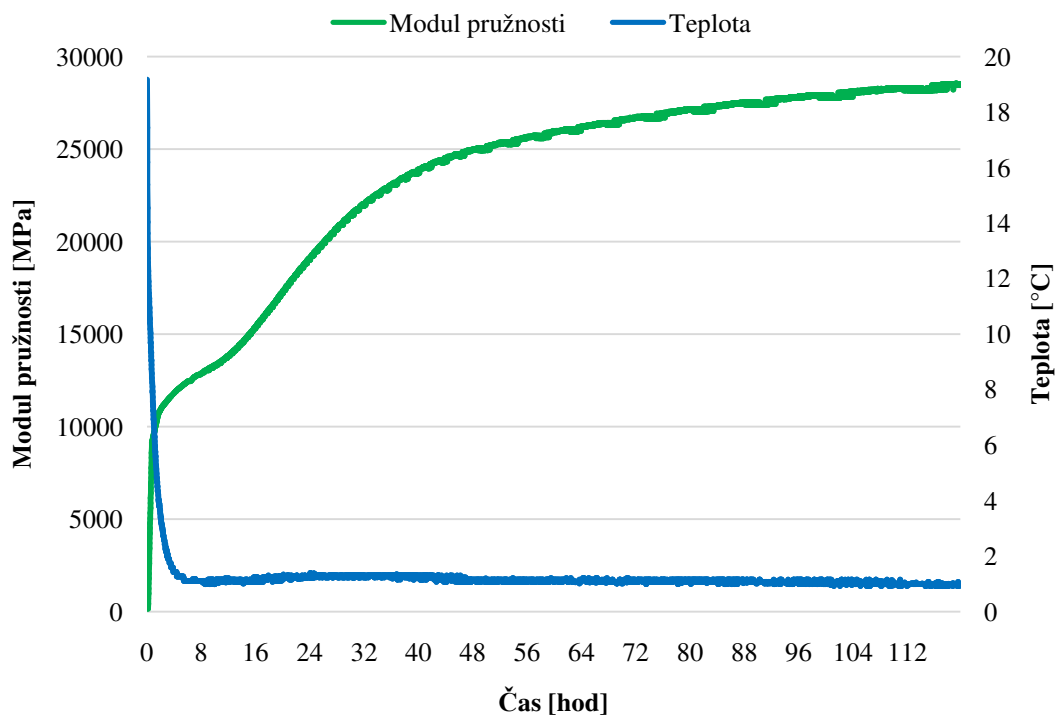
Obrázek č. 26: Chladicí box



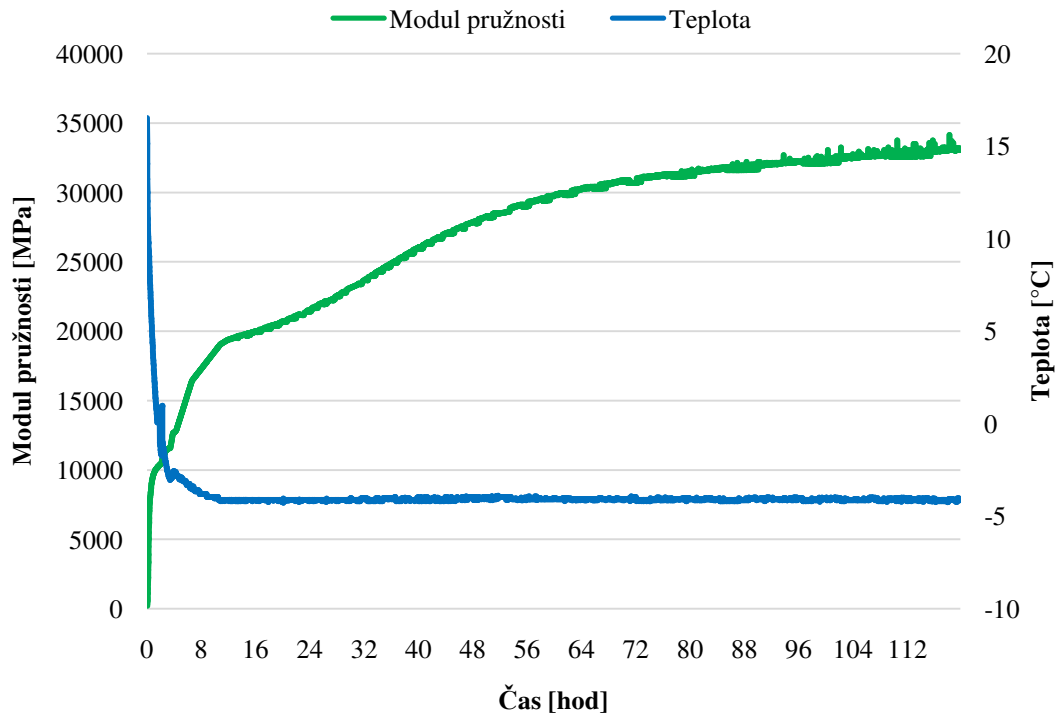
Obrázek č. 27: Průběh modulu pružnosti při 20°C



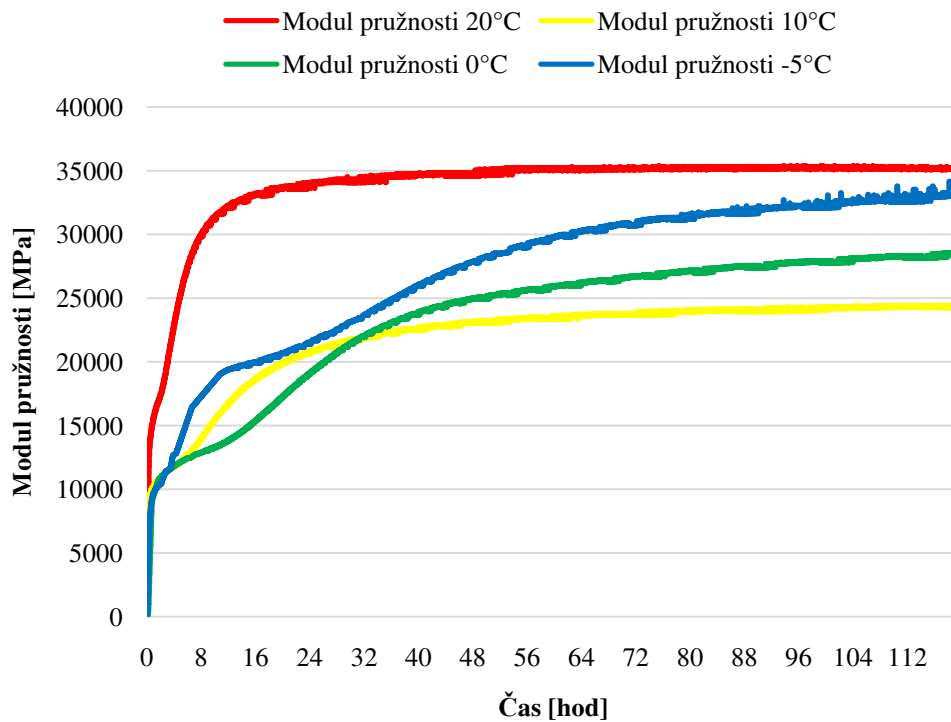
Obrázek č. 28: průběh modulu pružnosti při 10°C



Obrázek č. 29: Průběh modulu pružnosti při 0°C



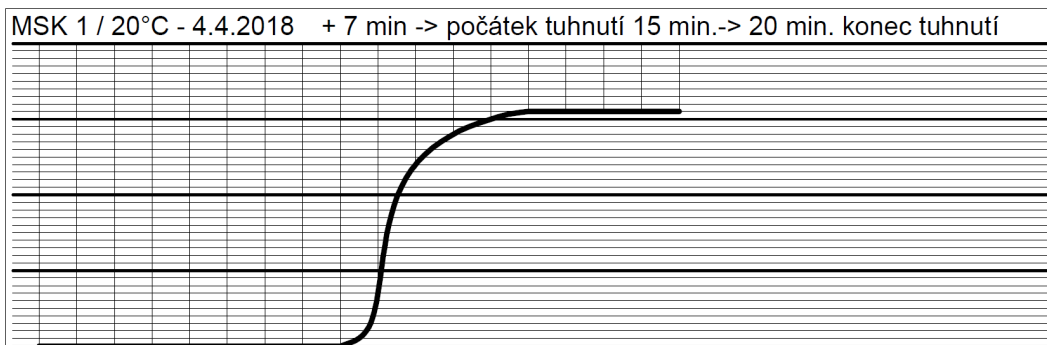
Obrázek č. 30: Průběh modulu pružnosti při -5°C



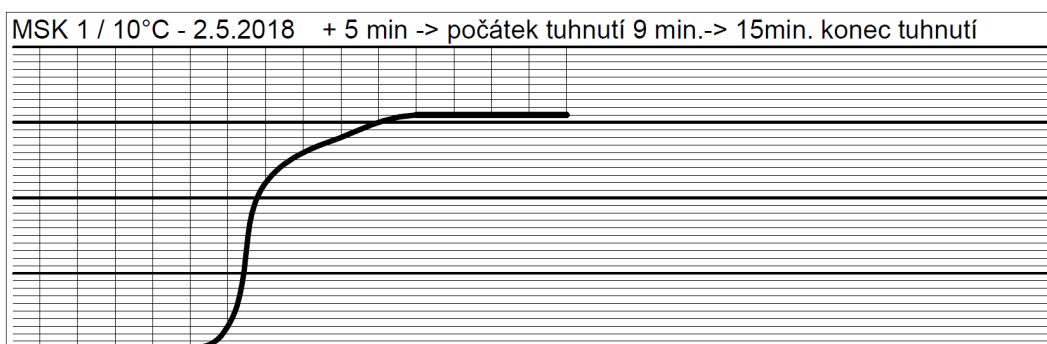
Obrázek č. 31: Porovnání všech průběhů modulu pružnosti

6.4 Doby tuhnutí

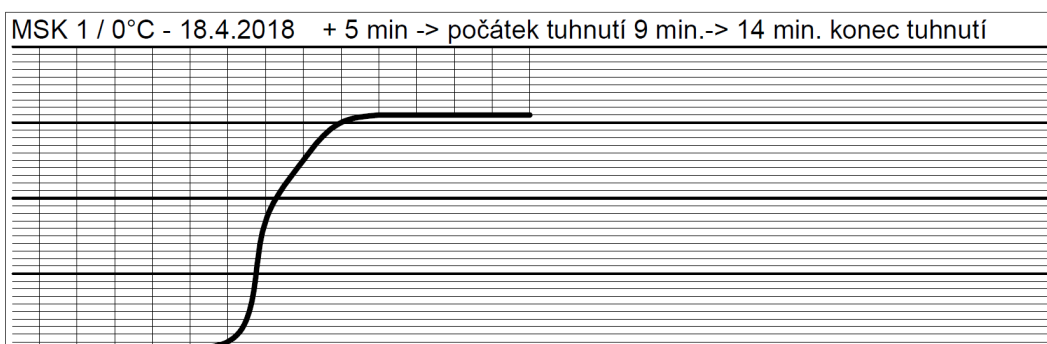
Zkouška dob tuhnutí kompozitu probíhala zároveň s měřením modulu pružnosti za stejných teplot. K zjištění dob tuhnutí jsme použili automatický Vicatův přístroj. Přístroj byl vložen do chladicího boxu společně se zkoušeným materiálem. Přístroj byl osazen zkušební jehlou o průřezu 1 mm^2 a vpichy prováděl v intervalech 1 minuty za současného pootáčení vzorku. Hodnoty byly zaznamenávány na předtištěný proužek papíru umístěný na vrchní části přístroje a následně byly překresleny v grafickém programu AutoCad. Výsledky měření jsou uvedeny na následujících grafech.



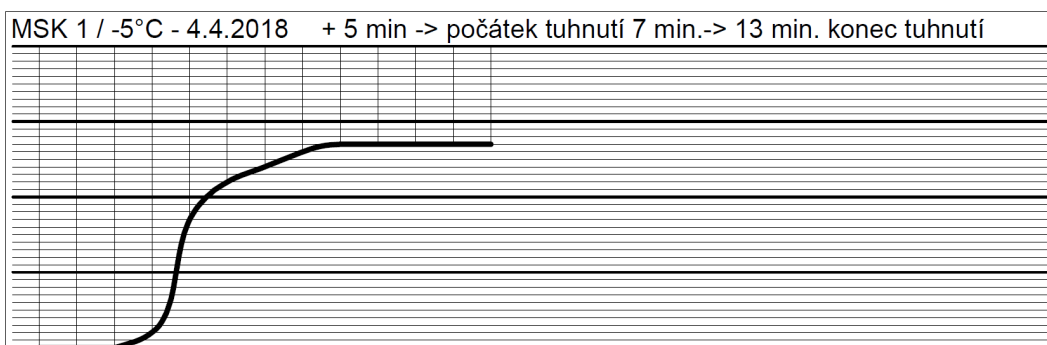
Obrázek č. 32: Graf z Vicatova přístroje při 20°C



Obrázek č. 33: Graf z Vicatova přístroje při 10°C



Obrázek č. 34: Graf z Vicatova přístroje při 0°C



Obrázek č. 35: Graf z Vicatova přístroje při -5°C

7 Závěr

7.1 Diskuse a zhodnocení

Cílem této práce bylo zjistit, jak se chová prefabrikovaný multifunkční silikátový kompozit za nízkých teplot v raném stáří. Jednalo se o počáteční nárůst pevnosti v tlaku a tahu ohybem, dále o dobu zpracovatelnosti a nárůst modulu pružnosti. Vyrobeno bylo celkem 42 vzorků o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které byly zkoušeny destruktivní metodou. Zjištění modulu pružnosti a dob tuhnutí se provádělo přímo na čerstvé směsi. Dle očekávání se potvrdilo, že nízká teplota má negativní vliv na počáteční vytvrzovací procesy kompozitu. Pokud kompozit nemá dostatečnou teplotu v rané fázi vytvrzování, je jeho vytvrzovací proces značně zpomalen. Naopak při pomalém vytvrzovacím procesu pak kompozit nabývá vyšších a stabilnějších pevností než je tomu při laboratorních teplotách, jelikož má více času na stavbu struktury pojiva. Podle výsledků lze říci, že při teplotách 10 a 0°C se pevnost v tlaku snižovala, naopak při teplotě -5°C rapidně stoupla a dosáhla vyšších hodnot než referenční vzorek. U pevnosti v tahu ohybem se pevnost při teplotách 10, 0 a -5°C postupně zvyšovala a při teplotě -5°C se přiblížila k hodnotám pevnosti referenčního vzorku. Ukázalo se tedy, že pokud je požadován rychlý nárůst pevností, je potřeba materiálu poskytnout odpovídající teplotní podmínky, ale také je schopen dosáhnout velice vysokých hodnot i pod bodem mrazu, což je u vysprávkových prací velkým přínosem. Z naměřených dat je zřejmé, že se doba zpracovatelnost směsi zkracuje s klesáním teploty. Doba počátku tuhnutí se z 15 minut při laboratorní teplotě zkracuje až na méně než polovinu, tj. 7 minut při teplotě -5°C. I při takto krátkém intervalu zpracování je však možné tuto směs plně využít například při sanaci malých ploch nebo zhotovování prvků o malých rozměrech. Modul pružnosti má nejvyšší nárůst při laboratorní teplotě, ale již po dvou dnech se ustaluje. Naopak při teplotě -5°C je počáteční náběh pomalejší a po třech dnech stále rovnoměrně stoupá. Zkoušky byly zkráceny podle nejkratšího intervalu, ale víme, že při teplotě -5°C bylo po 7 dnech měření dosaženo vyšší hodnoty modulu pružnosti než u teploty laboratorní.

Za těchto podmínek však bohužel není daná směs vhodná pro využití v kolejovém loži pražského metra, jelikož při nízkých teplotách není dosaženo požadovaných vlastností. Pro možnost využití za těchto podmínek by se musela přijmout nutná opatření, jako je například předeřtí podkladu, přidání teplé záměsové vody nebo dodatečné temperování prvku. Chování směsi v takových podmínkách bude zajisté předmětem dalších zkoušek.

7.2 Směr dalšího výzkumu

V návaznosti na tuto práci bych se rád danou problematikou dále zabýval. Zpracovatelnost a rychlejší náběh počátečních pevností by mohlo zlepšit přidání teplé záměsové vody nebo počáteční temperace vzorku na vyšší teplotu a až poté namáhání teplotami nižšími. To by mohlo zaručit vyšší počáteční pevnosti a následné pomalé vytvrzování prvku, čímž by se mohlo dosáhnout vyšších pevností než při vytvrzování v laboratorních podmínkách. Jelikož se jedná o nastavení směsi, která je určena pro vysprávkové práce nebo malé prvky, je možné tyto opatření dobře zajistit i v praxi.

8 Literatura

- [1] Radoslav Sovják, Birgit Beckmann a Filip Vogel. *Triaxial Compressive Strength of Ultra High Performance Concrete*. Acta Polytechnica, no. č. 53, 2013.
- [2] Jiří Hošek, *Nauka o materiálech 27*. Vydavatelství ČVUT, 2001.
- [3] Petr Máca, Radoslav Sovják a Tomáš Vavříník. *Experimental Investigation Of Mechanical Properties of UHPFRC*. Procedia Engineering, no. č. 65, 2013.
- [4] Svaz výrobců cementu ČR, *Betonové konstrukce 21. století: Betony s přidanou hodnotou*. Praha, ČR: BETON TKS, 2012. ISBN 978-80-260-3782-8.
- [5] Martin Tipka. *Složení, návrh a příprava vysokopevnostního a ultravysokopevnostního betonu*. Praha, 2011.
- [6] N. G. Shrive, J. E. Gillott a M. M. Reda. *Microstructural investigation of innovative UHPC*. Cement and Concrete Research, no. 29, 1999.
- [7] Luboš Svoboda a kol.. *Stavební hmoty*. Praha, 2013.
- [8] E. A. Koenders, S. Formagini, E. M. Fairbairn a R. T. Filho. *Performance assessment of Ultra High Performance Fibre Reinforced Cementitious Composites in view of sustainability*. Materials and Design 36, 2012.
- [9] Katrin Habel, Marco Viviani, Emmanuel Denarié a Eugen Brühwiler. *Development of the mechanical properties of an Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC)*. 2006.
- [10] Pierre-Claude Aïtcin, *Vysokohodnotný beton*. Praha: ČKAIT, 2005.
- [11] Jan Vetchý. (2015) Betonové výrobky mct, *Přísady do betonu*. [Online]. Dostupné z: <https://www.mct.cz/soubor/prisady-do-betonu-iii/>
- [12] Svaz výrobců betonu ČR. EBETON, *Pevnost betonu v tlaku*. [Online]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku>

- [13] Svaz výrobců betonu ČR. EBETON, *Pevnost betonu v tlaku - zkouška*. [Online]. Dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tlaku-zkouska>
- [14] Svaz výrobců betonu ČR. EBETON, *Pevnost betonu v tahu za ohybu - zkouška*. [Online]. Dostupné z:
<http://www.ebeton.cz/pojmy/pevnost-betonu-v-tahu-za-ohybu-zkouska>
- [15] ČSN EN 12390-5. (2009) *Zkoušení ztvrdlého betonu, Část 5: Pevnost v tahu ohybem zkušebních těles*. [Online]. Dostupné z:
<http://fast10.vsb.cz/206/Laborator/Downloads/Stav/Cviceni/Cvi8/pevnostvtahuohybem.pdf>
- [16] Stavební komunita. (2012) *Zkoušky cementu*. [Online]. Dostupné z:
<http://stavebnikomunita.cz/m/blogpost?id=6453524%3ABlogPost%3A18346>
- [17] Svaz výrobců betonu ČR. EBETON, *Modul pružnosti*. [Online].
Dostupné z: <http://www.ebeton.cz/pojmy/modul-pruznosti>
- [18] Zdeňka Bažantová, Karel Kolář, Petr Konvalinka, Jiří Litoš a Pavel Reiterman. *Nové možnosti rychlých oprav poruch cementobetonových konstrukcí*. Praha, 2016.
- [19] Karel Kolář, Jiří Litoš, Pavel Reiterman a Miroslav Petrtyl. *Dynamická stabilita multifunkčního silikátového kompozitu pro aúlikace v kolejovém loži pražského metra*.
- [20] Research Centre Prague. *Diagnostic of material for permanent way superstructure of Prague underground*. Praha, 2016.
- [21] Research Centre Prague. *Assessment of dynamic stability of MSC for application of the basement of the underground*. Praha, 2017.
- [22] Ing. Martin Míša. (2008) ASB - portal, *Sanace betonu*. [Online].
Dostupné z:
<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/rekonstrukce-staveb/sanace-betonu>
- [23] Heidelberg cement group. (2017) *Zement*. [Online]. Dostupné z:
<https://www.heidelbergcement.com/de/zement>

- [24] Zdeňka Bažantová, Karel Kolář, Petr Konvalinka, Jiří Litoš a Pavel Reiterman. (2017) *iMateriály*. [Online]. Dostupné z: https://imaterialy.dumabyt.cz/rubriky/materialy/multifunkcni-silikatovy-kompozit-programovatelných-vlastnosti-nejen-pro-rychle-opravy-cementobetonových-konstrukci_44766.html
- [25] Maschine+werkzeug. (2017) *Ultrahochfestes Maschinenbett*. [Online]. Dostupné z: <https://www.maschinewerkzeug.de/business-karriere/uebersicht/artikel/ultrahochfestes-maschinenbett-1139512.html>
- [26] msk.praha s.r.o. *Sanace betonových konstrukcí*. [Online]. Dostupné z: <http://www.mkspraha.cz/cs/cinnost/>
- [27] openPR Worldwide Public Relations. (2017) *New Report Examines The Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*. [Online]. Dostupné z: <https://www.openpr.com/news/556684/New-Report-Examines-The-Ultra-High-Performance-Concrete-UHPC-Market-2022-Key-Players-Are-Lafarge-Sika-AG-RAMPF-Holding-ceEntek-Metalco-TAKTL.html>
- [28] Trailer Envy. *Water*. [Online]. Dostupné z: <https://www.trailerenvy.com/water/>
- [29] Sand system. (2016) *Křemičitá moučka*. [Online]. Dostupné z: <http://www.sandsystem.cz/kremicita-kremenna-moucka/>