

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné  
náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí**

Study on change of cement mechanical properties caused by  
partial substitution of cement by latent hydraulic additive

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Vedoucí práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

**Bc. Nikola Tancošová**

Praha 2018


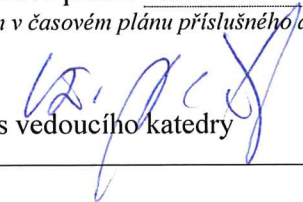


## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

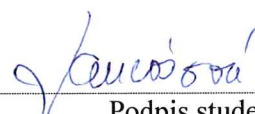
Příjmení: <u>Tancošová</u>	Jméno: <u>Nikola</u>	Osobní číslo: <u>396671</u>
Zadávací katedra: <u>Katedra betonových a zděných konstrukcí</u>		
Studijní program: <u>Stavební inženýrství</u>		
Studijní obor: <u>Konstrukce a dopravní stavby</u>		

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: <u>Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí</u>	
Název diplomové práce anglicky: <u>Study on change of cement mechanical properties caused by partial substitution of cement by latent hydraulic additive</u>	
Pokyny pro vypracování: Zpracujte rešerši k tématu cementových náhrad, která bude obsahovat: - Popis hydratace cementu a jeho složení - Popis běžně používaných latentně hydraulických příměsí se zaměřením na mikrosiliky, metakaolin a elektrárenský popílek. - Zhodnocení výhod a nevýhod při použití těchto příměsí.	
Realizujte experimentální program v následujících bodech: - Vyroberte cementové vzorky s použitou náhradou cementu v podobě mikrosiliky, metakaolinu a elektrárenského popílku v dávkách 5%, 10%, 20%, 30%, 50% a 80%. - Vyhodnoťte změnu tlakové pevnosti a objemové hmotnosti. - Vyhodnoťte změnu pevnosti v tahu za ohybu.	
Seznam doporučené literatury: Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000 Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005 Colleparidi, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006	
Jméno vedoucího diplomové práce: <u>Ing. Josef Fládr, Ph.D.</u>	
Datum zadání diplomové práce: <u>22.2.2018</u>	Termín odevzdání diplomové práce: <u>20.5.2018</u> <i>Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku</i>
 Podpis vedoucího práce	 Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové 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“.*

<u>22.2.2018</u> Datum převzetí zadání	 Podpis studenta(ky)
---	---



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí

**Prohlášení**

Prohlašuji, že zadanou diplomovou práci na téma „Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí“ jsem vypracovala samostatně, bez cizí pomoci s jedinou výjimkou, a to poskytnutou konzultací s vedoucím diplomové práce. Uvedla jsem veškerý seznam použité literatury a informačních zdrojů. Vše bylo provedeno v souladu s metodickým pokynem č. 1/2009 O dodržení etických principů v případě vysokoškolských státních závěrečných prací. Dále prohlašuji, že nemám žádné námítky pro užití této diplomové práce, či její části.

V Praze dne .....

.....

Bc. Nikola Tancošová



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí

Ráda bych poděkovala panu Ing. Josefu Fládrovi Ph.D., za vedení mé diplomové práce, rady, připomínky, trpělivost a pomoc při jejím zpracování.

Dále děkuji Bc. Lucii Tancošové, Ing. Karlu Šepsí Ph.D., Ing. Romanu Chylíkovi a Ing. Tomáši Trtíkovi za výpomoc v laboratořích.



## **Anotace:**

Diplomová práce je zaměřena na náhradu cementu latentně hydraulickými příměsemi, konkrétně metakaolinem, mikrosilikou a elektrérenským popílkem a stanovením změny mechanických vlastností. Práce je dělená na teoretickou část a na experimentální.

Teoretická část se zabývá výrobou cementu, dělením cementu a jeho složením, hydratací cementu a jeho vlastnostmi. Dále se zabývá popisem základních latentně hydraulických příměsí.

Experimentální část je věnována výrobě těles z metakaolinu, mikrosiliky a popílku, jejich zkoušení mechanických vlastností (pevnost v tahu za ohybu, pevnost v tlaku) a vyhodnocení naměřených výsledků.

## **Klíčová slova:**

Cement, latentně hydraulická příměs, náhrada, pevnost v tlaku, pevnost v tahu za ohybu



### **Annotation:**

This diploma thesis is focused on cement substitution with latent-hydraulic additives, namely metakaolin, micro-silicon and power fly ash and determination of change of mechanical properties. The thesis is divided into theoretical part and experimental.

The theoretical part deals with the production of cement, the division of cement and its composition, the hydration of cement and its properties. It also deals with the basic description of latent hydraulic additions.

Experimental part is devoted to production of bodies of metakaolin, microsilicon and fly ash, their testing of mechanical properties (tensile strength after bending, compressive strength) and evaluation of measured results.

### **Key words:**

Cement, latent hydraulic additive, substitution, compressive strength, tensile strength after bending



## Obsah

1	Úvod.....	7
2	Cement.....	8
2.1	Výroba cementu.....	8
2.2	Hydratace cementu.....	12
	Hydratace cementu se dělí na několik period [5]:.....	13
2.2.1	Hydratace aluminátů.....	15
2.2.2	Význam sádrovce při tuhnutí cementu.....	15
2.2.3	Hydratace silikátů.....	16
2.2.4	Portlandit.....	16
2.3	Vlastnosti cementu.....	17
2.4	Složení cementu.....	19
2.4.1	Portlandský slínek (K).....	19
2.4.2	Pucolán (P, Q).....	19
2.4.3	Granulovaná vysokopeční struska (S).....	20
2.4.4	Kalcinovaná břidlice (T).....	20
2.4.5	Popílek (V, W).....	20
2.4.6	Křemičitý úlet (D).....	21
2.4.7	Vápenec (L, LL).....	21
2.5	Druhy cementu.....	22
3	Latentně hydraulické příměsi.....	26
3.1	Latentní hydrauličita.....	26
3.2	Mikrosilika.....	27
3.3	Popílek.....	29
3.4	Metakaolin.....	31
3.5	Vysokopeční granulovaná struska.....	33
4	Vstupní materiály praktické části.....	36
4.1	Složení směsi.....	36
5	Výroba zkušebních těles.....	41
6	Zkoušky cementové směsi.....	45
6.1	Objemová hmotnost.....	45
6.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	46
6.3	Pevnost v tlaku.....	48



7	Výsledky.....	50
7.1	Objemová hmotnost.....	50
7.2	Pevnost v tahu za ohybu.....	54
7.3	Pevnost v tlaku.....	70
8	Závěr.....	75
	Použité zdroje.....	76
	Seznam obrázků.....	78
	Seznam tabulek.....	80





## 1 Úvod

Výrobou cementu vzniká velké množství  $\text{CO}_2$ , přibližně výrobou 1 tuny cementu vzniká  $0,9 \text{ CO}_2$ . Proto je kladen velký důraz na snížení těchto emisí pomocí náhrady cementu druhotnými surovinami a to například, vysokopecní struskou, popílky, mikrosilikou, metakaolinem atd. Výhodou použití těchto surovin je možnost vylepšení některých vlastností jak u čerstvého, tak ztvrdlého betonu.

Tato diplomová práce nesoucí název „*Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí*“ se konkrétně zaměřila na náhradu metakaolinem, mikrosilikou a elektrárenským popílkem.

Teoretická část obsahuje rešerši zabývající se cementem. A to druhy cementu, výrobou a složením cementu, hydratací a vlastnostmi cementu. Nadále obsahuje popis latentně hydraulických příměsí a to metakaolinu, mikrosiliky a elektrárenského popílku a vysokopecní strusky.

V praktické části se z metakaolinu, mikrosiliky a popílku zhotovilo 7 směsí o různém množství náhrady a to 5, 10, 20, 30, 50, a 80% hmotnosti. Na zkušebních tělesech vyrobených z těchto směsí se zjistila objemová hmotnost, pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku. Naměřené výsledky se zpracovaly a stanovily se změny objemové hmotnosti a pevností.

Cílem práce bylo zhodnocení změn mechanických vlastností při náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí a stanovení optimálního množství náhrady.



## 2 Cement

Jedná se o hydraulické pojivo z jemně namletého anorganického materiálu, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která vlivem chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Během několika dní dosahuje podobných vlastností, jako má přírodní kámen.

[1]



Obr. č. 1- Cement

### 2.1 Výroba cementu

Surovinová směs musí obsahovat kombinaci křemíku, vápníku, hliníku, železa a dalších složek. Směs musí být semleta na jemný prášek s velkým reakčním povrchem, aby reakce vznikající při tavení byla co nejrychlejší a nejúplnější. Rozhodující je teplota, doba a prostředí výpalu, pokud je dodržen správný chemismus, ale dojde k nevhodnému výpalu, vznikne tak nevhodný slínek [2].

Cement se vyrábí dvěma postupy a to buď tzv. suchou anebo mokrou cestou. Oba postupy výroby jsou podobné, jediný rozdíl je ten, že u mokrého postupu je do směsi přidána záměsová voda. Výhodou suchého postupu je vysoká výkonnost a účinnost vypalovacího procesu kvůli předehřátí směsi. Výhodou mokrého postupu je, že se



suroviny nemusí sušit před mletím a dochází tak ke snadnějšímu mletí a je snížena pracnost při výrobě. Nevýhodou je větší spotřeba vody. Nejčastější postup výroby v České republice je suchá metoda [3].

Hlavní složkou při výrobě cementu je vápenec, který se v lomu rozpojuje odstřely. Křemičitá složka se získává povrchově, pokud ji neobsahuje vytěžená vápencová hornina. Ideálním prvkem pro výrobu cementu je slínovec, který obsahuje uhličitán vápenatý a jílové minerály. Během těžby se suroviny pravidelně ověřují kvůli chemickému složení pro budoucí výrobu cementu.

Po odstřelu se materiál přepravuje kolovými nakladači do drtírny, ve které se drtí zejména kladivovými drtiči na potřebnou velikost. U tvrdších surovin se drtí nejprve čelistovými nebo kuželovými drtiči a pak čelistovými, kuželovými nebo odrazovými drtiči. Poté je převážen pásovým dopravníkem na zastřešenou předhomogenizační skládku (obr. č. 2).



Obr. č. 2 - Předhomogenizační zastřešená skládka

Odtud se podrcený vápenec s dalšími složkami dopravuje do oběhových mlýnů, kde dochází k mletí a sušení směsi. K mletí dochází ve svislém mlýnu pomocí tří kónických válců a ocelových koulí, sušení se provádí pomocí odpadních plynů z výměníku rotační pece. Na jemnosti mletí závisí průběh slinování a rychlost tvorby slínku. Rozemletá



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí

surovina se ukládá do homogenizačních sil, odkud směs prochází cyklonovým výměníkem, kde se předeřívá a následně putuje do rotační pece (obr. č. 3), kde dojde k sušení (do 200 °C), předeřívání (200 – 800°C), kalcinaci (800 – 1200°C), exotermii (1300°C), ke slinování (1400 – 1500°C) a k ochlazení. Slinováním taveniny vzniknou slínkové minerály a dojde k postupnému nabalení rozžhavených částic původně práškového materiálu. Po ochlazení v chladiči se vzniklé slínkové minerály stabilizují a vznikne tak slínek ve formě šedých kuliček, který se uloží do slínkového sila odkud se odebírá pro mletí v cementových mlýnech. Slínek se mele společně s regulátorem tuhnutí (síran vápenatý – sádrovec nebo anhydrit) a případně dalšími složkami (struskou, popílkem atd.) na jemný prášek – cement [3].

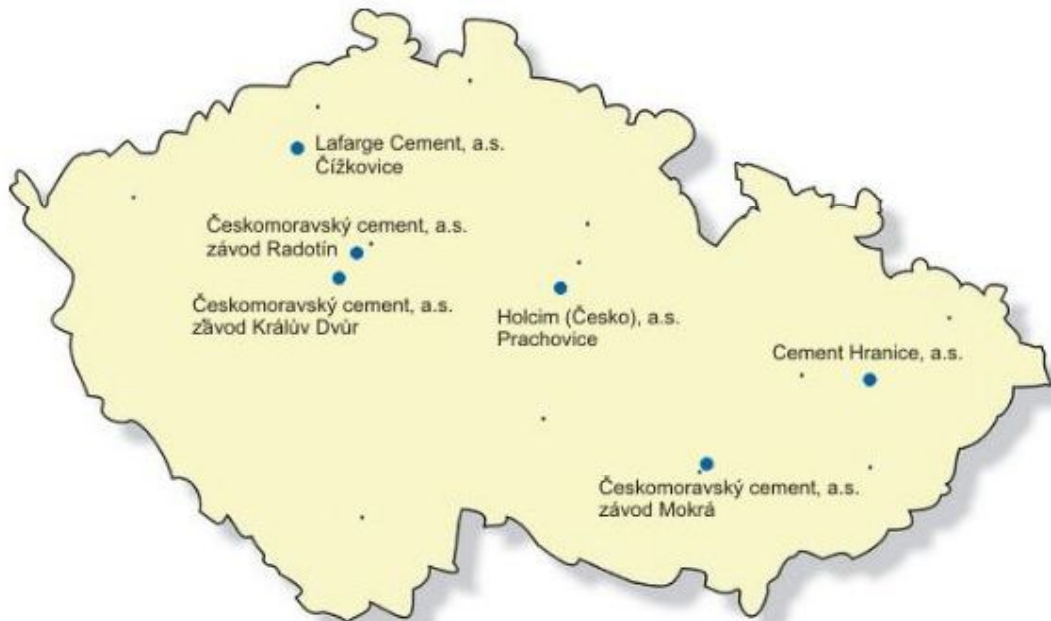


Obr. č. 3 - Rotační pec

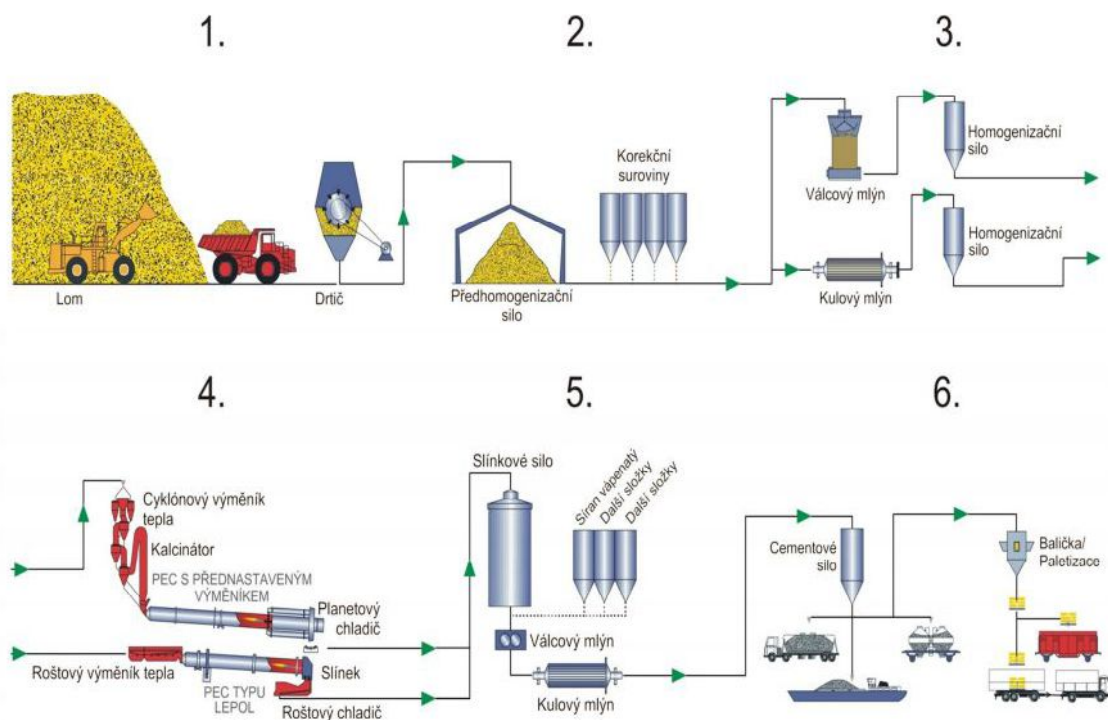
Hotový cement je skladován v cementových silech odkud se uvolňuje k expedici buď do autocisteren, železničních vagónů nebo se balí do papírových pytlů.



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí



Obr. č. 4 - Cementárny v České republice [3]



Obr. č. 5 - Postup výroby cementu [3]



## 2.2 Hydratace cementu

Slínek obsažený v cementu se skládá z cca 20 minerálů, avšak nejdůležitější jsou čtyři z nich. A to dva kalciumsilikáty (asi 80%) a dva kalciumalumináty (asi 20%). Kalciumalumináty ( $C_3A$  a  $C_4AF$ ) hrají důležitou roli při tuhnutí, zatímco kalciumsilikáty ( $C_3S$  a  $C_2S$ ) během tvrdnutí. [4]

Poměr těchto složek je vyjádřen pomocí modulů a to hydraulickým, silikátovým a aluminátovým. Tyto moduly vyjadřují poměry obsahů oxidů ve vstupní surovině a jsou označeny symboly  $S=SiO$ ,  $C=CaO$  a  $A+F= Al_2O_3 + Fe_2O_3$ .

Hydraulický modul:

$$M_H = \frac{C}{S + A + F}$$

Tato hodnota se pohybuje od 1,9 do 2,2. Cementy s  $M_H$  menší, než 1,7 dosahují nízké pevnosti, cementy s  $M_H$  vyšší než 2,4 mají vyšší hydratační teplo, vyšší počáteční pevnost, ale jsou méně odolné vůči agresivním látkám.

Silikátový modul:

$$M_S = \frac{S}{A + F}$$

Silikátový modul dosahuje hodnot 2,4 až 2,7. Vyšší hodnota  $M_S$  se vyskytuje u cementů s pomalejším tuhnutím, ale s vyšší odolností k agresivnímu prostředí.

Aluminátový modul:

$$M_A = \frac{A}{F}$$

$M_A$  běžně bývá 1,5 až 2,5. Bílé cementy mají hodnotou  $M_A$  vyšší než 8.



Tab. č. 1 - Přehled hlavních složek portlandského slínku [6]

Název	Vzorec	Slovní označení	Obsah [%]	Hydratační teplo [kJ/kg]	Hydratace
Trikalciumsilikát	C <sub>3</sub> S	alit	35 – 75	500	rychlá
Dikalciumsilikát	C <sub>2</sub> S	belit	5 – 40	250	střední
Trikalciumaluminát	C <sub>3</sub> A	amorfní fáze	3 – 15	1350	velmi rychlá
Tetrakalciumaluminát – ferit	C <sub>4</sub> AF	brownmillerit (celit)	9 – 14	420	rychlá
Oxid vápenatý	CaO	volné vápno	< 4	1160	pomalá
Oxid hořečnatý	MgO	periklas	< 6	840	pomalá

Tab. č. 2 - Vlastnosti hydratovaných slínkových minerálů [5]

Slínkový minerál	C <sub>3</sub> S Alit	C <sub>2</sub> S Belit	C <sub>3</sub> A Amorfní fáze	C <sub>4</sub> AF Celit
Počátek reakce po zamíchání s vodou	2 – 4 hodin	14 – 16 dnů	ihned	5 – 10 minut
Objemová stálost	stálý	stálý	nestálý	stálý
Smrštění	střední	malé	výrazné	malé
Chemická odolnost	úměrná	úměrná	malá	dobrá
Pevnost v tlaku v MPa				
za 28 dní	50	10	5	3
za 180 dní	65	50	8	5

Hydratace cementu se dělí na několik period [5]:

- 1. perioda – indukční:** dělí se na první období (předindukční), trvá asi 10 – 15 minut během kterých dojde ke smočení zrn cementu. Začne se rychle uvolňovat hydratační teplo a dojde k rozpouštění aluminátů a síranu a vznikne Ca(OH)<sub>2</sub> a



trisulfát označovaný jako AFt. V druhém období dochází k pomalému uvolňování tepla, vzrůstá viskozita suspenze a nastává úbytek silikátů a dojde k tvoření zárodků krystalů CH a C-S-H nadále pokračuje tvorba AFt a voda proniká k zrnům cementu a tvoří se tak další produkty hydratace. Druhé období končí zhruba po 1 – 2 hodinách od zamíchání.

- 2. perioda – přechod do tuhého skupenství:** trvá od 1 – 2 do 12 – 24 hodin po zamíchání. Alit ( $C_3S$ ) rychle reaguje za vzniku dlouhovláknitého C-S-H a krystalů portlanditu. Měrný povrch narůstá až 1000 krát. Krystaly hydratačních produktů prorůstají a tím spojují zrna cementu, avšak toto závisí na vodním součiniteli. Pokud je vysoký, tuhnutí se zpomaluje. V této periodě dochází k vytváření mikrostruktury cementového kamene.
- 3. perioda – stupeň stabilní struktury:** vznikají fáze drobnovláknité C-S-H, ettringit se mění na monosulfát AFm a nastává hydratace belitu, vývin hydratačního tepla se snižuje. Tato perioda se dělí na období klesající rychlosti hydratace (asi do 28 dnů) a na období „dozrávání“, které může trvat i řadu let. Mezi zrny dochází k rekrystalizaci fází a na místě původních zrn cementu vznikají vnitřní hydratační produkty difúzí vody hydratovanou obálkou zrn.

Rychlost hydratace je dána měrným povrchem cementu. Hloubka hydratace cementového zrna za 6 měsíců je 3 až 15  $\mu\text{m}$ , velikost zrn však bývá 8 až 120  $\mu\text{m}$ , takže velká zrna nejsou zcela hydratovaná a jejich jádra tvoří plnivo v cementovém kameni. Zvýšením měrného povrchu dojde ke zrychlení procesu hydratace. Další, co ovlivňuje rychlost hydratace je vodní součinitel. Zvýšením vodního součinitele  $w$  nad 0,3 se prodlouží doba tuhnutí. Množství vody ovlivňuje velikost hydratačních produktů, při nízkém  $w$  jsou malé a při vyšším  $w$  dosahují větších rozměrů. Rychlost hydratace je ovlivněná i teplotou, pokud se teplota cementového kamene zvyšuje, zrychluje se proces hydratace. Při teplotě pod 20 °C dochází ke zpomalování hydratace a při teplotě +5 °C je hydratace velmi malá. Urychlením hydratace dojde ke tvorbě hrubé krystalické struktury, srůsty a spojení mezi krystaly jsou menší a dochází tak ke snížení výsledné pevnosti cementového kamene [5].



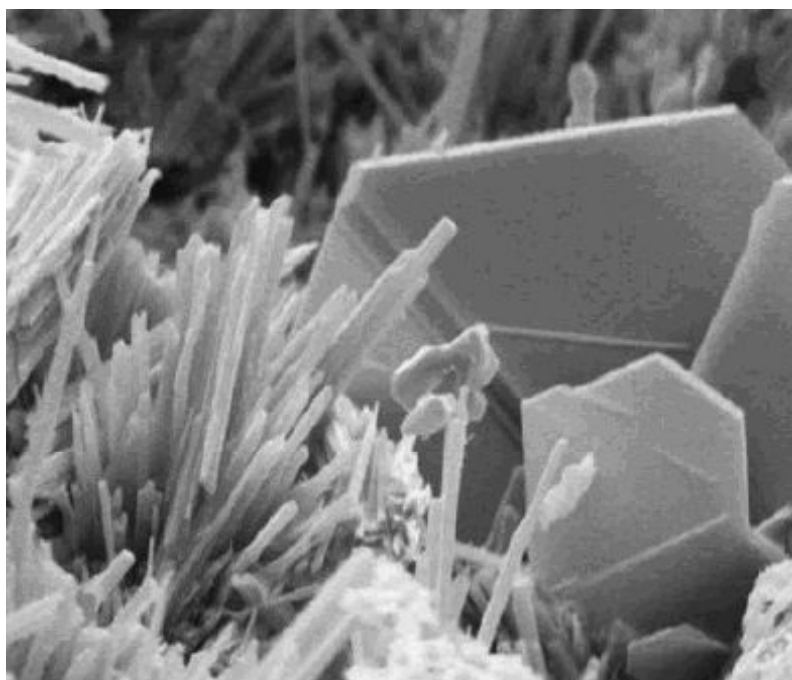


### 2.2.1 Hydratace aluminátů

Při výpalu vznikají  $C_3A$  – amorfní fáze a  $C_4AF$  – celit, které po smíchání s vodou reagují a vzniká C-A-H, popřípadě C-A(F)-H. Alumináty rychle reagují s vodou, tudíž rychle ztrácí plasticitu. Vzhledem lupínkovému charakteru ve srovnání s jehlicovitým charakterem C-S-H gelu přispívají tyto složky k pevnosti jen nepatrně [4].

### 2.2.2 Význam sádrovce při tunutí cementu

Ke slínku je přimílán sádrovec –  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  nebo anhydrit –  $CaSO_4$ , který působí jako regulátor tunutí a zpomaluje rychlost reakce aluminátů a proto je možné cementovou pastu/beton zpracovávat. Výsledným reakčním produktem je místo C-A-H ettringit (obr. č. 6). Ten se dělí na primární, vznikající v prvních minutách po smíchání cementu s vodou a na sekundární, který vzniká v pozdější době v zatvrdlém cementu/betonu a vyvolává tak škodlivá napětí, jež mohou způsobit trhliny a ztrátu pevnosti.



Obr. č. 6 - Jehlicovité krystaly ettringitu a destičkovité krystaly portlanditu. Snímek z elektronového mikroskopu; velikost objektů v mikrometrech [7]



Primární ettringit zpomaluje rychlost reakce tím, že pokryje povrch  $C_3A$  a  $C_4AF$  malými jehličkami, čímž je zabráněno dalšímu kontaktu mezi vodou a kalciumalumináty. Kdyby nebyl přítomen sádrovec, došlo by k rychlému vzniku plochých krystalů C-A-H a C-A(F)-H, které působí jako můstky mezi cementovými zrny a tím způsobují rychlé tuhnutí. Ettringit zvyšuje počáteční pevnost a snižuje smrštění betonu.

Množství sádrovce přidaného ke slínku je 3,5 – 4%  $SO_3$  nebo 7 – 8%  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  vzhledem k hmotnosti cementu. Množství je podstatně nižší, než by bylo potřeba k transformaci veškerého  $C_3A$  na ettringit. Kdyby se však množství sádrovce zvedlo, došlo by k tvorbě ettringitu dlouhou dobu po tuhnutí cementu a vznikly by tak trhliny v zatvrdlé cementové pastě/betonu. Počáteční pevnost portlandského cementu s optimální dávkou sádrovce je vyšší než počáteční pevnost odpovídající slínku.

[4]

### 2.2.3 Hydratace silikátů

Cement obsahuje  $C_3S$  – alit a  $C_2S$  – belit, tyto složky hrají důležitou roli během tvrdnutí. Alit reaguje rychleji a má i rychlejší vývoj pevnosti oproti belitu, avšak v prvních hodinách je u obou silikátů zanedbatelný vývoj pevnosti a po dlouhé době (roky) jsou pevnosti srovnatelné. Proto cementy obsahují více alitu –  $C_3S$ , výjimku tvoří belitické cementy, které jsou populární především v Číně. Produktem hydratace je C-S-H gel (produkty amorfního charakteru) a portlandit  $Ca(OH)_2$  neboli CH. Portlandit vzniklý během hydratace dosahuje většího množství u alitu (30 – 40%), než u belitu (10 – 15%), jelikož belit obsahuje méně vápníku. Při hydrataci se na povrchu zrn alitu a belitu tvoří vlákna C-S-H gelu, která se postupně začínají vzájemně dotýkat a přemostovat mezery mezi hydratujícími zrny a dochází tak ke tvrdnutí. Mezi částicemi prorostlými vlákny C-S-H gelu mohou vzniknout kapilární póry, které ovlivňují pevnost a trvanlivost. Pórovitost se snižuje snížením vodního součinitele [4].

### 2.2.4 Portlandit

Portlandit, který vzniká při hydrataci silikátů, neovlivňuje vývoj pevnosti, jelikož je z plochých krystalů. Avšak umožňuje výrobu pucolánových a struskových cementů a chrání ocelovou výztuž před korozí zvýšením pH [4].



## 2.3 Vlastnosti cementu

Vlastnosti cementu jsou definované v normě ČSN EN 196.

**Počátek a doba tuhnutí** – tato veličina se zjišťuje pomocí Vicatova přístroje (obr. č. 7). Počátek tuhnutí začíná minimálně po 45 – 60 minutách a zpravidla trvá 3 – 5 hodin, doba tuhnutí je maximálně 12 hodin (obvykle 4 – 6 hodin). S vyšším obsahem vody se doba tuhnutí prodlužuje, avšak se zvýšením teploty se zkracuje.

**Objemová stálost** – je prokazatelná za 24 hodin při teplotě 20°C za pomoci Le Chatelierovi objímky (obr. č. 8). Roztažnost objímky nesmí překročit 10 mm, obvykle dosahuje hodnoty 1 mm. Roztažnost cementového kamene způsobuje nadměrné množství volného CaO, MgO a síranu vápenatého. Smrštění cementového kamene po 28 dnech je 0,5 – 0,8 mm/m.

**Objemová sypná hmotnost** – u portlandského cementu je objemová hmotnost v rozmezí 3050 – 3150 kg/m<sup>3</sup>. Cementy obsahující více strusky mají objemovou hmotnost pak 3000 kg/m<sup>3</sup>. Volně ložený cement má sypnou hmotnost 900 – 1300 kg/m<sup>3</sup> a pytlovaný cement nebo cement uložený v silech 1200 – 1700 kg/m<sup>3</sup>.

**Měrný povrch cementu** – tato vlastnost je spjata se zrnitostí a s velikostí částic (1 – 250 μm), cementy dosahují 250 – 400 m<sup>2</sup>/kg. Minimální požadovaná hodnota je 225 a maximální doporučená jemnost mletí je 600 m<sup>2</sup>/kg. Čím větší měrný povrch cement má, tím rychleji a úplněji hydratuje, ale jeho výroba je více energeticky náročnější.

**Hydratační teplo** – vzniká, jelikož v cementu dochází k jeho hydrataci. Hydratační teplo je závislé na obsahu jednotlivých slínekových minerálů a tím pádem na druhu cementu. V průběhu hydratace se vyvíjející teplo mění s rozdílnou intenzitou.

[5]



Obr. č. 7 - Vicatův přístroj



Obr. č. 8 – Le Chatelierova objímka

Tab. č. 3 - Mechanické a fyzikální požadavky dle [9]

<b>Pevnostní třída</b>	<b>Počáteční pevnost [MPa]</b>	<b>Normalizovaná pevnost po 28 dnech [MPa]</b>	<b>Počátek tuhnutí [min]</b>	<b>Objemová stálost [mm]</b>
32,5 L <sup>a</sup>	≥ 12,0 (7 dnů)	≥ 32,5 až ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 N	≥ 16,0 (7 dnů)			
32,5 R	≥ 10,0 (2 dny)			
42,5 L <sup>a</sup>	≥ 16,0 (7 dnů)	≥ 42,5 až ≤ 62,5	≥ 60	
42,5 N	≥ 10,0 (2 dny)			
42,5 R	≥ 20,0 (2 dny)			
52,5 L <sup>a</sup>	≥ 10,0 (2 dny)	≥ 52,5	≥ 45	
52,5 N	≥ 20,0 (2 dny)			
52,5 R	≥ 30,0 (2 dny)			

<sup>a</sup> Třída pevnosti pro cementy CEM III



## 2.4 Složení cementu

Hlavními složkami cementu jsou anorganické látky o množství větším jak 5% hmotnosti všech použitých hlavních a doplňujících složek. Hlavními složkami jsou portlandský slínek, pucolán, popílek, vysokopecní struska, křemičitý úlet, kalcinovaná břidlice a vápenec. Doplňující složky jsou anorganické látky, které pocházejí z procesu výroby slínku a nesmí překročit 5% hmotnosti všech použitých hlavních a doplňujících složek. Zlepšují fyzikální vlastnosti cementu, nesmějí výrazně zvyšovat spotřebu vody, snižovat odolnost proti poškození a snižovat ochranu výztuže vůči korozi.

### 2.4.1 Portlandský slínek (K)

Postup výroby slínku se popisuje v kapitole 2. 1 Výroba cementu. Vyrábí se pálením do slinutí surovinové směsi, která obsahuje prvky s oxidy  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  atd. Portlandský slínek je hydraulická látka, skládající se minimálně ze 2/3 hmotnosti ze silikátů – alitu ( $\text{C}_3\text{S}$ ) a belitu ( $\text{C}_2\text{S}$ ) a ve zbytku hmotnosti z aluminátů –  $\text{C}_3\text{A}$  a z  $\text{C}_4\text{AF}$ .

### 2.4.2 Pucolán (P, Q)

Tato složka cementu samo o sobě není hydraulickým pojivem a netvrdne ve vodě, aby se pucolán choval jako hydraulické pojivo, musí se smíchat s vápnem (minimálně 20 – 30% z hmotnosti směsi). Tomuto se říká pucolánová aktivita, což je chování způsobené interakcí amorfní siliky s vápnem a vodou v cementové pastě. Amorfní silika nemá dokonale uspořádané atomy Si a O a proto je schopná reagovat s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  i při pokojové teplotě.

Pucolán + voda → netvrdne

Pucolán + voda + vápno → tvrdne

Pucolán se dělí na přírodní (P) a přírodní kalcinovaný (Q).

Přírodní pucolán je obvykle vulkanického původu nebo se jedná o sedimentární horniny. Přírodní kalcinované pucolány jsou hlíny, břidlice nebo sedimentární horniny, aktivované tepelnou úpravou při ochlazení strusky z výroby olova, mědi a jiných výrobků metalurgického průmyslu.



### 2.4.3 Granulovaná vysokopecní struska (S)

Granulovaná vysokopecní struska vznikne rychlým ochlazením struskové taveniny při tavení železní rudy ve vysoké peci. Jedná se o latentně hydraulickou látku, která minimálně ze 2/3 hmotnosti musí obsahovat strusku ve sklovitém stavu a minimálně 2/3 hmotnosti oxid vápenatý (CaO), oxid hořečnatý (MgO) a oxid křemičitý (SiO<sub>2</sub>). Ve zbytku obsahuje oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a malá množství jiných sloučenin. Struska oproti pucolánu tvrdne ve vodě, aniž by se muselo přidat vápno, avšak velmi pomalu. Obsahuje totiž více vápna než pucolán, takže se chová jako latentně hydraulická látka i bez přidaného vápna a po přidání vápna se chová jako plně hydraulická látka. Přidáním vápna urychlíme tvrdnutí strusky.

Struska + voda → tvrdne velmi pomalu

Strusku + voda + vápno → tvrdne rychle

Proto je možné míchat strusku s portlandským cementem v široké škále poměrů (podle ČS EN 197-1 od 6 – 95%). S rozdílným množstvím strusky v cementu se mění i vlastnosti, především se jedná o krátkodobou pevnost, kdy pomalá hydratace strusky nepřispívá k pevnosti. Pevnost je dána pouze hydratací portlandského cementu.

### 2.4.4 Kalcinovaná břidlice (T)

Vyrábí se ve speciální peci při teplotě cca 800°C. Obsahuje slínkové fáze, především dikalciumsilikát a monokalciumaluminát a malé množství volného oxidu vápenatého (CaO) a síranu vápenatého (CaSO<sub>4</sub>) a oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>). Pokud je jemně semletá má výrazné hydraulické vlastnosti jako portlandský cement a k tomu i pucolánové vlastnosti. Požaduje se, aby kalcinovaná břidlice měla po 28 dnech minimální pevnost v tlaku 28,0 MPa.

### 2.4.5 Popílek (V, W)

Popílek je anorganická zplodina, vznikající spalováním pevných a jemně mletých paliv v uhelných elektrárnách při teplotě 1200 – 1700°C. Získává se v mechanických nebo elektrických odlučovačích. Jiným, než uvedeným způsobem se získaný popílek nesmí používat v cementárnách. Popílek se dělí na křemičitý (V) nebo vápenatý (W).



Křemičitý popílek je jemný prášek tvořený kulovými částicemi, který se projevuje pucolánovými vlastnostmi. Obsahuje aktivní oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) zbývající složky jsou oxid železitý ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ) a jiné sloučeniny. Množství oxidu křemičitého ( $\text{SiO}_2$ ) musí převyšovat 25% hmotnosti a množství aktivního oxidu vápenatého ( $\text{CaO}$ ) nesmí překročit 10% hmotnosti.

Vápenatý popílek je jemný prášek, který se projevuje hydraulickými vlastnostmi a/nebo pucolánovými vlastnostmi. Obsahuje hlavně aktivní oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ), aktivní oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ) a oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) zbývající složky jsou oxid železitý ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) a jiné sloučeniny. Množství aktivního  $\text{CaO}$  nesmí být menší než 10% hmotnosti.

Použitím popílku do betonu zlepšujeme některé vlastnosti, u čerstvého betonu například čerpatelnost a u ztvrdlého betonu se zvyšuje pevnost v tlaku a odolnost proti průsakům tlakové vody.

#### **2.4.6 Křemičitý úlet (D)**

Křemičitý úlet je také označován jako mikrosilika. Vzniká redukováním křemene vysoké čistoty uhlím v obloukových pecích při výrobě křemičitých a ferrokřemičitých slitin. Skládá se z kulovitých částic, které obsahují minimálně 85% hmotnosti amorfni oxid křemičitý ( $\text{SiO}_2$ ). Křemičitý úlet se dodává buď aglomerován – zvětšení sypné hmotnosti nebo neaglomerován – tak jak byl zachycen na filtrech.

Tato látka zvyšuje pevnost cementového kamene.

#### **2.4.7 Vápenec (L, LL)**

Pokud je vápenec použit jako příměs do cementu, musí obsah uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ) dosahovat minimálně 75% hmotnosti a množství jílovitého podílu nesmí překročit 1,2g na 100g, jenž je stanoven zkouškou methylenovou modří. Vápenec se označuje jako LL pokud je obsah organického uhlíku menší jak 0,2% hmotnosti a L pokud je obsah menší 0,5% hmotnosti.

[10]



## 2.5 Druhy cementu

Základní složkou cementu CEM je portlandský slínek, jenž se kombinuje s dalšími hydraulicky aktivními složkami. Obsah CaO a SiO<sub>2</sub> musí být větší než 50% hmotnosti a neaktivní plnivo nesmí překročit hodnotu 5%.

Cementy pro obecné použití jsou děleny na pět hlavních druhů:

- CEM I Portlandský cement
- CEM II Portlandský cement směsný
- CEM III Vysokopeční cement
- CEM IV Pucolánový cement
- CEM V Směsný cement

Za druhovým označením, jež je vyznačený římskou číslicí se udává hodnota normalizované pevnostní třídy a to 32,5 MPa 42,5 MPa nebo 52,5 MPa. Ta je dána pevností v tlaku po 28 dnech zkoušenou na zlomcích trámečků z cementové malty podle ČSN EN 196-1. Pokud cement na počátku dosahuje vysoké pevnosti, připojuje se za označení ještě písmeno R (rychlouzný cement). Cementy s pevnostní třídou 32,5 a 42,5 mohou vykazat počátek tuhnutí nejdříve za hodinu po smísení s vodou, zatímco cementy s pevnostní třídou 52,5 již za 45 minut. [6]

Normalizované označení cementu je znázorněno na obr. č. 9.



Obr. č. 9 - Normalizační označení cementu [8]

Jednotlivé složky v cementu upravují základní vlastnosti jednosložkového portlandského cementu.





**Portlandský cement (CEM I)** – se vyznačuje strmým nárůstem počáteční pevnosti v tlaku, je vhodný pro použití při nízkých teplotách, jelikož uvolňuje velké množství hydratačního tepla, tím pádem se nehodí na výstavbu mohutných konstrukcí.

**Portlandský cement struskový (CEM II/A-S, CEM II/B-S)** – je více odolný vůči agresivnímu prostředí, hydratační proces je pomalý, takže je vhodný pro masivní konstrukce a letní betonáž. Za sucha v něm dochází ke smrštění, proto je nutné ho během prvního týdne zrání udržovat vlhký.

**Portlandský cement s křemičitým úletem (CEM II/A-D)** – dosahuje vyšší pevnosti v tahu, a proto se hodí na konstrukce, které jsou namáhány jak tlakem, tak i tahem.

**Portlandský pucolánový cement (CEM II/A-P – CEM II/B-Q)** – pucolán obsažený v tomto cementu zvyšuje odolnost proti uhličitánovým a odpadním vodám a usnadňuje přípravu vodotěsného betonu.

**Portlandský popílkový cement (CEM II/A-V – CEM II/B-W)** – je dobře zpracovatelný a vodotěsný, proto se hodí na stavbu přehrad.

**Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí (CEM II/A-T, CEM II/B-T)** – se využívá pro injektážní hmoty.

**Portlandský cement s vápencem (CEM II/A-L, CEM II/B-L)** – je odolný vůči plísním a hodí se pro méně mechanicky namáhané povrchy.

**Portlandský směsný cement (CEM II/A-M, CEM II/B-M)** – jsou v něm zkombinované neslínkové složky.

**Vysokopecní cement (CEM III/A, CEM III/B, CEM III/C)** – nárůst pevnosti je pomalý a vyvinuté hydratační teplo je malé. Tento cement je vysoce odolný vůči agresivnímu prostředí. Typ B se hodí do prostředí vystavené síranovým vodám a typ C do prostředí vystavené vysokému žáru jako jsou konstrukce před kotli a pecemi a ochranné konstrukce proti žáru.

**Pucolánový cement (CEM IV/A, CEM IV/B)** – je pro něj charakteristická prodloužená doba nárůstu pevnosti, je odolný vůči uhličitánové, slatinné i mořské vodě.



**Směsný cement** (CEM V/A, CEM V/B) – dosahuje nejnižší pevnosti oproti zbylým cementům, proto se hodí na stavbu nenáročných prvků, jako jsou podlahy nebo pro potěry.

V tabulce č. 4 je znázorněná specifikace jednotlivých druhů cementů dle ČSN EN 197-1.

Dále jsou speciální cementy, do nichž patří:

**Silniční cement** – vyznačuje se vysokou pevností v tahu za ohybu, malými objemovými změnami, nízkým hydratačním teplem, trvanlivostí v prostředí, kde působí chemické rozmrazovací látky (XF3) a vysokými počátečními pevnostmi.

**Síranovzdorný portlandský cement** – je více odolný proti působení síranů, jež reagují s hydratovanými alumináty při vzniku ettringitu a snižují tak pevnost betonu, obsahuje do 3,5 % C<sub>3</sub>A.

**Síranovzrodný vysokopecní cement**

**Hlinitanový cement** – vyrábí ze speciálního slínku, vyznačuje se rychlým průběhem tuhnutí a tvrdnutí, vysokým hydratačním teplem a je odolný vůči agresivnímu prostředí. V těchto cementech dochází k pórovitosti cementového kamene a snižuje se tak pevnost, proto se nesmí používat do konstrukčních betonů.

**Bílý cement** – se používá pro dekorativní prvky a povrchové úpravy.

**Rozpínatelný cement** – u toho cementu rozpínání nastává za 24 h a nesmí trvat více jak 10 – 15 dnů.

**Cement s nízkým hydratačním teplem** – označovaný také jako belitový, přehradový, obsahuje vysoké množství belitu (C<sub>2</sub>S) a malé množství C<sub>3</sub>A ve slínku. Hydratační teplo za 28 dní je u těchto cementů asi 270 kJ/kg a během tvrdnutí maximálně 210 kJ/kg.

[5]



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
 Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
 cementu latentně hydraulickou příměsí

Tab. č. 4 - Druhy cementu pro obecné použití [9]

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle % hmotnosti <sup>a</sup> )										Doplňující složky		
			Hlavní složky												
			Slínek	Vysoko- pecní struska	Křemi- čitý úlet	Pucolány		Popílek		Kalcino- vaná břidlice	Vápenec				
						přírodní	přírodní kalcino- vané	křemi- čitý	vápe- natý						
K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-
	CEM II/B-P		65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/A-Q		80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	CEM II/B-Q		65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s vápenecem	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
	Portlandský směsný cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	←----- 12-20 ----->									0-5		
CEM II/B-M		65-79	←----- 21-35 ----->									0-5			
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Pucolánový cement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	-	←----- 11-35 ----->					-	-	-	0-5		
		CEM IV/B	45-64	-	←----- 36-55 ----->					-	-	-	0-5		
CEM V	Směsný cement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	-	←----- 18-30 ----->			-	-	-	-	0-5		
		CEM V/B	20-38	31-49	-	←----- 31-49 ----->			-	-	-	-	0-5		

<sup>a</sup> Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.  
<sup>b</sup> Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.  
<sup>c</sup> Hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, v pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarovány v označení cementu (viz příklad v kapitole 8).



### 3 Latentně hydraulické příměsí

Příměsí jsou anorganické látky, které se přidávají do betonu a upravují tak některé vlastnosti čerstvého nebo zatvrdlého betonu. Dělí se na typ I a na typ II. Typ I jsou inertní příměsí což je například filer (kamenná moučka, jemně mletá vápenec), typ II jsou pucolány nebo latentně hydraulické příměsí (křemičitý úlet, popílek nebo vysokopecní struska).

Pokud se používají příměsí typu II a to popílek nebo křemičitý úlet, je nutné vzít v úvahu koncepcí k-hodnoty, jež slouží pro výpočet ekvivalentního vodního součinitele a nahrazuje tak klasický vodní součinitel. [10]

$$\text{voda} / (\text{cement} + k * \text{příměs})$$

Tab. č. 5 - Koeficient k podle použité příměsí

Příměs	Hodnota k
Mikrosilika	2,0
Elektrárenský popílek	0,4
Vysokopecní struska	0,6

#### 3.1 Latentní hydraulická

Hydraulická aktivita je schopnost látky tvrdnout ve vodním prostředí za normální teploty. Latentně hydraulická látka sama o sobě po smíchání s vodou netvrdne, ale pokud reaguje s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ve vodním prostředí za normální teploty začne tvrdnout. Podmínkou chemické reakce je alkalické prostředí vytvářené v roztoku i jinými chemickými sloučeninami, tzv. budiči hydraulicity (síranové, alkalické). [5]

Z chemického hlediska je můžeme dělit [10]:

1. Látky obsahující amorfní  $\text{SiO}_2$  o obsahu větším jak 47% hmot., které lze rozpustit v kyselém i v alkalickém prostředí a vykazují pucolánové nebo latentně hydraulické vlastnosti. Do této skupiny patří dolomit, opál, křemičitý úlet.

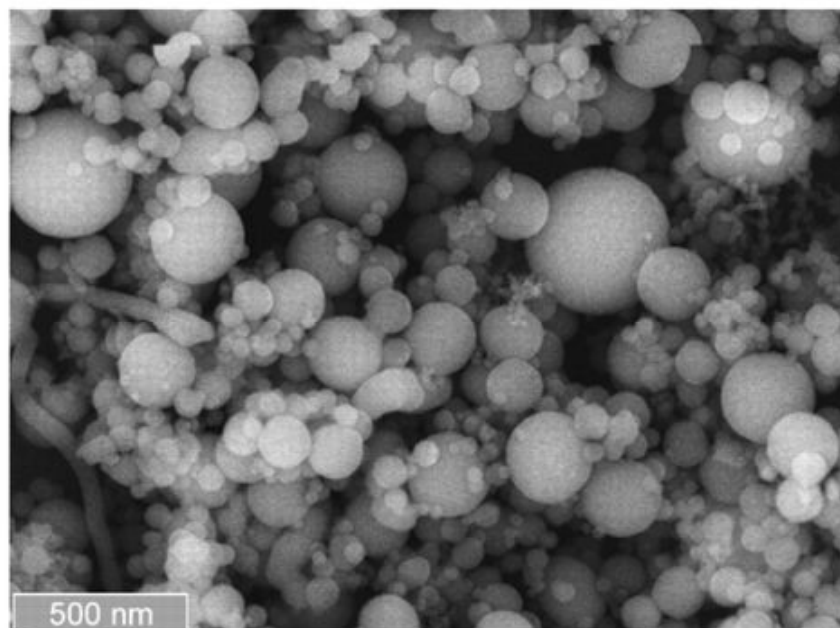


2. U pálené hlíny, strusky a popílku se projevují latentně hydraulické vlastnosti. Vyrábí se rozemletím málo pálených jílových zemin ( $600^{\circ}\text{C} - 800^{\circ}\text{C}$ ) a obsahují 16% – 53% hmot. oxid vápenatý ( $\text{CaO}$ ). Jako budič hydraulicity lze použít nap. cement, vápno,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{CaSO}_4$ .
3. Látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením magmatu, sem patří např. pravé pucolány, tufy, třasy. Látky sopečného původu obsahují 45% – 70% hmot.  $\text{SiO}_2$ , 10% – 20% hmot.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3% – 10% hmot.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 2% – 12% hmot.  $\text{CaO}$ , do 2% hmot.  $\text{MgO}$ , 3% – 10% hmot.  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ . Vulkanické horniny nejčastěji obsahují 50% – 80% hmot. amorfní sklovité fáze a 20% – 50% hmot. krystalické fáze.

### 3.2 Mikrosilika

Jelikož křemičité úlety obsahují velké množství siliky ( $\text{SiO}_2$ ) mohou nést název mikrosilika.

Mikrosilika (obr. č. 10) vzniká v obloukové elektrické peci. K tavení dochází při teplotě vyšší než  $2000^{\circ}\text{C}$ . Během redukování křemene vzniká plynný  $\text{SiO}$ , který stoupá v peci vzhůru, kde dochází k jeho ochlazení, kondenzaci a oxidaci ve formě jemných částic  $\text{SiO}_2$ , jež se shromáždí v odlučovacím systému. [11].



Obr. č. 10 - Mikrosilika v elektronovém mikroskopu

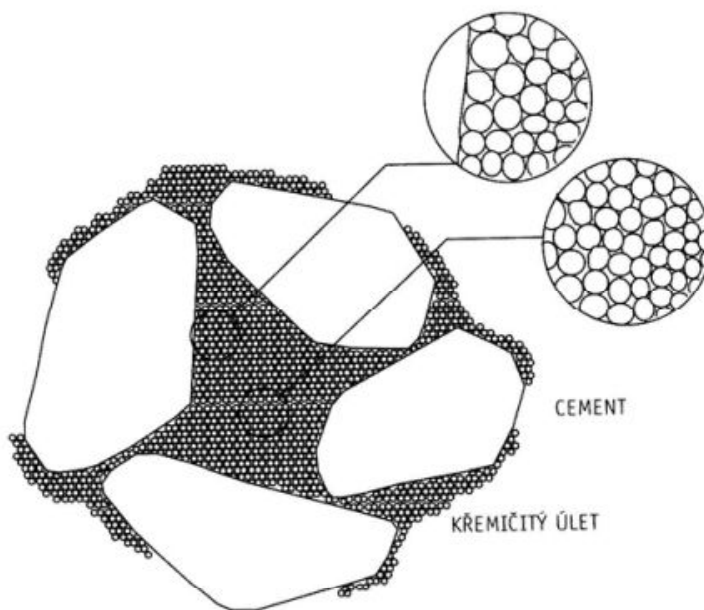


Podle typu produkované slitině dochází ke kolísání obsahu  $\text{SiO}_2$ , pokud je ve slitině vysoký obsah křemíku je vysoký obsah  $\text{SiO}_2$  v mikrosilice. Pokud mikrosilika pochází z výroby čistého křemíku, obsahuje více než 90%  $\text{SiO}_2$ . Úlet vznikající během výroby 75% Fe-Si slitiny má obsah  $\text{SiO}_2$  vyšší než 85%.

Mikrosilika je tvořené kulovitými částicemi o velikosti 0,1 – 2  $\mu\text{m}$ . Objemová hmotnost je kolem 2 200  $\text{kg}/\text{m}^3$  a měrný povrch dosahuje hodnot 15000 – 25000  $\text{m}^2/\text{kg}$ . Ovlivňuje mikrostrukturu a mechanické vlastnosti betonu nejen rychlou pucolánovou reakcí, ale částice mikrosiliky vyplňují mezery mezi zrny cementu (obr. č. 11) – filer. Je tak možné snížit vodní součinitel a dosáhnout hutnější mikrostruktury s vyšší pevností. U betonu se zlepší pevnost zejména mezi 7 – 28 dny.

Díky malým rozměrům úletu dochází k redukci vnitřního a vnějšího odměšování vody. Pokud se úlet přidá do směsi, jenž má nízký vodní součinitel a jinak je lepivá dojde ke ztekucení. Mezi další výhody mikrosiliky je redukce poréznosti cementové pasty, hůře tak propouští vodu a zvyšuje se tak trvanlivost. Jelikož mikrosilika má vysoký měrný povrch vzrůstá tak spotřeba záměsové vody a to o 1 litr na 1 kg úletů, jenž je potřebná k dobré zpracovatelnosti a dochází tak k zhoršení vlastností betonu. Proto je nutné použít superplastifikátory, aby byl zachován nízký vodní součinitel. Maximální množství mikrosiliky musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru mikrosilika/cement a musí být  $\leq 0,11$ . Křemičitý úlet se dodává buď v cisternách nebo v pytlích či vacích, může být neupravený, ale pak dochází k obtížnému vyprazdňování. Proto se pro lepší manipulaci křemičitý úlet zahušťuje a obsahuje tak přibližně 50% pevné složky.

[11]



Obr. č. 11 - Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem [11]

### 3.3 Popílek

Popílek jsou dělené na vysokoteplotní – klasické a na nízkoteplotní – fluidní.

Popílek klasický vzniká jako produkt při spalování uhlí o teplotě 1 400 – 1 600 °C v tepelných elektrárnách, jenž se shromáždí v odlučovacím systému (obr. č. 12). Složení popílku je proměnné a závisí na druhu spalovaného uhlí, spalovacím procesu a na způsobu odlučování. Odlučování může být buď elektrostatické, které dosahuje odlučivosti až 99% nebo mechanické, jež je ze speciálních vláken vzdorujících vysokým teplotám. Popílek získaný z černého uhlí obsahuje skelné kuličky o velikosti zrn cementu, je vhodnější do betonu než popílek z hnědého uhlí, avšak dosahuje menší variability. Popílek z hnědého uhlí má nepravidelný tvar. Popílek zlepšuje reologické vlastnosti betonu a zvyšuje jeho odolnost vůči chemicky agresivnímu prostředí.

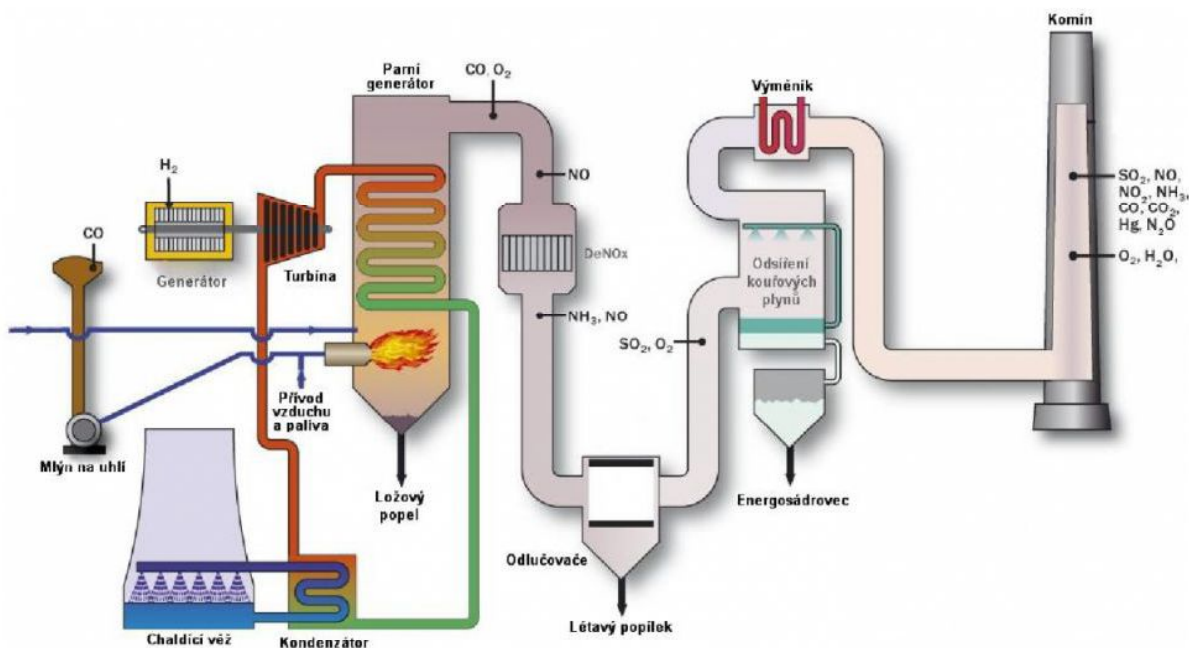
Popílek (obr. č. 13) je jemný prášek tvořený malými sklovitými částicemi převážně z  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , vykazující pucolánové vlastnosti. Dosahuje velikosti 1 – 150  $\mu\text{m}$ , měrného povrchu 200 – 600  $\text{m}^2/\text{kg}$  a objemová hmotnost se pohybuje mezi 2000 – 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ . Podle ASTM rozlišujeme dva typy popílků, typ F a typ C. Typ F (křemičitý popílek) vzniká spalováním antracitu nebo velmi kvalitního hnědého uhlí, má pucolánové vlastnosti a reakce probíhá za přítomnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Tento popílek obsahuje



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí

$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  okolo 70% a CaO méně než 3%. Typ C (vápenatý popílek) vzniká spalováním mladého hnědého uhlí a lignitu, jelikož obsahuje vysoké množství aktivního CaO, má hydraulické vlastnosti, aniž by byl použit aktivátor. Obsahuje  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  okolo 50% a CaO více než 20%.

[4, 11, 12]



Obr. č. 12- Schéma vysokoteplotního spalování uhlí

Maximální množství popílku musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru popílek/cement a musí být  $\leq 0,33$ .

Popílky musí být kontrolovány, poněvadž u nich může dojít k vyšší pravděpodobnosti překročení limitu hmotnostní aktivity Ra-226, která je u stavebních látek 150 Bq/kg. Popílky také obsahují prvky těžkých kovů, které se vyluhováním stávají potenciálním nebezpečím.

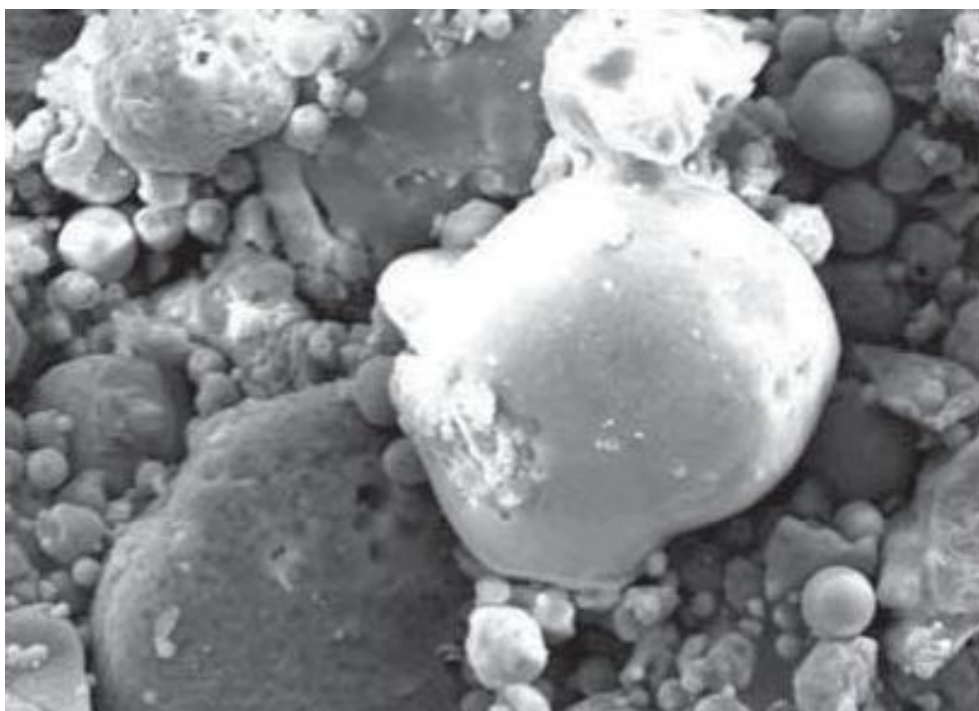
Popílek fluidní vzniká fluidním spalováním, kdy je uhlí nadrceno na velikost cca 20 mm, přidá se k němu vápenec a ve spalovací komoře fluidního kotle se vypálí o teplotě 700 – 900 °C. Tyto popílky obsahují velké množství volného CaO a  $\text{SO}_3$  a většinou nesplňují požadavky ČSN EN 450-1.





Teploty spalování jsou nižší než při klasickém spalování, je nezareagovaný CaO přítomen ve formě měkce páleného vápna, a je tedy reaktivní. Charakteristickým rysem fluidních popílků je nízký obsah taveniny. Dochází u nich k výraznějšímu kolísání vlastností, zejména chemického složení, měrné hmotnosti a ostatních parametrů, způsobené nestabilitou spalovacího procesu a variabilitou vlastností vstupních komponentů (uhlí, odsiřovací činidla).

[4, 11, 12]



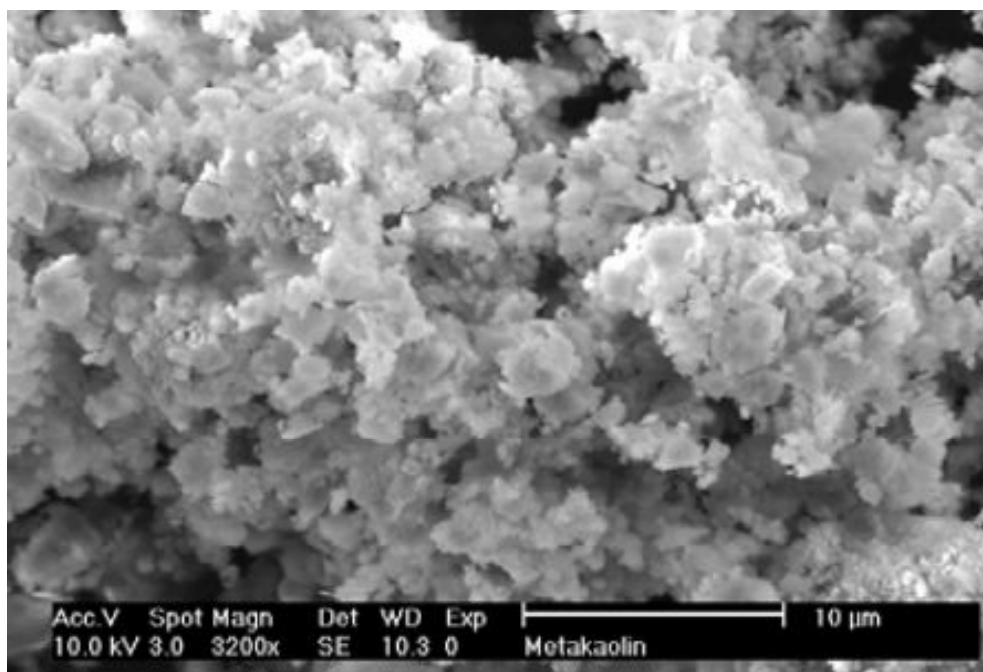
Obr. č. 13 - Mikrostruktura popílku

### 3.4 Metakaolin

Metakaolin (obr. č. 14) není odpad, ale jedná se cílový produkt typu pucolánu, jež se vyrábí výpalem kaolínu a kaolinitických jíílů při teplotě 600 – 900 °C. Při tomto procesu je z kaolínu vypuzena mezimřížková voda a vzniká pucolánově aktivní látka – metakaolin. Základní složkou kaolínu je kaolinit, který vzniká zvětráváním živců. Mezi základní složky patří oxid křemičitý –  $\text{SiO}_2$  (cca 60%) a oxid hlinitý –  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (cca 38%) a ve zbylé části oxidy vápníku, hořčíku a jiných kovů. Velikost částic se pohybuje v rozmezí



1,0 – 10  $\mu\text{m}$ , měrný povrch dosahuje hodnot 9000 – 18000  $\text{m}^2/\text{kg}$  a objemová hmotnost se pohybuje kolem 2100 – 2500  $\text{kg}/\text{m}^3$ .



Obr. č. 14 - Mikrostruktura metakaolinu

Je schopen reakce s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  za vzniku hydratovaných kalcium silikátů a aluminátů, jež příznivě ovlivňují kvalitu a zlepšují fyzikálně-mechanické a fyzikálně-chemické vlastnosti betonu. Zvyšuje se pevnost, zlepšuje se nasákavost a reologické vlastnosti betonu, zvyšuje odolnost betonu proti působení vody a chemickým rozmrazovacím látkám a dosahuje rychlejšího nárůstu modulu pružnosti. Při porovnání teplot výpalu metakaolinu a cementu, je metakaolin ekonomičtější, jelikož k výpalu dochází při teplotě téměř o polovinu menší než u cementu. Při výrobě metakaolinu vzniká na jednu tunu jen 175 kg  $\text{CO}_2$ , zatímco u cementu vzniká cca 900 kg  $\text{CO}_2$ . Jelikož metakaolin je cílový produkt výroby, a ne odpadní jako ostatní příměsí, je nákladný na výrobu [12].



### 3.5 Vysokopecní granulovaná struska

Tato příměs se v praktické části této diplomové práce nepoužila jako náhrada cementu.

Jedná se o vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci (obr. č. 15). V železné rudě se nacházejí nečistoty převážně sloučeniny  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a drobné příměsi  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  a síry, které přecházejí do strusky a mohou zvyšovat teplotu tavení směsi, čímž dochází ke zvýšení ceny, a proto se přidávají korigující příměsi.

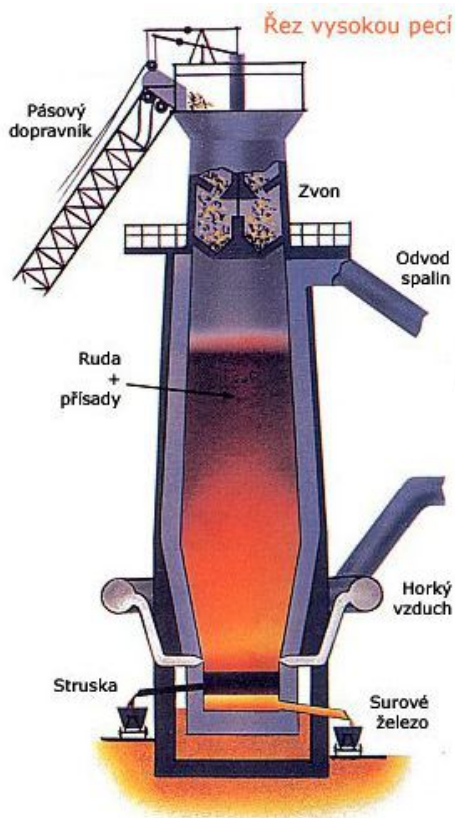
Tab. č. 6 - Složení vysokopecní granulované strusky

	Francie	Severní Amerika	ČR*
$\text{SiO}_2$	29 – 36 %	33 – 42 %	25 – 45 %
$\text{Al}_2\text{O}_3$	13 – 19 %	10 – 16 %	4 – 15 %
$\text{CaO}$	40 – 43 %	36 – 45 %	26 – 45 %
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	< 4%	0,3 – 20 %	< 1,5 %
$\text{MgO}$	< 6%	3 – 12 %	4 – 15 %
S <sup>-</sup>	<1,5 %	–	< 3 %

\*podle materiálů Kotouč Štramberk, s.r.o.



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí



Obr. č. 15 - Výroba železa ve vysoké peci

Roztavená struska plave na povrchu roztaveného železa, jelikož má menší objemovou hmotnost, jenž se pohybuje  $2100 - 2800 \text{ kg/m}^3$ . Chlazení strusky se provádí dvěma způsoby. Prvním způsobem je ponechání strusky tak aby pomalu chladla. Při tomhle způsobu chlazení krystalizuje zejména ve formě melilitu, ackermanitu a gehlenitu. Takto vzniklá struska (obr. č. 16) však nemá hydraulické vlastnosti a nemůže být použita jako náhrada cementu, ani kdyby byla jemně pomleta, používá se jako kamenivo do betonu. Druhým způsobem chlazení je skrápěný vypuštěné strusky vodou, čímž tuhne ve skelném stavu a dojde v ní ke vzniku hydraulických vlastností. Rztavená struska se může hasit třemi způsoby:

- je vypouštěna do vodního bazénu, kde se rozpadne na drobné částice jako hrubý písek, pak se označuje jako granulovaná struska
- k ochlazení je použita tekoucí voda, při čemž opět vzniknou částice podobné hrubému písku a označuje se granulovaná struska



– pomocí kotouče je vymrštěna do vzduchu a k ochlazení tedy působí vzduch a voda, taková to struska se nazývá peletizovaná struska, jelikož se skládá z pelet

[11]

Kvalita strusky je závislá na měrném povrchu, který se pohybuje mezi 340 – 420 m<sup>2</sup>/kg a skelném charakteru. Dobře vyhašená struska (obr. č. 17) má světle žlutou, béžovou nebo šedou barvu, pomalu chlazená struska je mnohem tmavší.



Obr. č. 16 - Struska chlazená vzduchem



Obr. č. 17 - Granulovaná vysokopecní struska



## 4 Vstupní materiály praktické části

Cílem této práce bylo nahrazení cementu latentně hydraulickými příměsemi a to metakaolinem, křemičitým úletem neboli mikrosilikou a elektrárenským popílkem. Byly tedy vyrobeny tři směsi. Každá směs se skládala z cementu a jedné příměsi.



Obr. č. 18- Navážené suroviny

### 4.1 Složení směsi

#### **Cement:**

V této práci byl použit cement ze společnosti Českomoravský cement, a.s., jež je největší výrobce cementu v České republice. Pod tímto názvem tato společnost vystupuje od roku 1998. Výrobní závody se nacházejí v Radotíně a v Mokré, podle místa výroby se cement nazývá.

Konkrétně byl pro tuto práci použit cement CEM I 42,5 R Mokrá.

#### **Metakaolin:**

Metakaolin byl použit ze společnosti České lupkové závody, a.s., jež se zabývají těžbou, výpalem a granulometrickou úpravou žáruvzdorných ostřiv – lupku a kaolínu a touto



činností se zabývá od roku 1958. Tato společnost vyrábí čtyři druhy metakaolinu nesoucí název Mefisto.

Pro tuto práci byl použit metakaolin Mefisto L05.

Tab. č. 7 - Receptura obsahující metakaolin

Metakaolin				
			kg/m <sup>3</sup>	g
0%	cement	42,5 R - Mokrý	1375	2218
	voda	voda	550	887
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	0	0
5%	cement	42,5 R - Mokrý	1300	2097
	voda	voda	546	881
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	65	105
10%	cement	42,5 R - Mokrý	1233	1989
	voda	voda	542,5	875
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	123,3	199
20%	cement	42,5 R - Mokrý	1118	1803
	voda	voda	536,6	865
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	223,6	361
30%	cement	42,5 R - Mokrý	1023	1650
	voda	voda	532	858
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	306,9	495
50%	cement	42,5 R - Mokrý	874	1410
	voda	voda	524,4	846
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	437	705
80%	cement	42,5 R - Mokrý	737	1189
	voda	voda	530,6	856
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Mefisto L05	589,6	951



### **Mikrosilika:**

Při výrobě byla použita mikrosilika (obr. č. 19) ze společnosti Stachema, která byla založena v roce 1992. Tato firma vyrábí a dodává sortiment stavební chemie, materiály pro povrchové úpravy fasád, chemické přípravky a speciální hmoty.

Pro tuto práci byla použita mikrosilika označená jako Stachesil S.



Obr. č. 19 – Navážená mikrosilika

U směsí, které obsahovaly 30, 50 a 80 % mikrosiliky bylo nutné zvýšit vodní součinitel z 0,4 na 0,41, aby bylo možné směs zpracovávat.

Při nižším vodním součiniteli nebylo možné se směsí manipulovat a řádně s ní vyplnit prostor ve formách. Po odbednění vzorků s nízkým vodním součinitelem, byly patrné dutiny a prohlubně, proto se směs vyrobila znova se zvýšeným vodním součinitelem.





Tab. č. 8 - Receptura obsahující mikrosiliku

Mikrosilika				
			kg/m <sup>3</sup>	g
0%	cement	42,5 R - Mokrý	1594	2218
	voda	Voda	478,2	887
	v/c		0,3	0,4
	příměs	Silika SK	0	0
5%	cement	42,5 R - Mokrý	1546	2097
	voda	Voda	463,8	881
	v/c		0,3	0,4
	příměs	Silika SK	77,3	105
10%	cement	42,5 R - Mokrý	1502	1993
	voda	Voda	450,6	877
	v/c		0,3	0,4
	příměs	Silika SK	150,2	199
20%	cement	42,5 R - Mokrý	1420	1811
	voda	Voda	426	869
	v/c		0,3	0,4
	příměs	Silika SK	284	362
30%	cement	42,5 R - Mokrý	910	1468
	voda	Voda	597	1059,3
	v/c		0,41	0,41
	příměs	Silika SK	273	440
50%	cement	42,5 R - Mokrý	740	1193
	voda	Voda	606,8	1079
	v/c		0,41	0,41
	příměs	Silika SK	370	597
80%	cement	42,5 R - Mokrý	580	935
	voda	Voda	618,3	1147
	v/c		0,41	0,41
	příměs	Silika SK	464	748

#### Popílek:

Jako poslední příměs byla použita kombinace dvou elektrárenských popílků z černouhelné elektrárny v Dětmovicích, jenž patří pod společnost ČEZ, a.s.



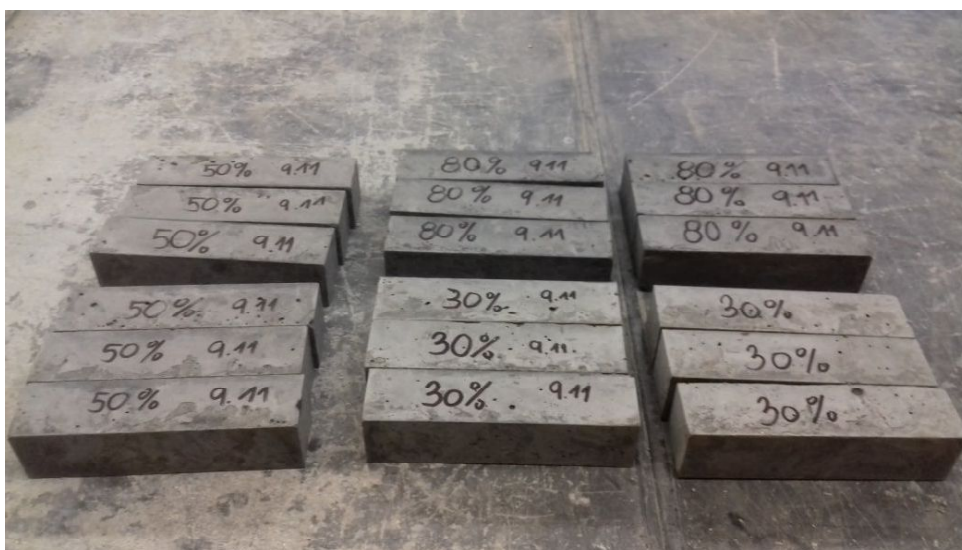
Tab. č. 9 - Receptura obsahující popílek

Popílek				
			kg/m <sup>3</sup>	g
0%	cement	42,5 R - Mokrý	1375	2218
	voda	voda	550	887
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	0	0
	příměs	Popílek S2+S3	0	0
5%	cement	42,5 R - Mokrý	1315	2121
	voda	voda	536,5	865
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	43,833	71
	příměs	Popílek S2+S3	21,9166	35,35
10%	cement	42,5 R - Mokrý	1260	2032
	voda	voda	524,2	845
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	84	135
	příměs	Popílek S2+S3	42	67,74
20%	cement	42,5 R - Mokrý	1164	1877
	voda	voda	502,8	811
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	155,2	250
	příměs	Popílek S2+S3	77,6	125,15
30%	cement	42,5 R - Mokrý	1081	1743
	voda	voda	484,3	781
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	216,2	349
	příměs	Popílek S2+S3	108,1	174,34
50%	cement	42,5 R - Mokrý	946	1526
	voda	voda	454,1	732
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	315,333	509
	příměs	Popílek S2+S3	157,666	254,28
80%	cement	42,5 R - Mokrý	797	1285
	voda	voda	420,8	679
	v/c		0,4	0,4
	příměs	Popílek S1	425,066	686
	příměs	Popílek S2+S3	212,533	342,77



## 5 Výroba zkušebních těles

Cement se nahrazoval třemi příměsemi a to metakaolinem, mikrosilikou a elektrárenským popílkem. Jednotlivé složky se dávkovaly v 0, 5, 10, 20, 30, 50, a 80% hmotnosti a tímto se rozdělily do 7 skupin. Po každou skupinu se vyrobilo 6 zkušebních těles (obr. č. 20). Celkem pro jednu složku, jež nahrazovala cement, se zhotovilo 42 trámečků.



Obr. č. 20 - Zkušební trámečky z mikrosiliky

Jednotlivé složky cementové pasty se podle dané receptury navážily pomocí váhy s přesností  $\pm 1$  g. Postup míchání byl v souladu s normou ČSN EN 196-1. Cement a hydraulická příměs se vložily do míchačky (obr. č. 21) a vzájemně se promísily, poté se přidala voda. Ihned poté se spustila míchačka na nízký výkon a po 30 sekundách se míchání přepnulo na vysokou rychlost po dobu dalších 30 sekund. Míchání se na 90 sekund zastavilo, během kterých došlo k setření ulpělé směsi pomocí stěrky ze stěn a spodní části nádoby a umístění se do středu nádoby. Poté se zaplo míchání na dalších 60 sekund [13].

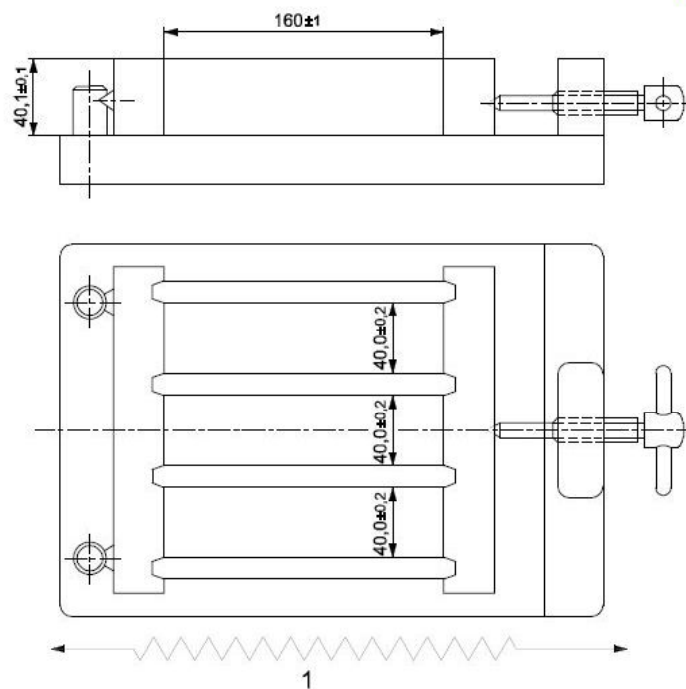


Obr. č. 21 - Automatická míchačka E093 [15]

Každá forma se skládala ze tří vodorovných oddílů, které umožňovali současnou výrobu tří zkušebních trámečků o velikosti 40 mm x 40 mm x 160 mm. Složená forma musí splňovat požadavky na velikost, jež jsou uvedené na obrázku č. 22. Formy byly předem vymazány olejem určeným k vymazání bednicích forem a položeny na hutnicí stůl. Připravená směs se okamžitě po smíchání rozprostřela (obr. č. 23) pomocí plastové stěrky, či kovové špachtle rovnoměrně do forem v jedné vrstvě, jež se zhutnila 60 rázy zhutňovacího stolku. Poté se vnesla druhá vrstva, která se také zhutnila 60 rázy. Formy se opatrně sejmuly ze zhutňovacího stolku a přebytečná vrstva malty se setřela kovovým pravítkem [13].



Rozměry v milimetrech



**Legenda**

1 směr stírání pilovitými pohyby

Obr. č. 22 - Typická forma [13]

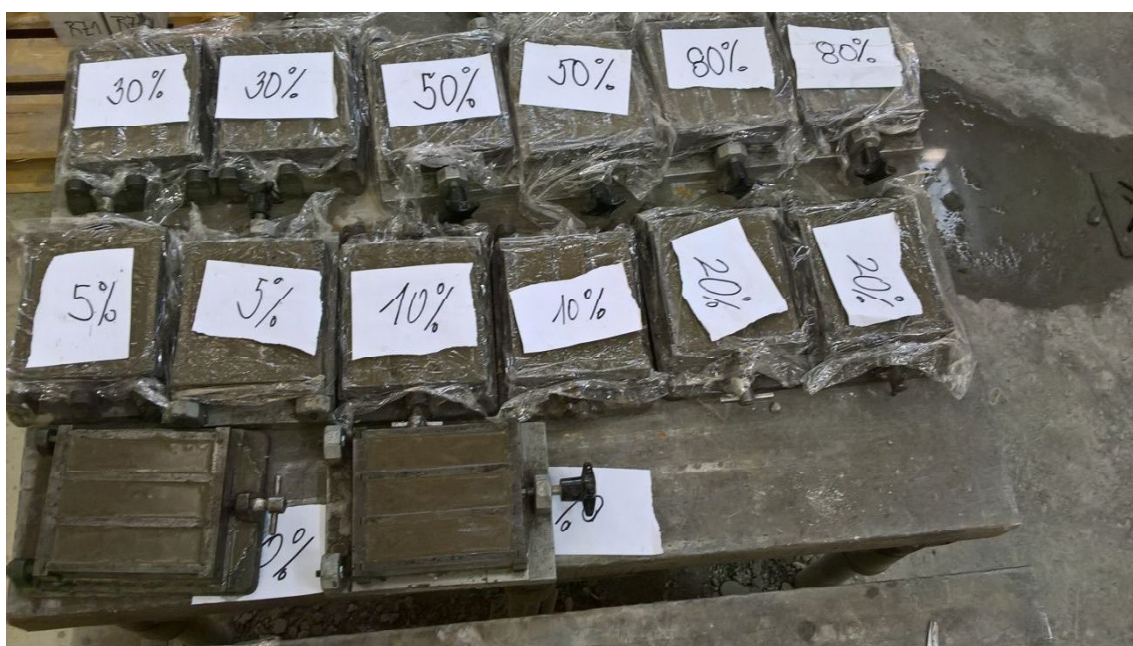


Obr. č. 23 - Formy vyplněné cementovou směsí



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí

Formy se uložily na místo, přikryly se, aby nedocházelo k nadměrnému vysušování a označily se (obr. č. 24). Takto zůstaly formy 20 – 24 hodin, poté se opatrně rozebraly, aniž by došlo k poškození zkušebních těles a hotové trámečky se označily vodovzdorným inkoustem a vložily do nádoby s vodou o teplotě  $20,0 \pm 1,0$  °C, tak aby se nedotýkaly a voda nad horní hranou tělesa neklesla pod 5 mm. Takto umístěny zůstaly zkušební tělesa až do dne provádění zkoušek, kdy se 15 minut před provedením zkoušky z vody vyjmuly a přikryly vlhkou tkaninou. Zkoušky pevnosti se prováděly na vzorcích starých 28 dnů  $\pm$  8 hodin [13].



Obr. č. 24 - Označená zkušební tělesa



## 6 Zkoušky cementové směsi

Na zkušebních tělesech se stanovila objemová hmotnost a poté se provedly zkoušky pevnosti, a to pevnost v tahu za ohybu a poté pevnost v tlaku.

### 6.1 Objemová hmotnost

Stanovila se objemová hmotnost jednotlivých příměsí a cementu pomocí pyknometru (obr. č. 25) tímto vzorcem:

$$\rho = \frac{(m_2 - m_1) \cdot \rho_2}{m_4 - m_3 - m_1 + m_2} \quad (1)$$

kde je

- $\rho$  objemová hmotnost ( $\text{kg/m}^3$ );
- $m_1$  hmotnost prázdného pyknometru (g);
- $m_2$  hmotnost pyknometru s navážkou (g);
- $m_3$  hmotnost pyknometru s navážkou a vodou (g);
- $m_4$  hmotnost pyknometru s vodou
- $\rho_2$  objemová hmotnost vody ( $\text{kg/m}^3$ ).

Objemová hmotnost vody se uvažovala  $995,65 \text{ kg/m}^3$ .



Obr. č. 25 - Pyknometr s metakaolinem a vodou



Objemová hmotnost zkušebních těles se stanovila pomocí tohoto vzorce [14]:

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

kde je

m hmotnost zkušebního tělesa (kg);

V objem zkušebního tělesa (m<sup>3</sup>).

Objem zkušebního tělesa je dán šířkou, výškou a délkou  $V = b * h * l$

## 6.2 Pevnost v tahu za ohybu

Do zkušebního stroje se umístil zkušební trámeček kolmo na směr plnění ve stáří 28 dní (obr. č. 26, 27), zatížil se zvyšující rovnoměrnou rychlostí  $50 \pm 10$  N/s až do zlomení. Tyto dvě půlky zkušebního trámečku se uchovaly pro následující zkoušku pevnosti v tlaku [13].

Pevnost v tahu za ohybu  $R_f$  se vypočítala ze vztahu, který je v ČSN EN 196-1:

$$R_f = \frac{1,5 * F_t * l}{b^3} \quad (2)$$

kde je

$R_f$  pevnost v tahu za ohybu (MPa);

B strana čtvercového průřezu trámečku (mm);

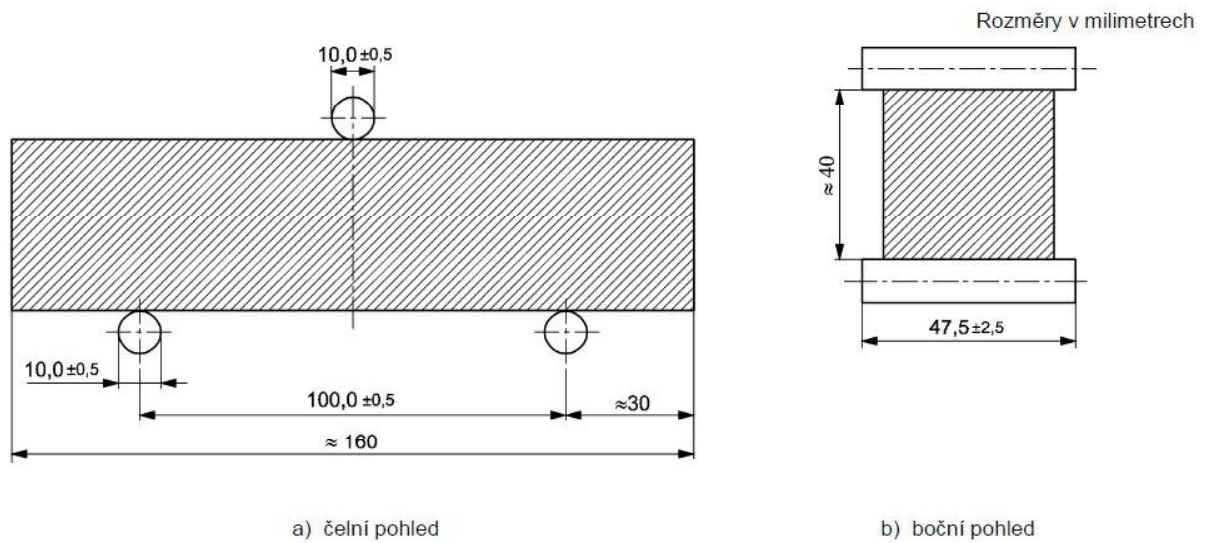
$F_f$  zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení (N);

l vzdálenost mezi podporami (mm).





**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí



Obr. č. 26 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu [13]



Obr. č. 27 - Trámeček tvořený s 5% náhradou popílkem uložený ve zkušebním tělese pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu



### 6.3 Pevnost v tlaku

Poloviny trámečků získané z předešlé zkoušky pevnosti v tahu za ohybu se jednotlivě upevnily do zkušebního stroje (obr. č. 28) a zatěžovaly se plynulou rychlostí  $2400 \pm 200$  N/s až do porušení (obr. č. 29) [13].

Pevnost v tlaku  $R_c$  se vypočítala ze vztahu, který je udán v ČSN EN 196-1:

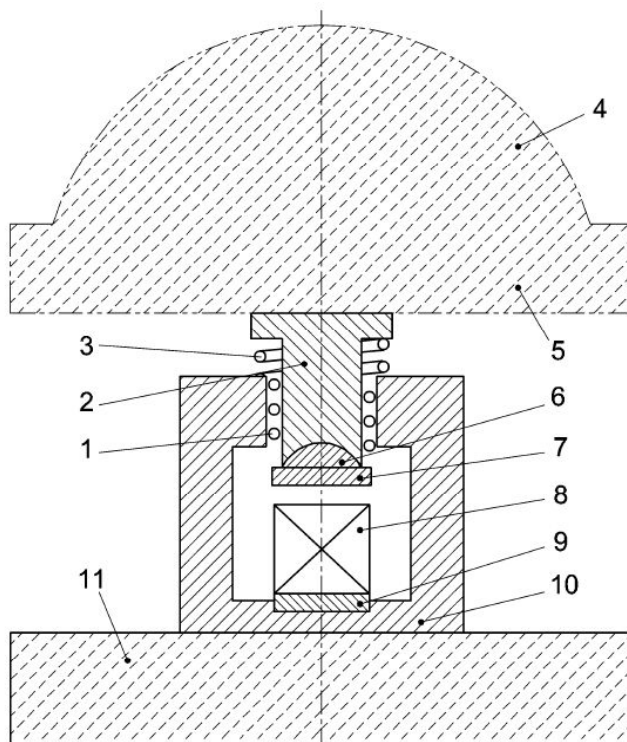
$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (3)$$

kde je

$R_c$  pevnost v tlaku (MPa);

$F_c$  nejvyšší zatížení vynaložené při porušení (N);

1600 plocha destiček nebo pomocných destiček ( $\text{mm}^2$ )



Obr. č. 28 - Zkušební stroj pro zkoušku v tlaku [13]

#### Legenda

1 kuličková ložiska

2 pohyblivá část



- 3 vratná pružina
- 4 kulové uložení tlačné desky zkušebního stroje
- 5 horní tlačná deska zkušebního stroje
- 6 kulové uložení tlačné destičky přípravku
- 7 horní tlačná destička přípravku
- 8 zkušební těleso
- 9 dolní destička přípravku
- 10 přípravek



Obr. č. 29 - Porušené těleso zkouškou v tlaku



## 7 Výsledky

### 7.1 Objemová hmotnost

Stanovení objemové hmotnosti je popsán v kapitole 6.1 Objemová hmotnost.

Objemová hmotnost cementu a příměsí je zobrazena v tabulce č. 10, kde je patrné, že největší objemové hmotnosti dosahoval cement. Při náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí se tedy předpokládá, že s jejím vzrůstajícím množstvím bude objemová hmotnost klesat.

Tab. č. 10 - Objemová hmotnost jednotlivých složek

		kg/m <sup>3</sup>
<b>Cement</b>	42,5 R Mokrý	3109,7
<b>Metakaolin</b>	Mefisto L05	2328,3
<b>Mikrosilika</b>	Stachesil S	2103,1
<b>Popílek</b>	Dětmarovice	2311,9
		2183,1

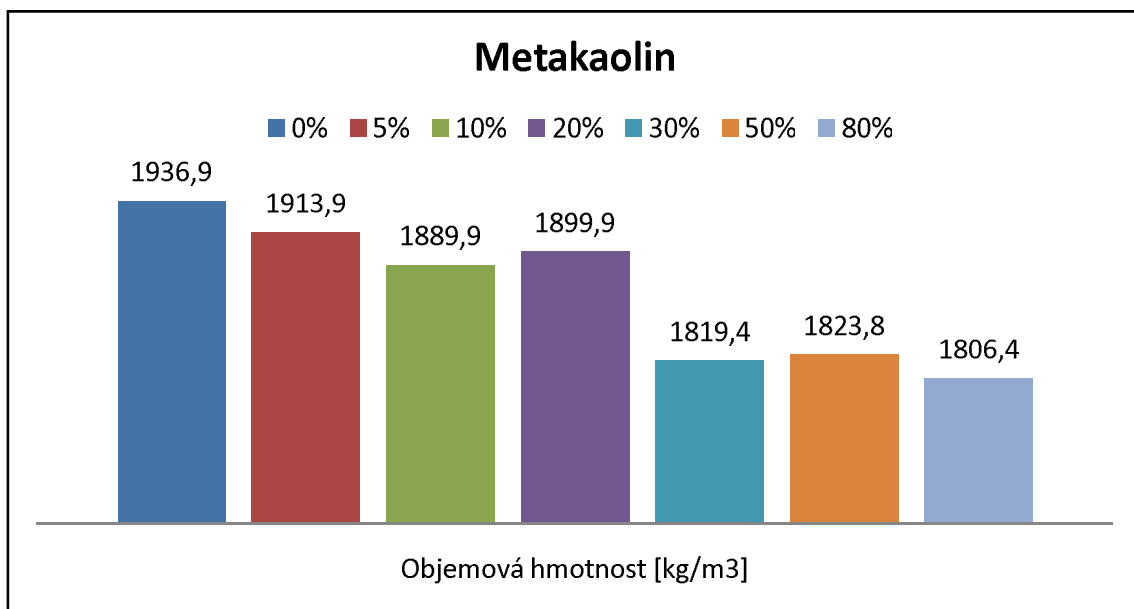


## Metakaolin

Na obrázku č. 30 je vidět, jak objemová hmotnost se vzrůstajícím množstvím metakaolinu klesá.

Tab. č. 11 -Metakaolin – rozměry těles a jejich objemová hmotnost

Metakaolin					
Množství	Rozměry tělesa			Hmot.	Objem.
příměsí	Délka	Šířka	Výška	tělesa	hmot.
%	mm	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>
0%	39,4	40,1	160,1	490,5	1936,9
5%	40,5	40,1	160,3	497,4	1913,9
10%	40,1	40,1	161,4	490,4	1889,9
20%	40,1	40,2	162,2	497,1	1899,9
30%	39,6	40,3	162,4	471,6	1819,4
50%	40,5	40,1	159,7	473,0	1823,8
80%	39,9	40,1	159,5	461,4	1806,4



Obr. č. 30 - Objemová hmotnost směsi s metakaolinem

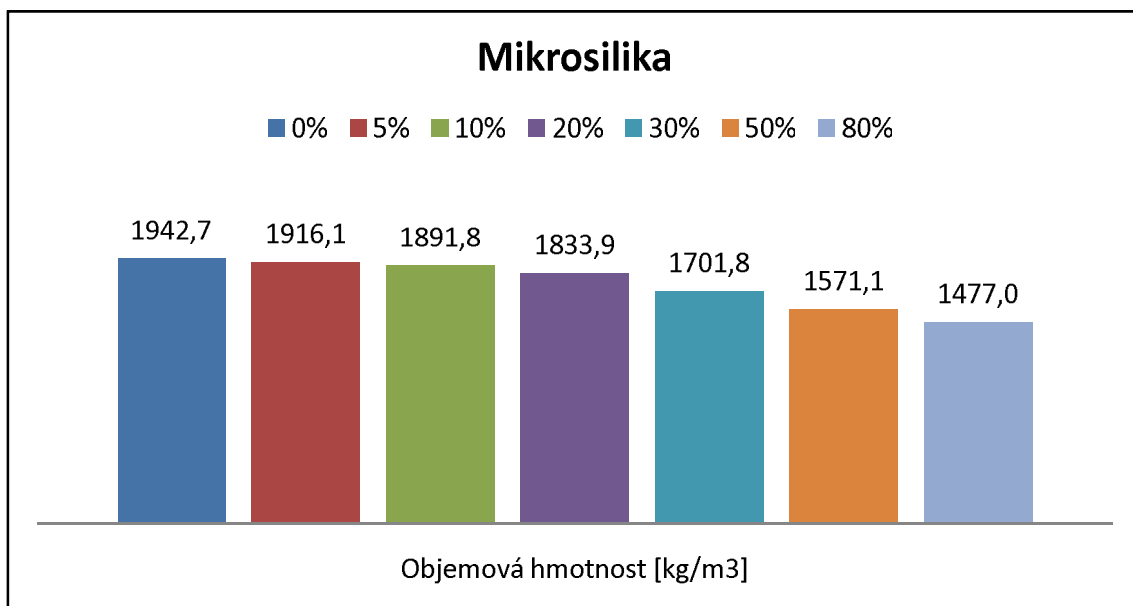


## Mikrosilika

Na obrázku č. 31 je vidět, jak objemová hmotnost se vzrůstajícím množstvím náhrady klesá.

Tab. č. 12 - Mikrosilika – rozměry těles a jejich objemová hmotnost

Mikrosilika					
Množství	Rozměry tělesa			Hmot.	Objem.
příměsí	Délka	Šířka	Výška	tělesa	hmot.
%	mm	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>
0%	39,2	40,1	160,0	488,4	1942,7
5%	39,6	40,2	160,0	488,3	1916,1
10%	40,3	40,2	160,0	490,2	1891,8
20%	40,3	40,0	152,5	450,6	1833,9
30%	39,6	40,0	159,9	431,1	1701,8
50%	40,3	40,0	160,0	405,1	1571,1
80%	40,4	40,0	159,8	380,9	1477,0



Obr. č. 31 - Objemová hmotnost směsi s mikrosilikou

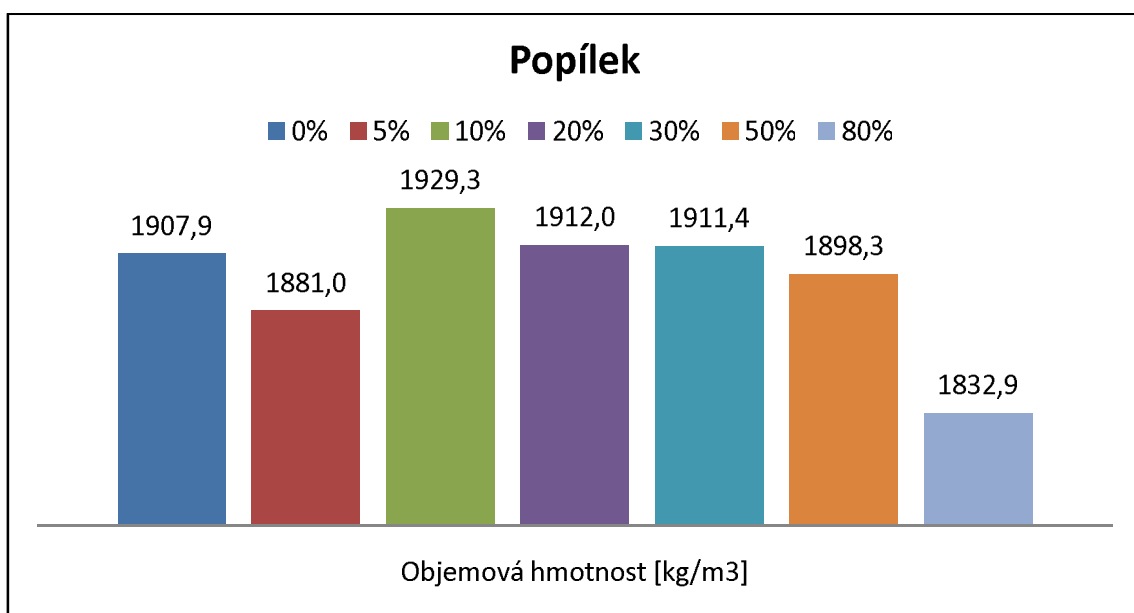


## Popílek

Na obrázku č. 32 je vidět, jak objemová hmotnost do 10% náhrady klesá poté vzroste na maximální hodnotu a opět se vzrůstajícím množstvím náhrady klesá.

Tab. č. 13 - Popílek – rozměry těles a jejich objemová hmotnost

Popílek					
Množství	Rozměry tělesa			Hmot.	Objem.
příměsí	Délka	Šířka	Výška	tělesa	hmot.
%	mm	mm	mm	g	kg/m <sup>3</sup>
0%	37,7	40,3	160,5	465,6	1907,9
5%	39,4	40,3	161,2	481,0	1881,0
10%	39,8	40,0	160,2	491,4	1929,3
20%	40,3	40,0	160,1	493,4	1912,0
30%	39,7	40,1	160,1	487,5	1911,4
50%	40,7	40,1	160,6	496,7	1898,3
80%	41,3	40,3	160,6	489,2	1832,9



Obr. č. 32 - Objemová hmotnost směsi s popínkem



## 7.2 Pevnost v tahu za ohybu

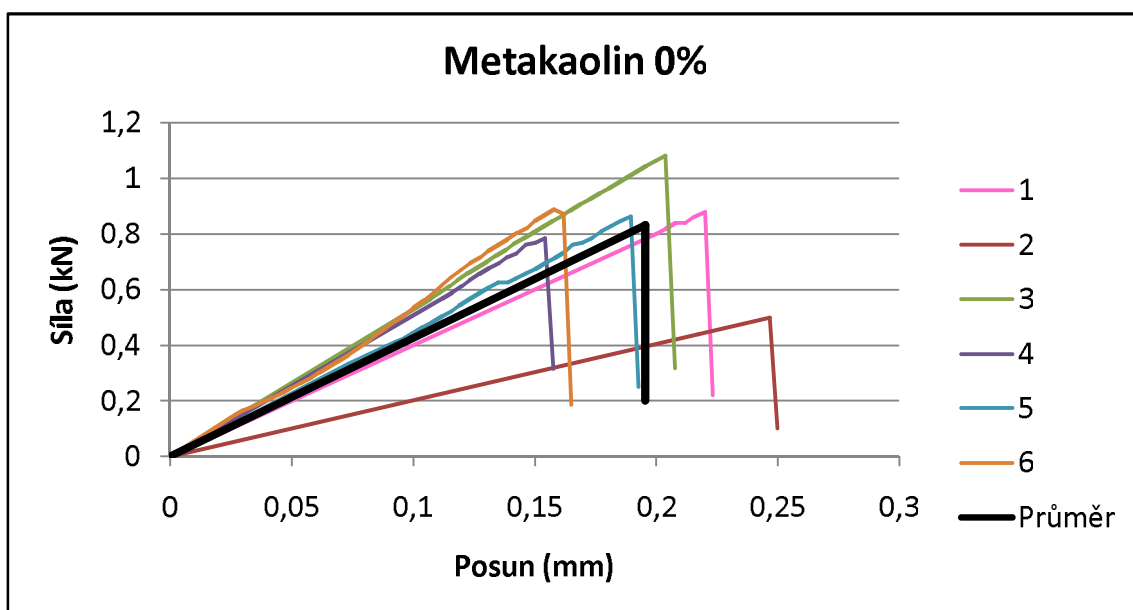
Stanovení pevnosti v tahu za ohybu je popsán v kapitole č. 6.2 Pevnost v tahu za ohybu.

Výsledky této zkoušky se vyhodnotily pro každou přidanou příměs.

### Metakaolin

Na obrázcích č. 33 až č. 39 jsou vidět jednotlivé síly v závislosti na posunu naměřené na jednotlivých tělesech pro všechny procentuální náhrady.

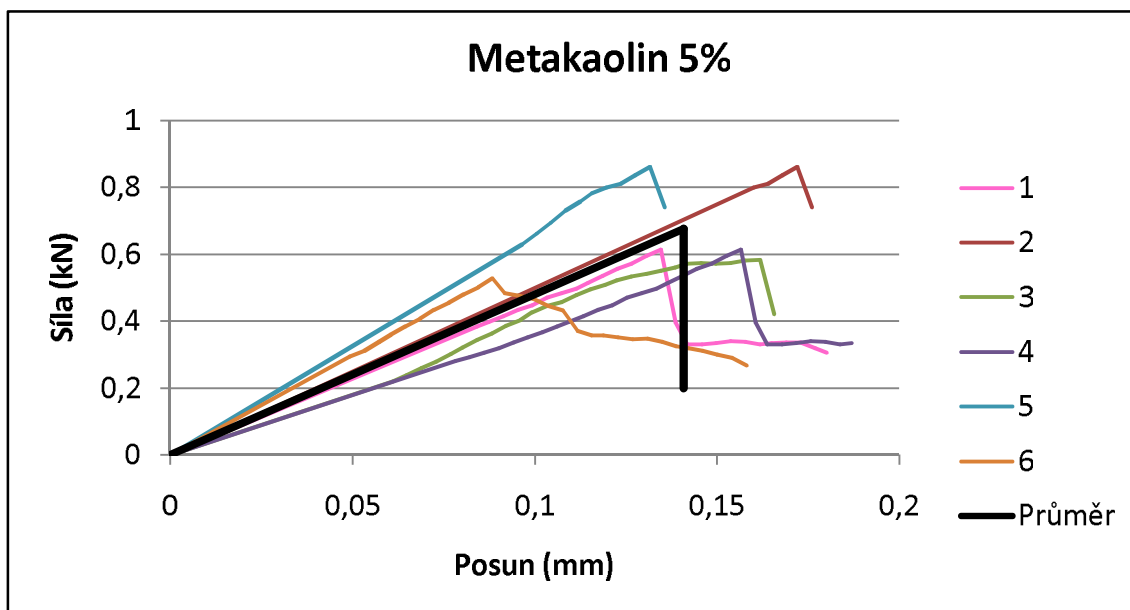
Na obr. č. 33 jsou tělesa ve kterých nebyl metakaolin zastoupen. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,83 kN s posunem 0,19 mm.



Obr. č. 33 - Metakaolin 0%

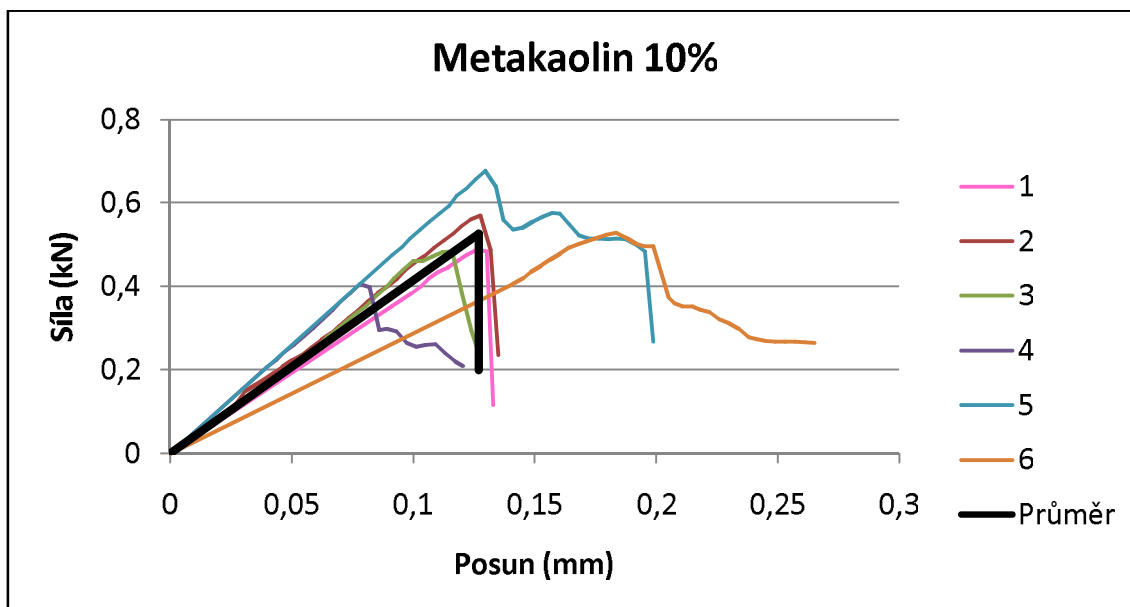
Na obr. č. 34 jsou tělesa, ve kterých bylo 5% metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,68 kN s posunem 0,14 mm.





Obr. č. 34 - Metakaolin 5%

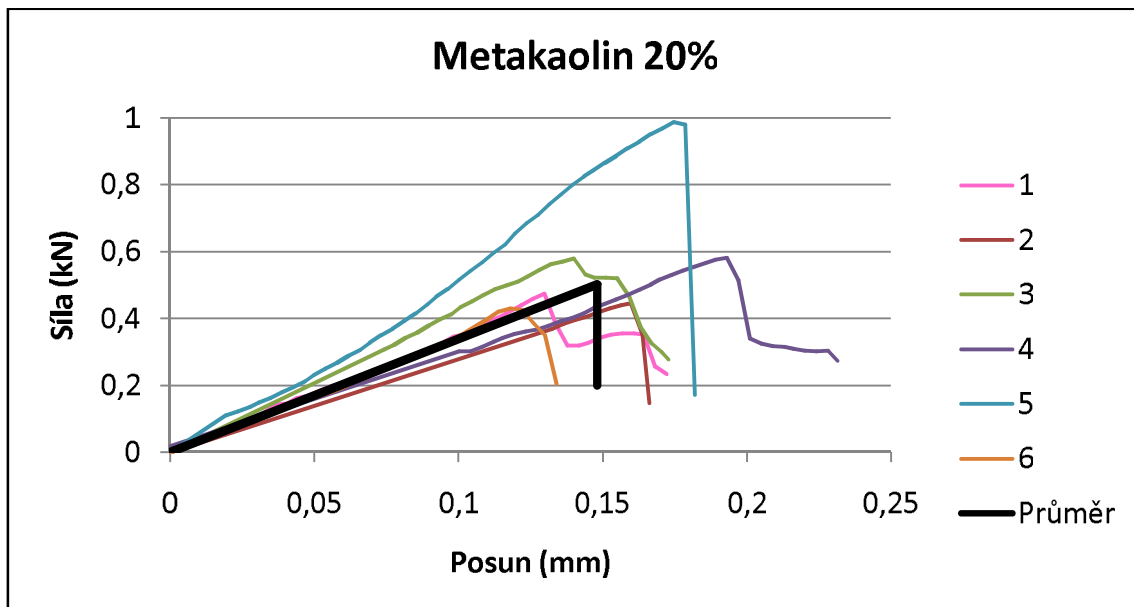
Na obr. č. 35 jsou tělesa, která obsahovala 10% metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,52 kN s posunem 0,13 mm.



Obr. č. 35 - Metakaolin 10%

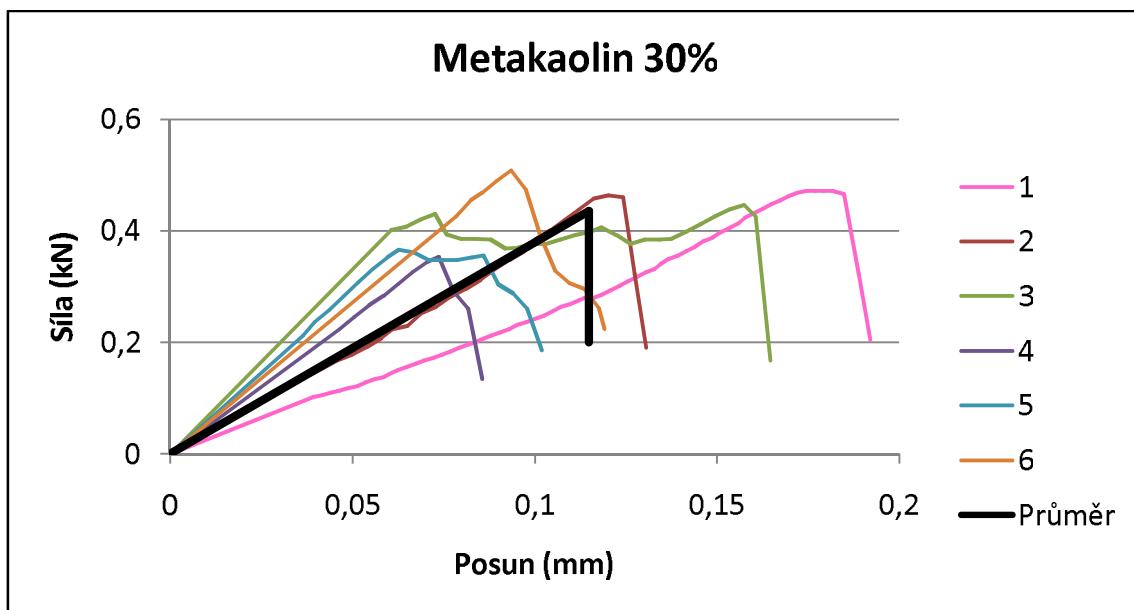


Na obr. č. 36 jsou tělesa, jež obsahovala 20%metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,5 kN s posunem 0,15 mm. Z průměru byl vyloučen vzorek s označením č. 5.



Obr. č. 36 - Metakaolin 20%

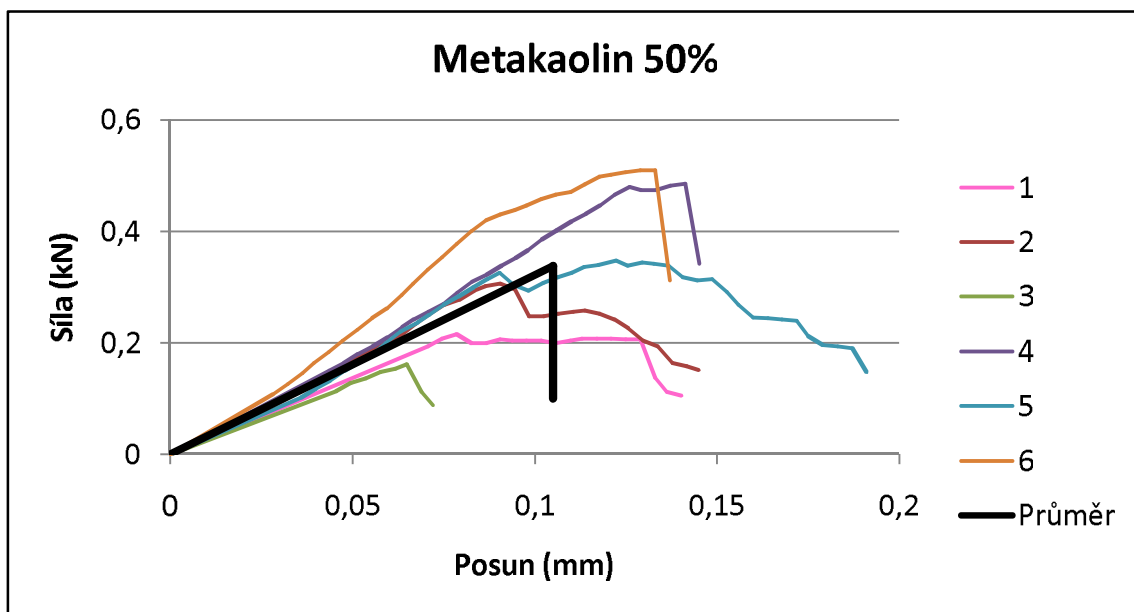
Na obr. č. 37 jsou tělesa, jež obsahovala 30%metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,5 kN s posunem 0,11 mm.



Obr. č. 37 - Metakaolin 30%

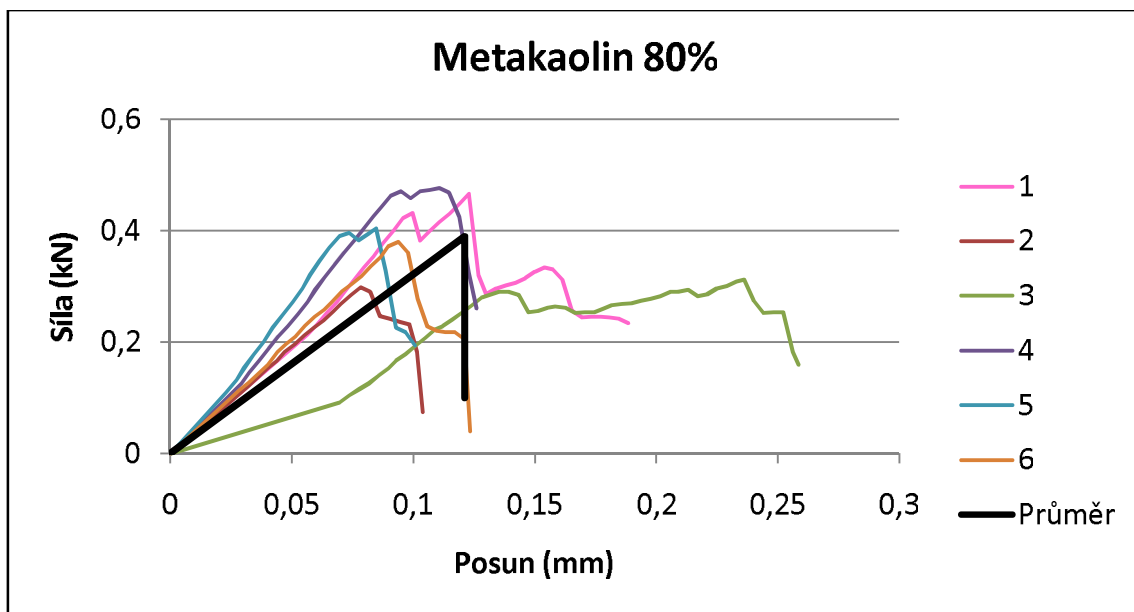


Na obr. č. 38 jsou tělesa, která obsahovala 50%metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,33 kN s posunem 0,11 mm.



Obr. č. 38 - Metakaolin 50%

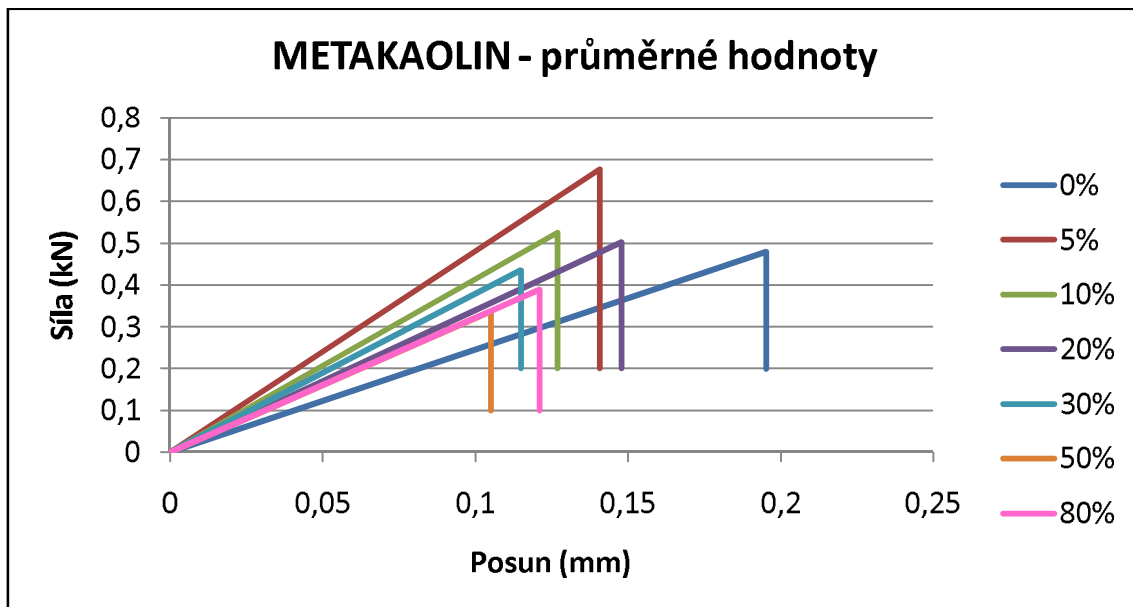
Na obr. č. 39 jsou tělesa, jež obsahovala 80%metakaolinu. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,39 kN s posunem 0,12 mm.



Obr. č. 39 - Metakaolin 80%

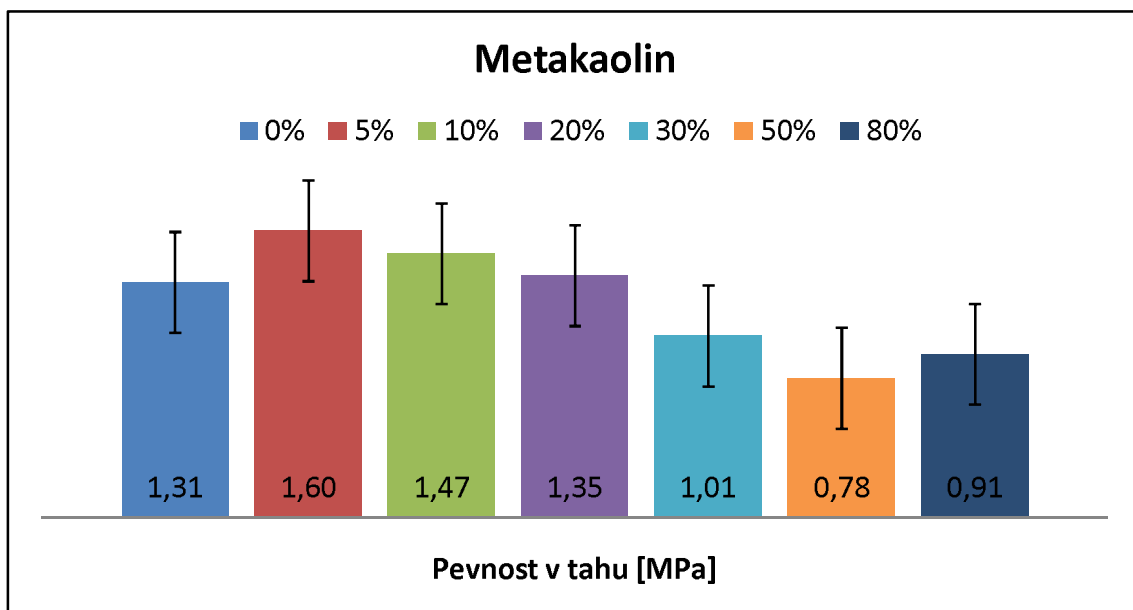


Na obr. č. 40 jsou z předešlých grafů uvedeny jen průměrné hodnoty jednotlivých náhrad. Je patrné, že nejvyšších hodnot dosáhly tělesa s 5% náhradou a nejnižších hodnot tělesa s 50% náhradou.



Obr. č. 40 - Metakaolin – průměrné hodnoty

Obrázek č. 41 je složen ze sloupcových grafů, jež vykreslují změnu pevnosti s měnícím se množstvím použité náhrady. Je zde znázorněna i směrodatná odchylka. Pevnost změřená na tělesech, která neobsahovala žádné množství metakaolinu dosahovala menší hodnoty než pevnost stanovená na tělesech s 5% náhradou. Tato pevnost byla s ohledem na všechny směsi s různým množstvím náhrady metakaolinem nejvyšší. Se zvyšujícím množstvím metakaolinu docházelo ke snižování pevnosti. U 50% náhrady byla naměřená nejmenší pevnost.

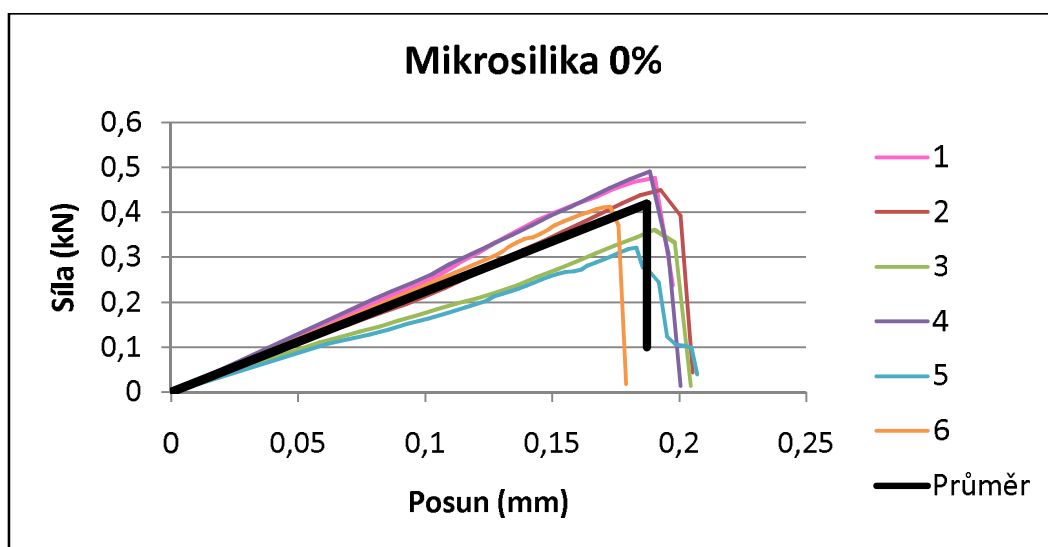


Obr. č. 41 - Metakaolin – pevnost v tahu za ohybu

## Mikrosilika

Na obrázcích č. 42 až č. 48 jsou vidět jednotlivé síly v závislosti na posunu naměřené na jednotlivých tělesech pro všechny procentuální náhrady.

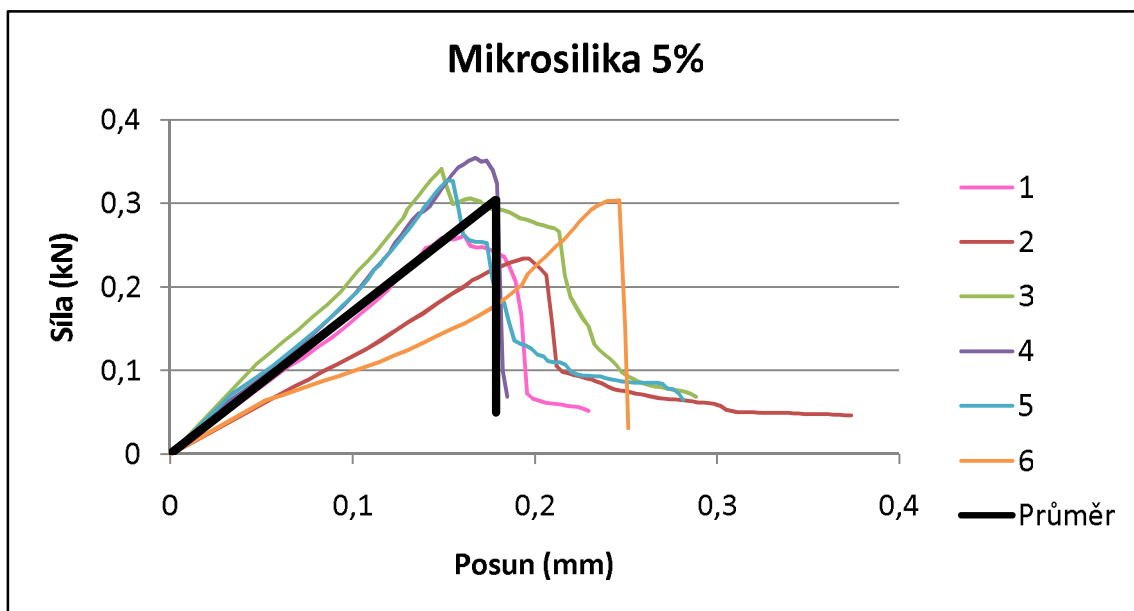
Na obr. č. 42 jsou tělesa ve kterých mikrosilika nebyla zastoupena. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,41 kN s posunem 0,19 mm.



Obr. č. 42 - Mikrosilika 0%

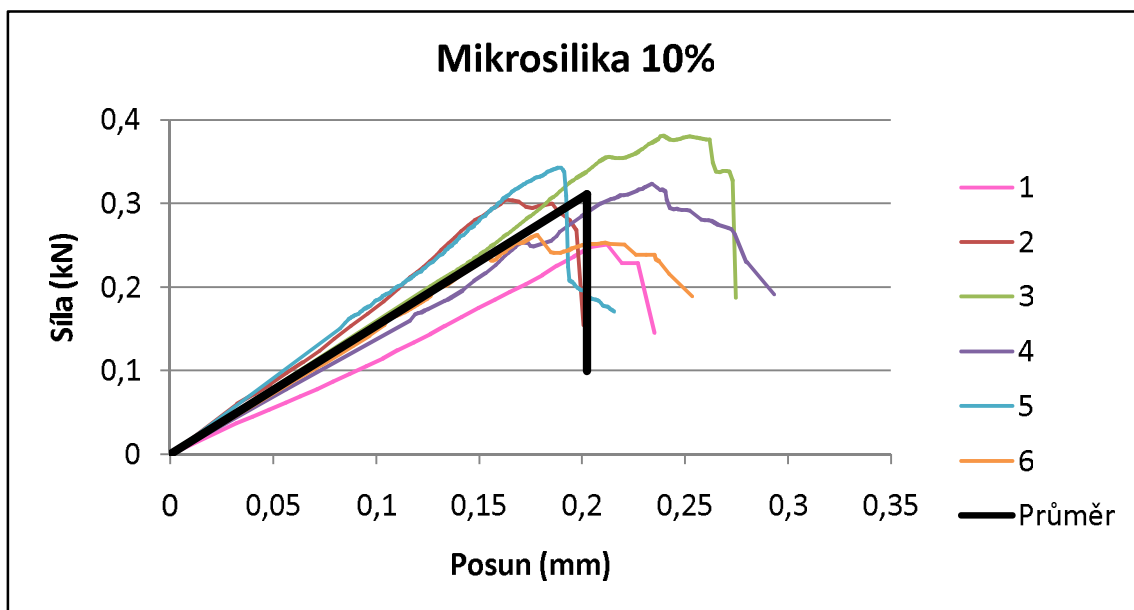


Na obr. č. 43 jsou tělesa, ve kterých byla obsažena mikrosilika jen v 5%. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,3 kN s posunem 0,18 mm.



Obr. č. 43 - Mikrosilika 5%

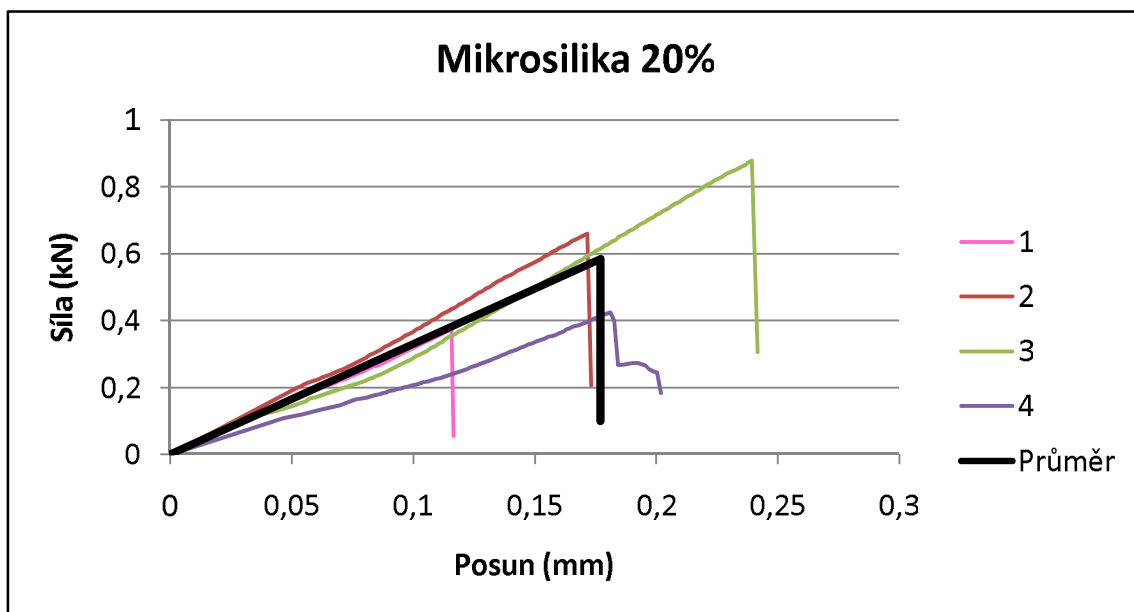
Na obr. č. 44 jsou tělesa s 10% obsahem mikrosiliky. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,31 kN s posunem 0,21 mm.



Obr. č. 44 - Mikrosilika 10%

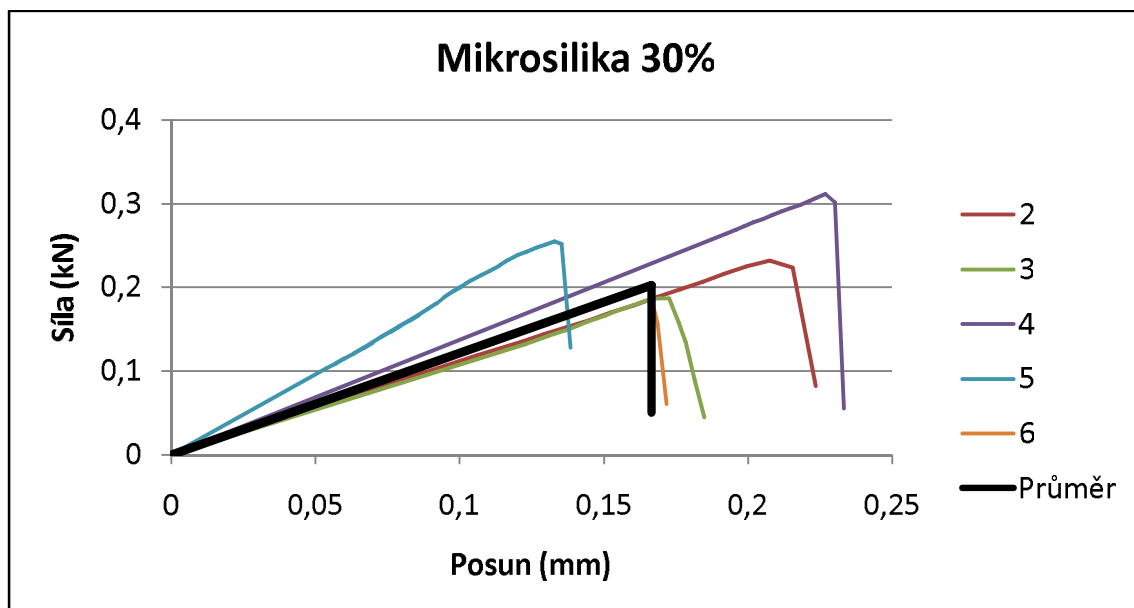


Na obr. č. 45 jsou tělesa s 20% obsahem mikrosiliky. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,58 kN s posunem 0,17 mm. Průměrná hodnota se stanovila pouze a čtyřech tělesech.



Obr. č. 45 - Mikrosilika 20%

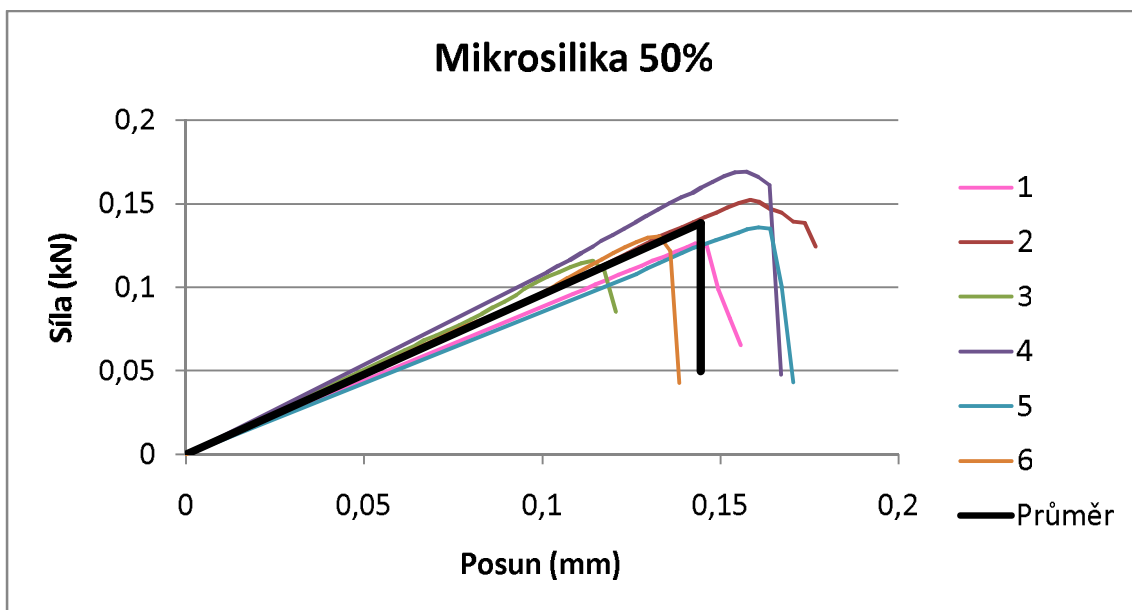
Na obr. č. 46 jsou tělesa s 30% obsahem mikrosiliky. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,2 kN s posunem 0,16 mm. Z průměru byl vyloučen trámeček č. 1, jelikož nebyl vhodný na zkoušku v tahu za ohybu.



Obr. č. 46 - Mikrosilika 30%

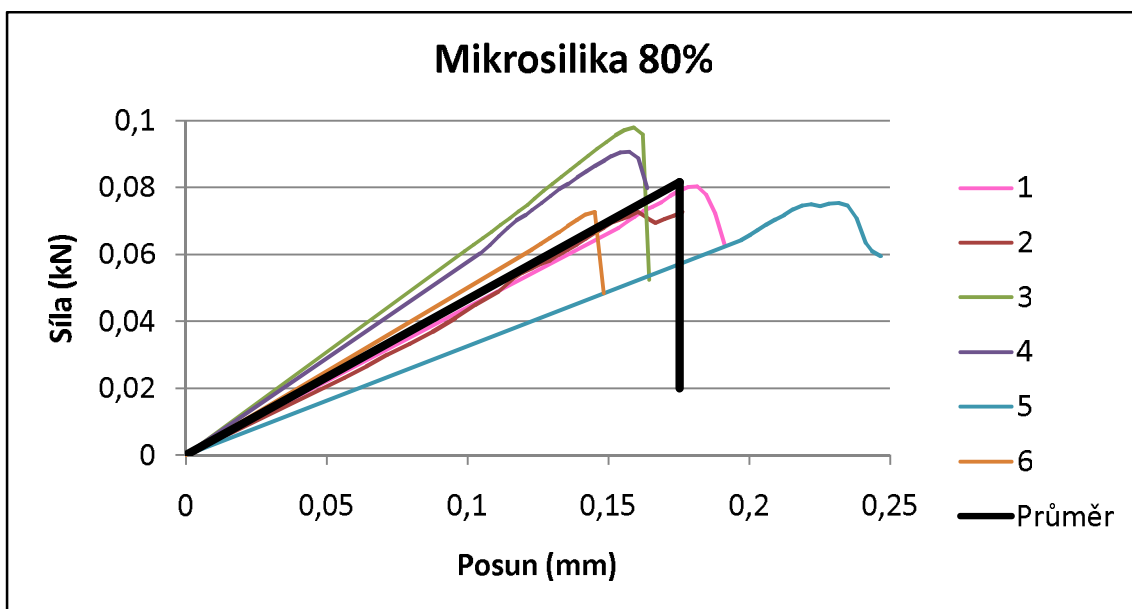


Na obr. č. 47 jsou tělesa s 50% obsahem mikrosiliky. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,13 kN s posunem 0,14 mm.



Obr. č. 47 - Mikrosilika 50%

Na obr. č. 48 jsou tělesa, která obsahovala 80% mikrosiliky. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,08 kN s posunem 0,18 mm.

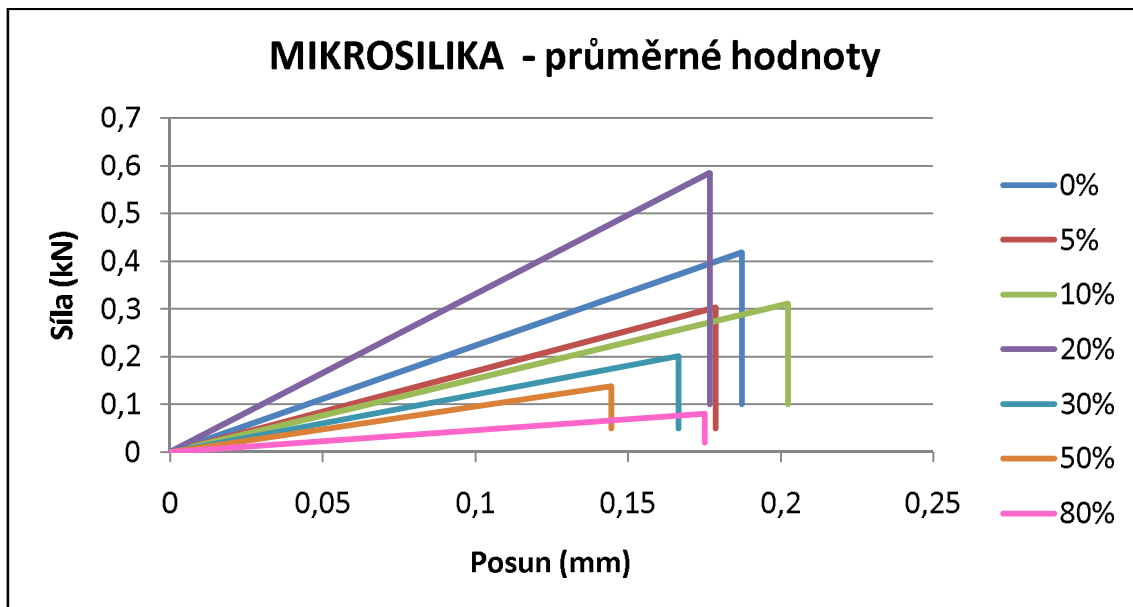


Obr. č. 48 - Mikrosilika 80%



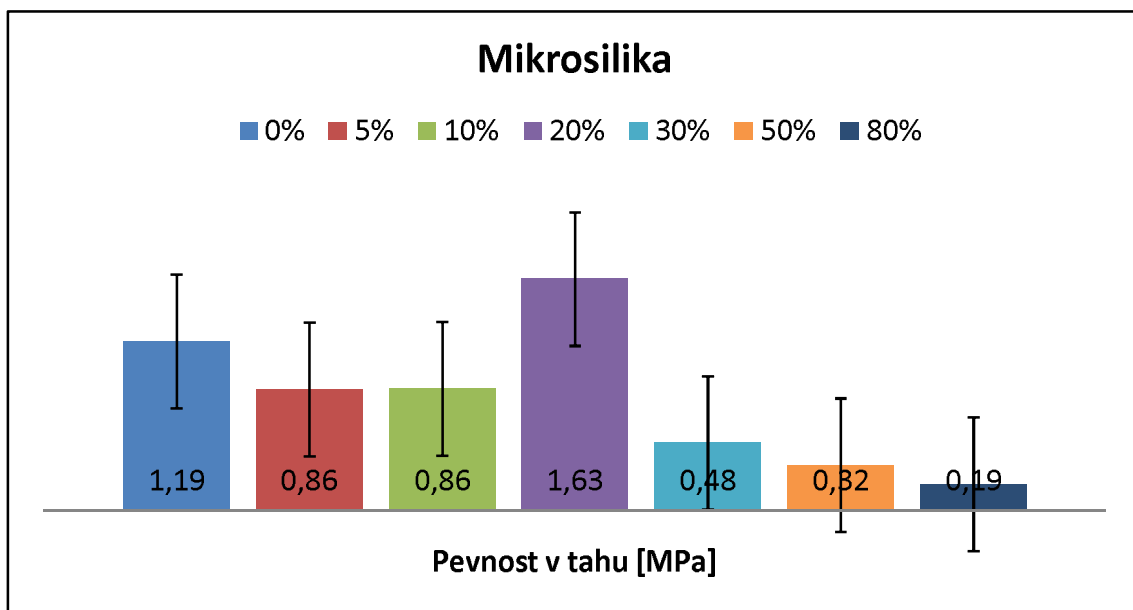


Na obr. č. 49 jsou z předešlých grafů uvedeny jen průměrné hodnoty jednotlivých náhrad. Je patrné, že nejvyšších hodnot dosahovaly tělesa s 20% náhradou a nejnižších hodnot tělesa s 80% náhradou.



Obr. č. 49 - Mikrosilika – průměrné hodnoty

Na obrázku č. 50 jsou pomocí sloupcového grafu znázorněné průměrné pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých náhrad i s vykreslenou směrodatnou odchylkou. Pevnost v tahu u směsi, ve které nebyla použita náhrada mikrosilikou dosáhla vyšších hodnot než směs s 5% a 10% náhradou, se zvýšením množství náhrady na 20% vzrostla pevnost na maximální dosaženou pevnost, avšak tato průměrná hodnota byla stanovena pouze na čtyřech zkušebních tělesech, jelikož došlo k poškození vzorků a nebylo na nich možné stanovit zkoušku v tahu. Dalším zvyšováním množství mikrosiliky se pevnost radikálně snížila a nejnižší hodnoty dosáhla směs s 80% náhradou. Toto snížení je možné přisoudit tomu, že u směsí obsahující víc jak 20% mikrosiliky bylo nutné zvýšit vodní součinitel, kvůli zpracovatelnosti a mohlo tak dojít ve struktuře ke zvýšení pórovitosti.

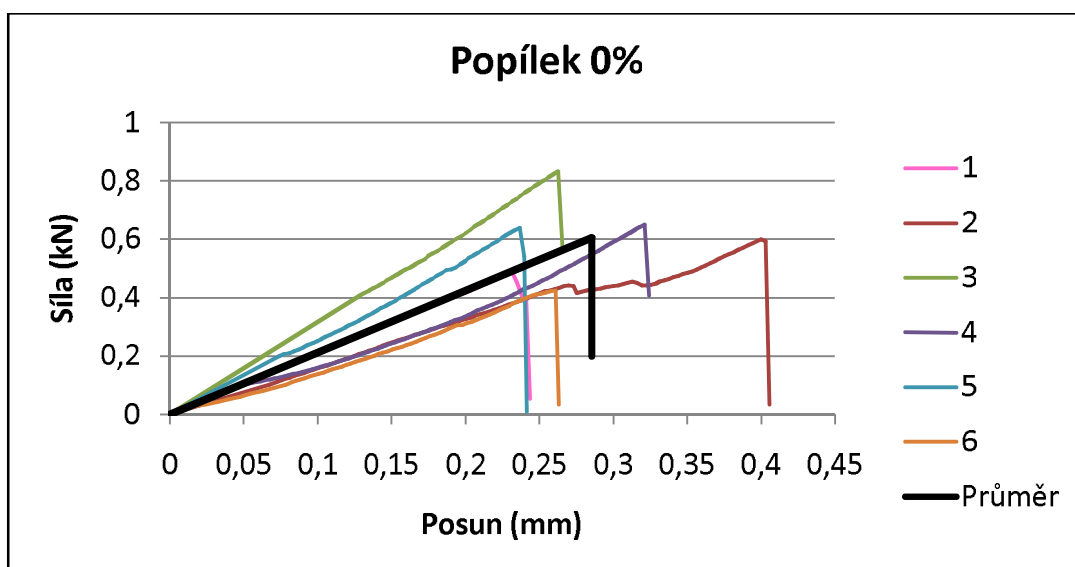


Obr. č. 50 - Mikrosilika – pevnost v tahu za ohybu

## Popílek

Na obrázcích č. 51 až č. 57 jsou vidět jednotlivé síly v závislosti na posunu naměřené na jednotlivých tělesech pro všechny procentuální náhrady.

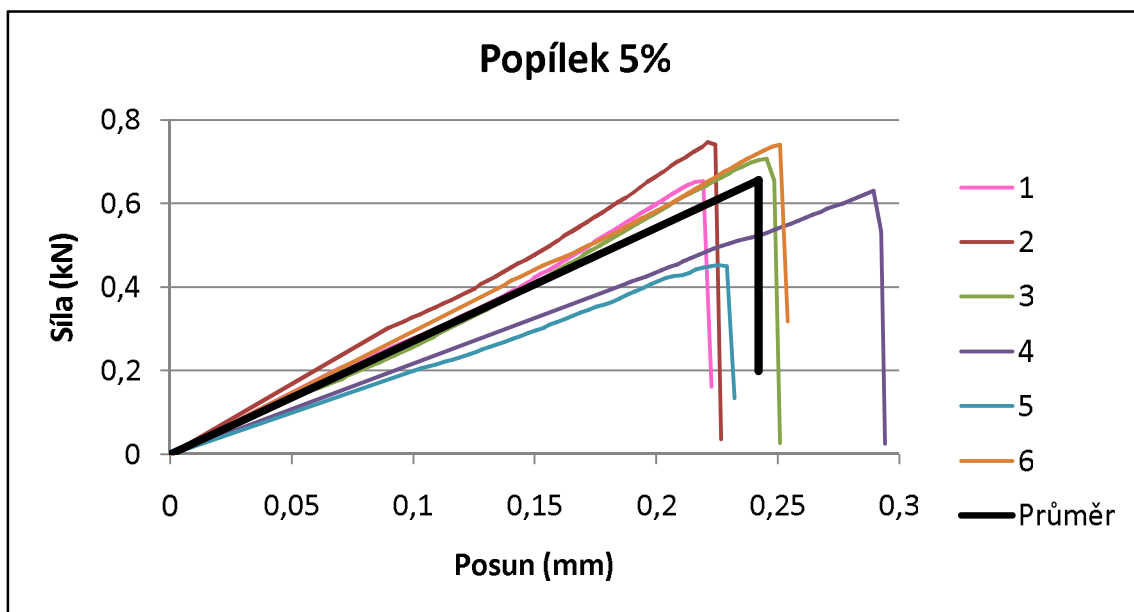
Na obr. č. 51 jsou tělesa, která neobsahovala žádné množství popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,6 kN s posunem 0,29 mm.



Obr. č. 51 - Popílek 0%

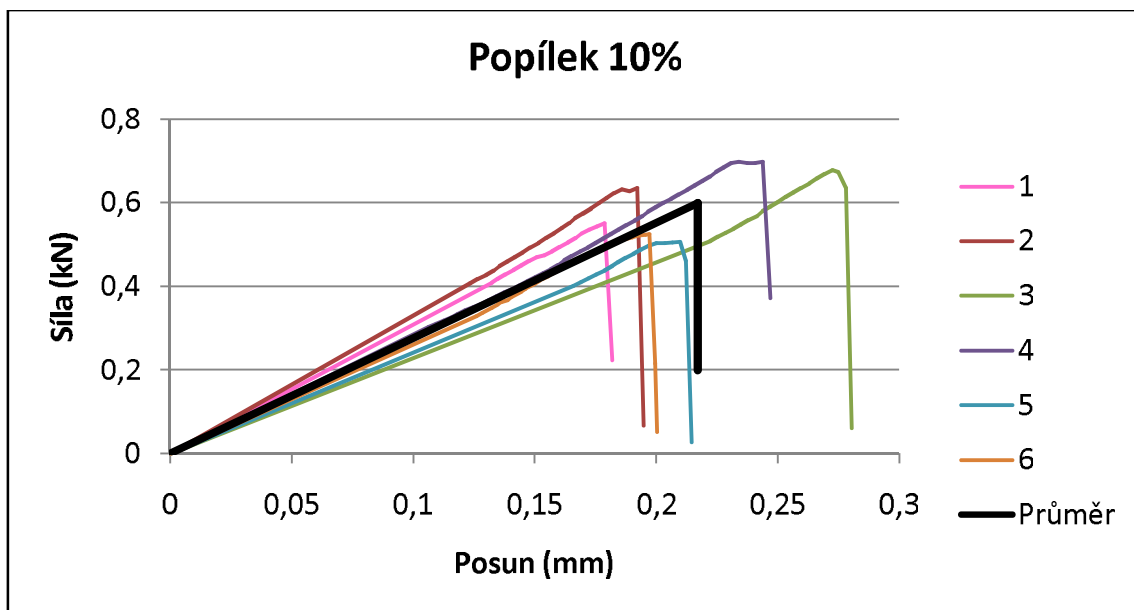


Na obr. č. 52 jsou tělesa, jež obsahovala 5% popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,66 kN s posunem 0,24 mm.



Obr. č. 52 - Popílek 5%

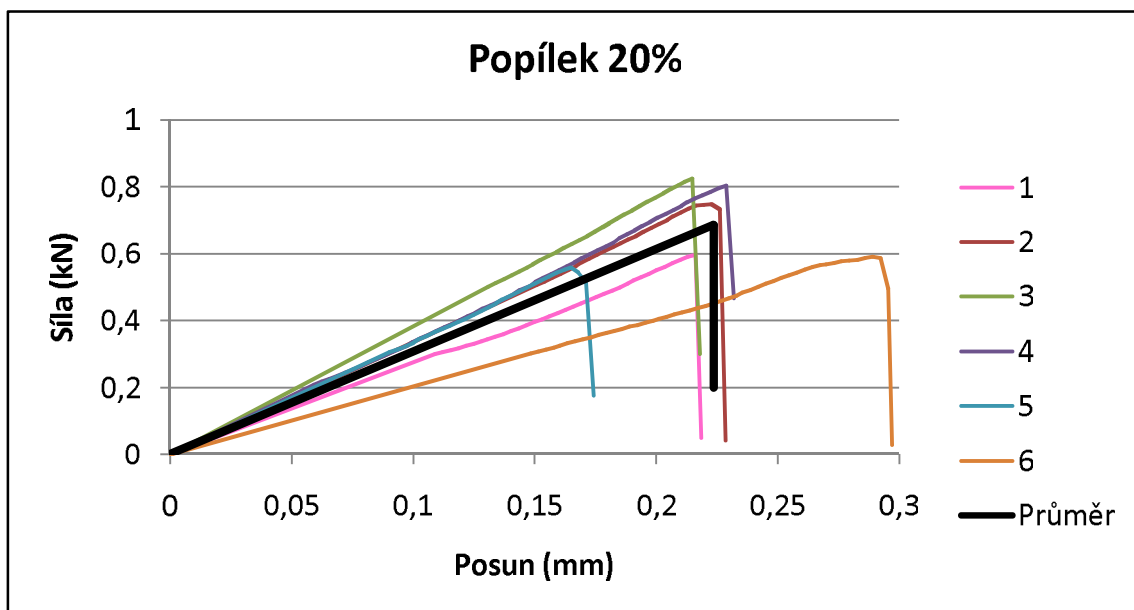
Na obr. č. 53 jsou tělesa s 10% obsahem popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,6 kN s posunem 0,22 mm.



Obr. č. 53 - Popílek 10%

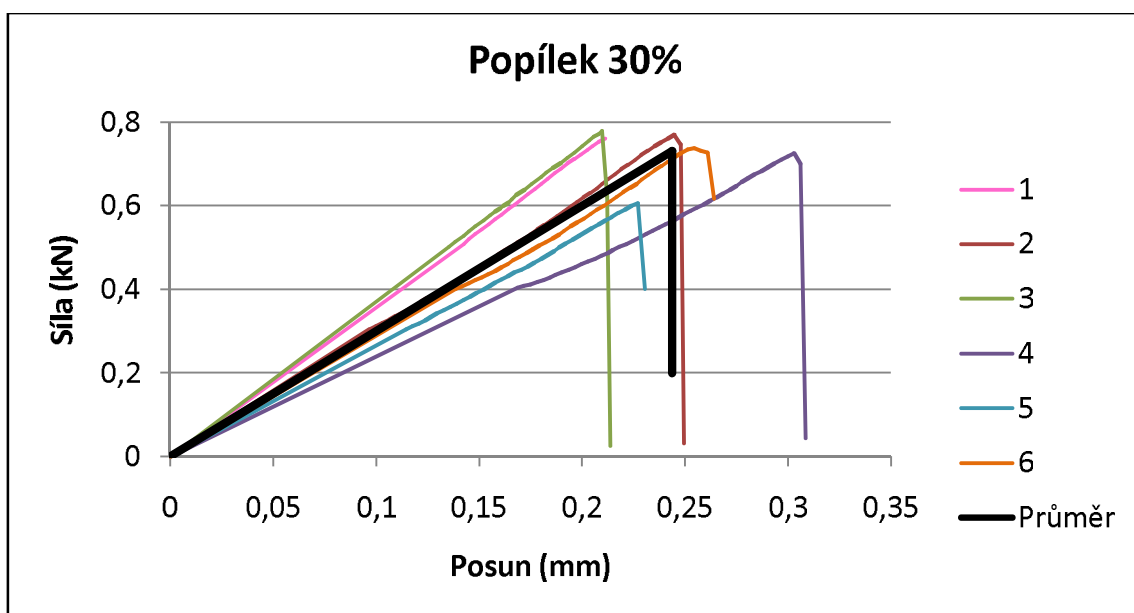


Na obr. č. 54 jsou tělesa, jež obsahovala 20% popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,68 kN s posunem 0,22 mm.



Obr. č. 54 - Popílek 20%

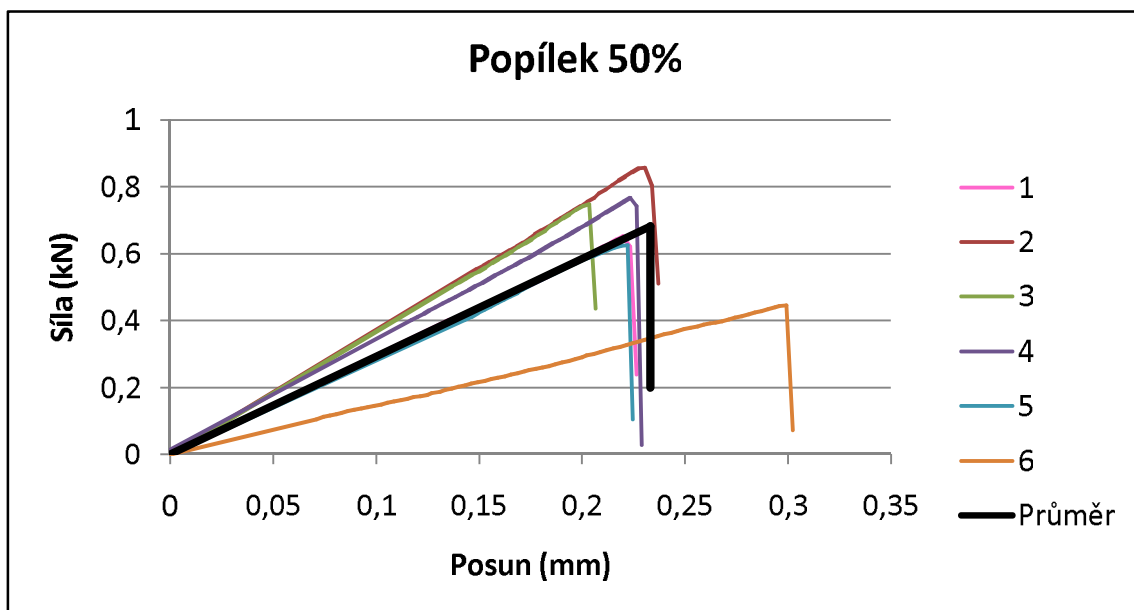
Na obr. č. 55 jsou tělesa, jež obsahovala 30% popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,73 kN s posunem 0,24 mm.



Obr. č. 55 - Popílek 30%

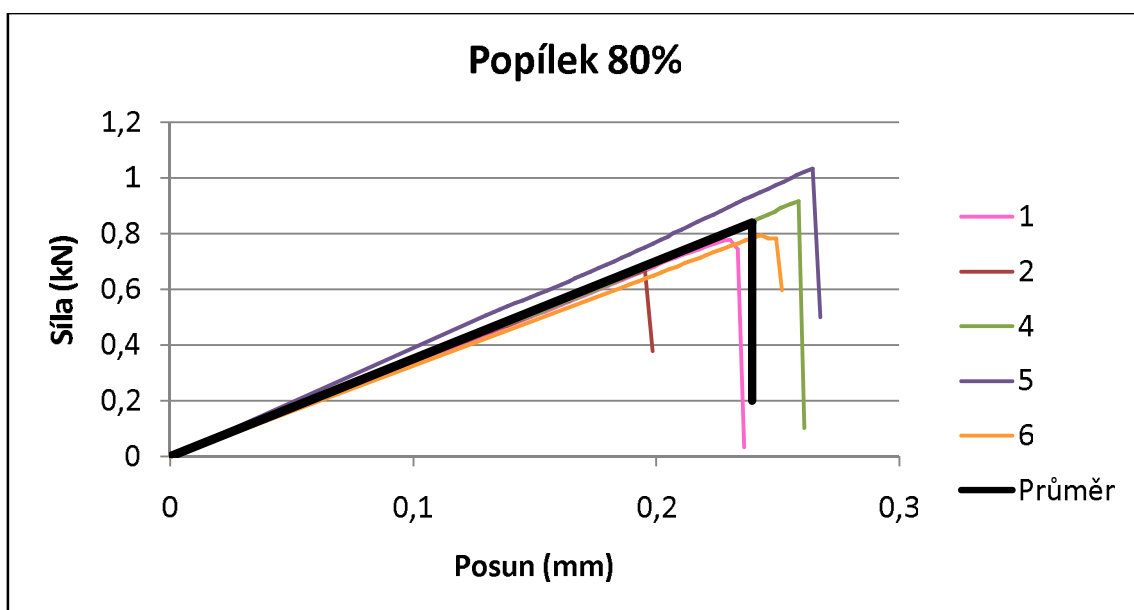


Na obr. č. 56 jsou tělesa, jež obsahovala 50% popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,68 kN s posunem 0,23 mm.



Obr. č. 56 - Popílek 50%

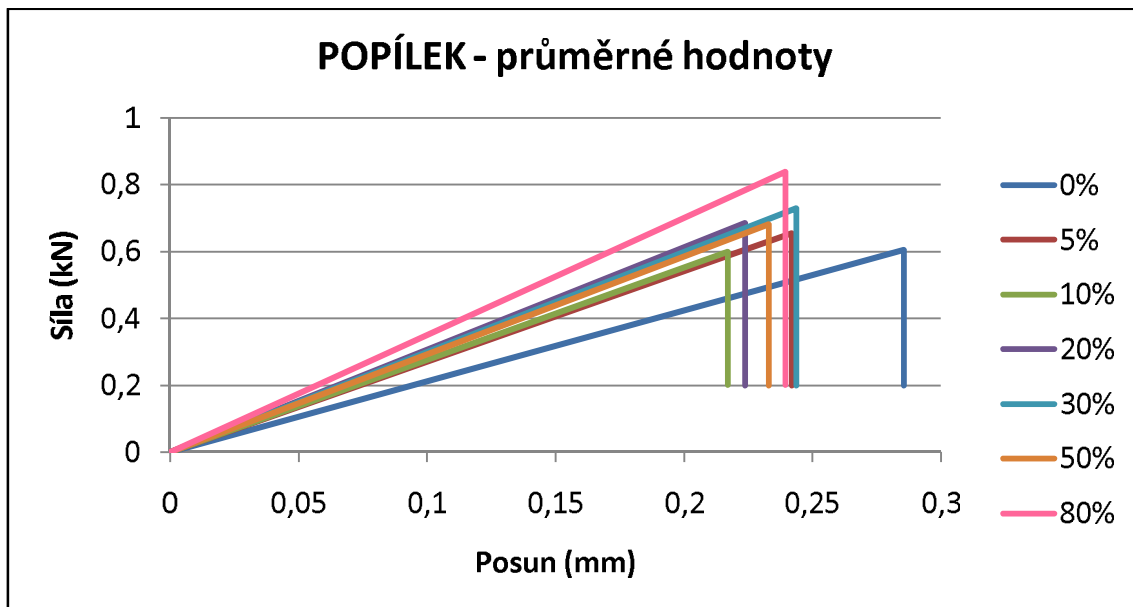
Na obr. č. 57 jsou tělesa s 80% obsahem popílku. Průměrná hodnota síly dosahovala 0,84 kN s posunem 0,24 mm.



Obr. č. 57 - Popílek 80%

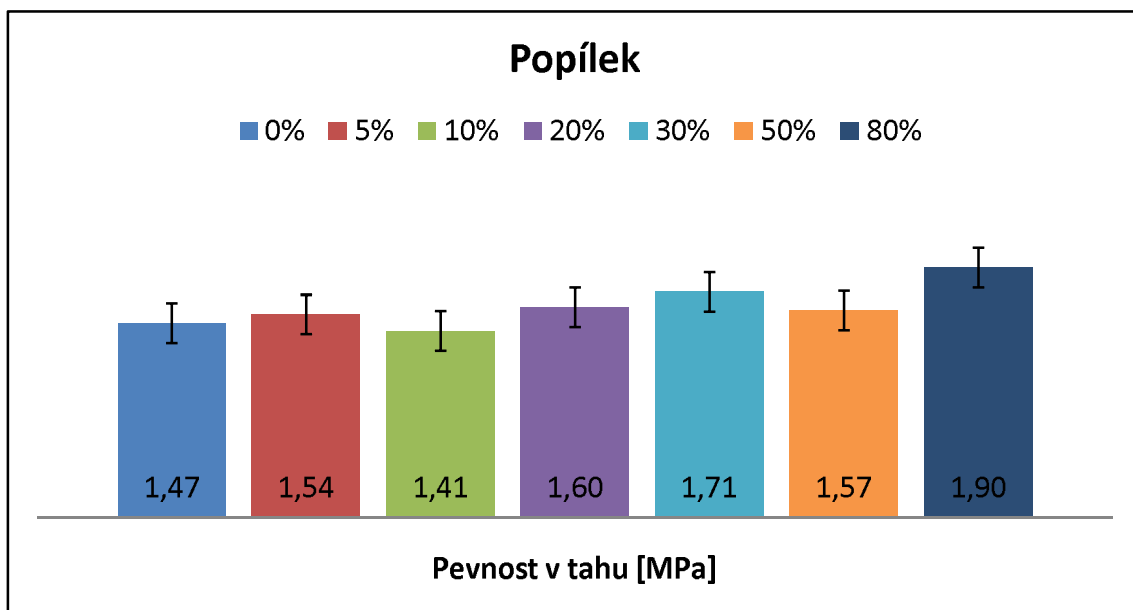


Na obr. č. 58 jsou z předešlých grafů uvedeny jen průměrné hodnoty jednotlivých náhrad. Je patrné, že nejvyšších hodnot dosahovaly tělesa s 80% náhradou a nejnižších hodnot tělesa s 10% náhradou.



Obr. č. 58 - Popílek – průměrné hodnoty

Obrázek č. 59 popisuje průměrné pevnosti v tahu za ohybu jednotlivých náhrad pomocí sloupcových grafů, v nichž je vykreslena i směrodatná odchylka. Průměrná pevnost v tahu u směsi, složené jen z cementu dosáhla druhé nejnižší hodnoty. Nejnižší hodnoty dosáhla směs s 10% náhradou. Zvyšováním množství náhrady dochází i ke zvyšování pevnosti v tahu, tudíž nejvyšší hodnoty dosáhla směs s 80% náhradou. Směrodatná odchylka u směsi s popílkem dosahuje nejmenší hodnoty.



Obr. č. 59 - Popílek – pevnost v tahu za ohybu



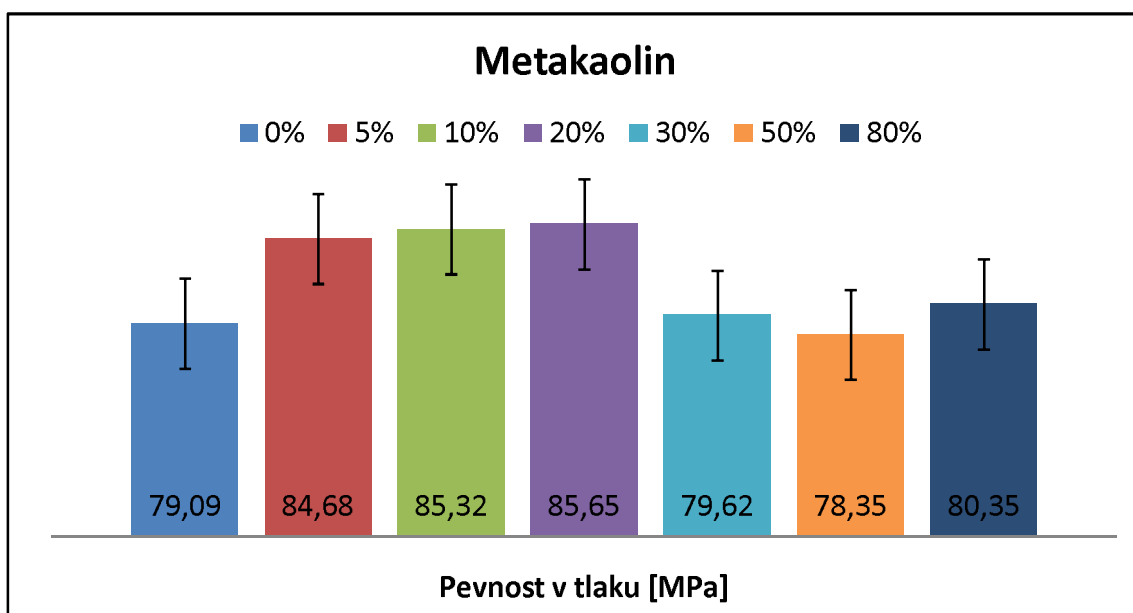
## 7.3 Pevnost v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku je popsán v kapitole č. 6.3 Pevnost v tlaku.

Výsledky této zkoušky se vyhodnotily pro každou přidanou příměs.

### Metakaolin

Na obr. č. 60 jsou sloupce, jež znázorňují pevnost v tlaku jednotlivých náhrad i se směrodatnou odchylkou. Se zvýšením náhrady až do 20% dochází ke zvyšování pevnosti, po překročení tohoto množství se pevnost snižuje. Nejvyšší pevnosti dosáhla směs s 20% náhradou a nejnižší hodnoty směs s 50% náhradou.



Obr. č. 60 - Metakaolin – pevnost v tlaku

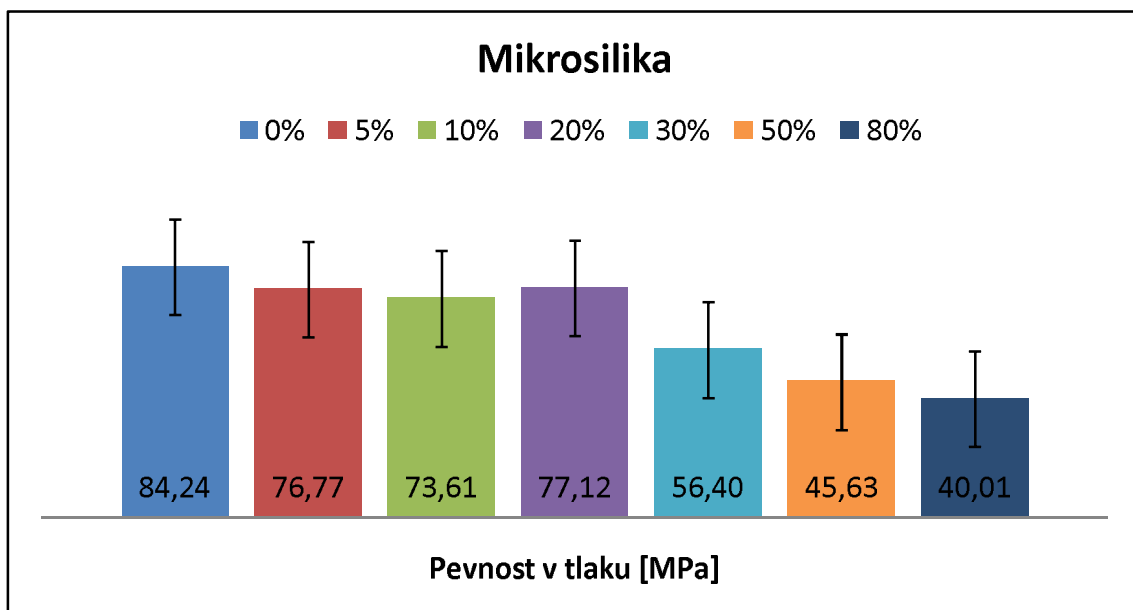
### Mikrosilika

Obrázek č. 61 je sestaven ze sloupců, jež znázorňují pevnost v tlaku jednotlivých náhrad i se směrodatnou odchylkou. Je zde patrné, že se s přidáním a zvyšováním náhrady cementu za mikrosiliku dochází ke snižování pevnosti. Nejvyšší pevnosti dosáhla směs složená jen z cementu a nejnižší hodnoty směs s 80% náhradou. U směsí obsahující více jak 20% mikrosiliky je snížení pevnosti v tlaku možné přisoudit





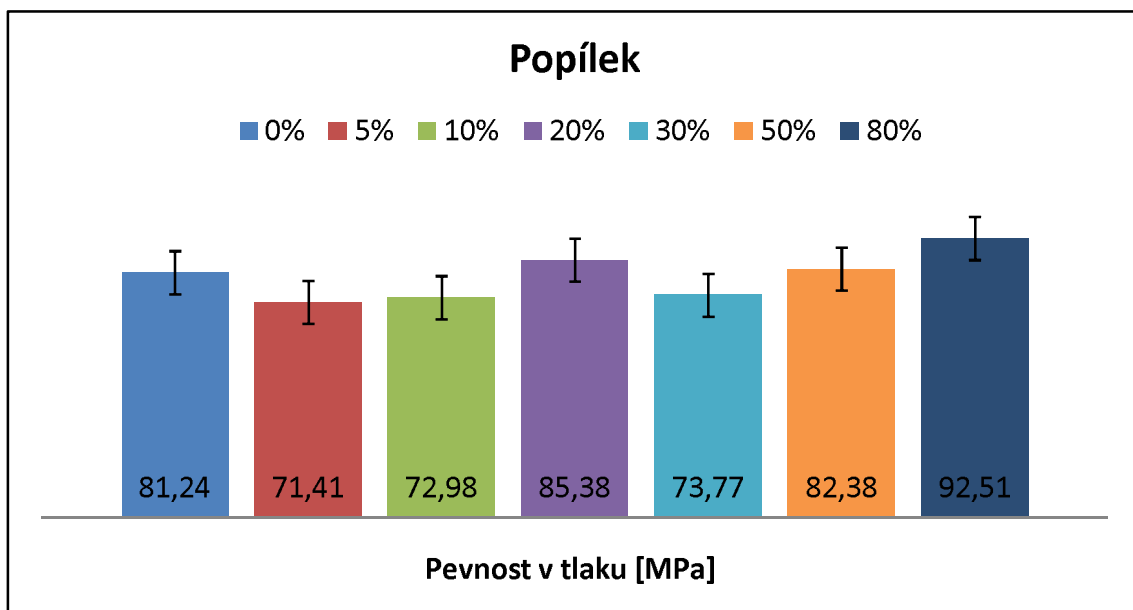
zvýšenému vodnímu součiniteli, kterým se pravděpodobně zvýšila pórovitost a došlo tak k snadnějšímu porušení těles.



Obr. č. 61 - Mikrosilika – pevnost v tlaku

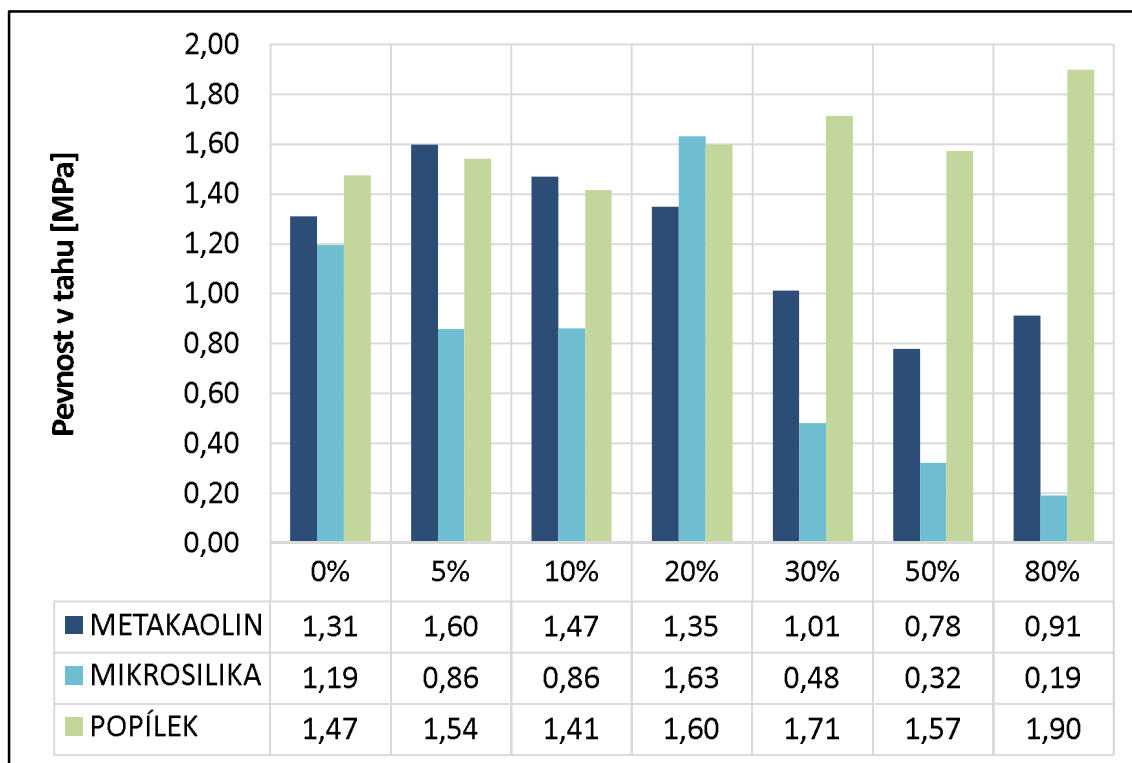
### Popílek

Na obrázku č. 62 jsou znázorněné sloupce, jež ukazují průběh pevnosti v tlaku pro jednotlivé náhrady i se směrodatnou odchylkou. Je zde patrné, že přidáním popílku došlo ke snižování pevnosti, u dalšího zvýšení množství popílku na 20% se pevnost v tlaku zvýšila. Dalším zvýšením náhrady došlo ke snížení pevnosti. U směsí, kde náhrada překročila 30%, došlo ke zvýšení pevnosti až na maximální dosaženou hodnotu, jež byla naměřena u směsí s 80% náhradou.



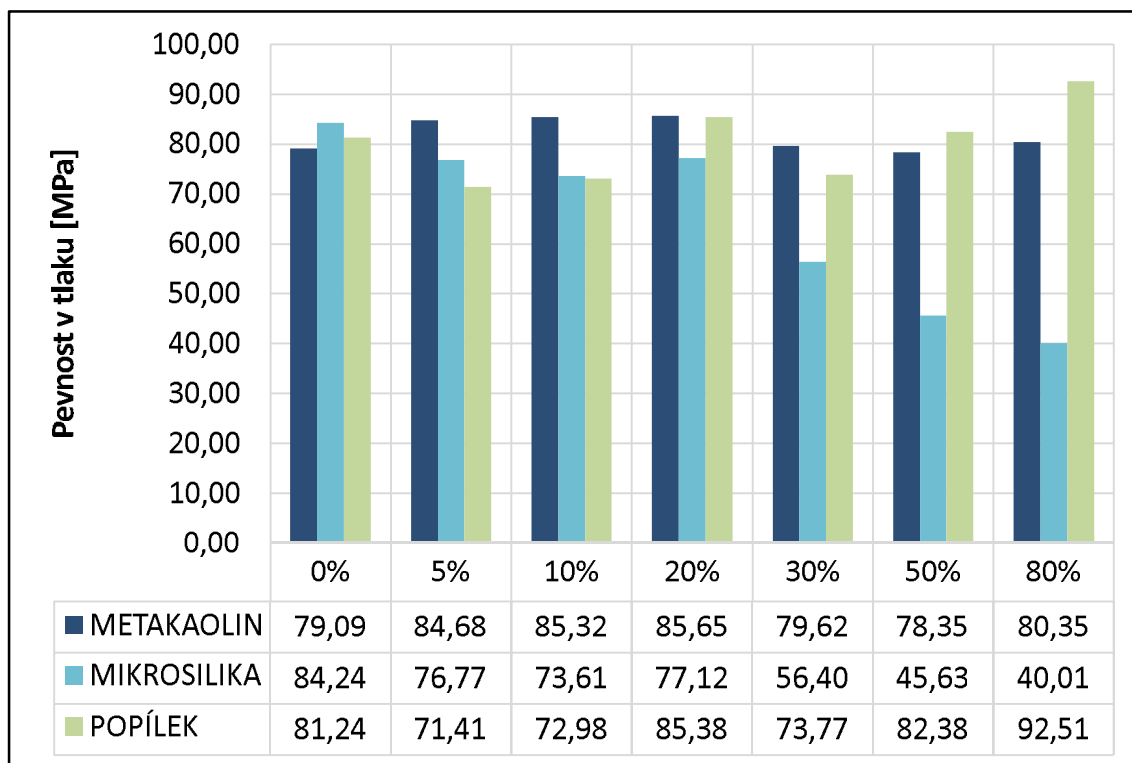
Obr. č. 62 - Popílek – pevnost v tlaku

Při porovnání průměrných pevností v tahu za ohybu jednotlivých náhrad, jež je znázorněné na obr. č. 63, je patrné, že u popílku zvyšujícím se množstvím náhrady vzrůstá i pevnost v tahu, zatímco u mikrosiliky dochází ke klesání pevnosti. U směsi obsahující 30%, 50% a 80% mikrosiliky bylo nutné zvětšit vodní součinitel, aby bylo možné se směsí pracovat. Je možné, že tímto počinem došlo ke snížení pevnosti, vlivem zvýšení pórovitosti. Směs obsahující 20% mikrosiliky dosáhla pro tuto přísadu nejvyšší pevnosti v tahu, avšak tato průměrná hodnota byla stanovena jen na čtyřech vzorcích, jelikož u dalších těles došlo k porušení a nebylo možné je použít pro zkoušku v tahu. To mohlo ovlivnit výslednou pevnost a je pravděpodobné, že pokud by se průměrná hodnota měřila z šesti těles jako ostatní směsi, pevnost by nedosahovala takového výsledku a u směsí s mikrosilikou by docházelo k pozvolnému snižování pevnosti. U metakaolinu došlo ke zvyšování pevnosti, avšak jen do 5% poté pevnost postupně klesala. Při porovnání směsí je zřejmé, že nejhorší pevnosti dosahovala receptura, jež obsahovala mikrosilikou.



Obr. č. 63 - Porovnání průměrných pevností v tahu jednotlivých příměsí

Porovnáním průměrných pevností v tlaku pro jednotlivé náhrady zobrazených na obr. č. 64 lze říci, že u metakaolinu docházelo jen k nepatrné změně pevnosti v rozmezí maximálně 5 MPa, u popílku došlo k nepatrně většímu rozptylu než u metakaolinu, avšak stále se dalo říci, že zvyšováním množství náhrady nedocházelo k razantní změně pevnosti. U směsi obsahující mikrosiliku docházelo při zvyšování množství ke snižování pevnosti, opět lze toto přisoudit zvýšenému vodnímu součiniteli, jenž zvětšil pórovitost. Směs obsahující 80% mikrosiliky měla o polovinu menší pevnost než směs, v níž mikrosilika nebyla vůbec obsažena. Při porovnání směr je zřejmé, že nejhorší pevnosti opět dosáhla receptura, jež obsahovala mikrosiliku.



Obr. č. 64 - Porovnání průměrných pevností v tlaku jednotlivých příměsí

Jako optimální množství náhrady cementu lze považovat hodnotu 20%.

Porovnáním receptur s 20% náhradou a receptur obsahující jen cement, lze říci, že u metakaolinu došlo ke zvýšení pevnosti v tahu o 3%, u mikrosiliky o 27%, ovšem tato hodnota je zkreslená tím, že se průměrná hodnota pevnosti stanovila místo na šesti tělesech pouze na čtyřech. U popílku se pevnost zvedla o 8%.

U pevnosti v tlaku došlo u metakaolinu ke zvýšení o skoro 8%, u popílku skoro o 5%, avšak u mikrosiliky došlo ke snížení pevnosti v tlaku a to o 9%.



## 8 Závěr

Cílem práce bylo zhodnocení změn mechanických vlastností při náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí se zaměřením na metakaolin, mikrosiliku a elektrárenský popílek.

Teoretická část je zaměřená cementem. A to na popis výroby a složení cementu, hydrataci cementu, vlastnosti cementu a popis druhů cementu. Dále obsahuje popis latentně hydraulických příměsí jako je metakaolin, mikrosilika, popílek a struska.

Praktická část je zaměřená na samostatný výzkum změn mechanických vlastností při náhradě cementu latentně hydraulickou příměsí. Jako příměs byl použit metakaolin Mefisto L05, mikrosilika Stachesil S a kombinace dvou elektrárenských popílků z tepelné elektrárny v Dětmovicích a jako hydraulické pojivo byl použit cement CEM I 42,5 R (Mokrá). Pro každou příměs se vyrobilo 7 rozdílných receptur s náhradou cementu v množství 0%, 5%, 10%, 20%, 30%, 50% a 80%. Z každé receptury se zhotovilo 6 zkušebních trámečků o velikosti 40x40x160 mm. Na zkušebních tělesech se stanovila změna objemové hmotnosti a pevnost v tahu za ohybu. Touto zkouškou se tělesa zlomila na dvě poloviny, na kterých se dále stanovila pevnost v tlaku.

Předpokládalo se, že použitím latentně hydraulických příměsí selepší mechanické vlastnosti. Tento předpoklad byl potvrzen jen u směsí obsahující elektrárenský popílek a metakaolin, avšak u mikrosiliky došlo jejím zvyšováním množství ke snižování pevnosti jak v tahu, tak v tlaku. Pokles pevnosti je pravděpodobně důsledkem zvýšení vodního součinitele. Koeficient  $k$ , jež je zmíněn v tabulce č. 5 je pro mikrosiliku 2,0, avšak u směsí obsahující více jak 20% této náhrady bylo nutné tento koeficient zvýšit, aby bylo možné se směsí pracovat. Pro směs s 80% obsahem mikrosiliky byl koeficient  $k$  2,5. Tímto se ve směsi mohlo vytvořit více pórů, což zapříčinilo snížení únosnosti.

Z výsledků je patrné, že neoptimálnějším množstvím pro zkoumané příměsi, které mají nahrazovat cement je 20%.



## Použité zdroje

- [1] Cement. *EBETON* [online]. Praha: Svaz výrobců Betonu, 2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz>
- [2] TANCOŠOVÁ, L.: Bakalářská práce – Analýza vlivu stáří cementu na vybrané vlastnosti, ČVUT v Praze, 2016
- [3] Cementy. *Jirásek, J., Vavro, M.: Nerostné suroviny a jejich využití. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská* [online]. Ostrava: Technická univerzita Ostrava, 2008 [cit. 2018-03-24]. Dostupné z: [http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka\\_pojiva.html](http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html)
- [4] COLLEPARDI, M.: Moderní beton, první vydání, Nová tiskárna Pelhřimov, s.r.o., 2009, ISBN 978-80-87093-75-7
- [5] PYTLÍK, P.: Technologie betonu, druhé vydání, VUT v Brně, 2000, ISBN 80-214-1647-5
- [6] SVOBODA, L. Stavební hmoty [online]. 3. vyd. Praha, 2013 [cit. 2018-04-02]. SBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodan/sh/SH3v1.pdf>
- [7] Ettringite. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): WikimediaFoundation, 2001- [cit. 2018-04-26]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ettringite>
- [8] Cement – normalizované označení. *EBETON* [online]. Praha: Svaz výrobců Betonu, 2012 [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz>
- [9] ČSN EN 197-1 Cement – Část 1: Složení, specifikace, a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [10] HEIDELBERGCEMENT Group, Příručka technologa: BETON – SUROVINY – VÝROBA – VLASTNOSTI, první vydání, 2010
- [11] AITCIN, P.-C., Vysokohodnotný beton, Praha, ČKAIT, 2005, ISBN 80-86769-9-93
- [12] časopis BETON, vydání 2/2015, str. 5-7
- [13] ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti
- [14] ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu



**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí

- [15] Matest.com: Products – E093 AUTOMATIC MORTAR MIXER [online]. [cit. 2018-05-04]. Dostupné z: <http://matest.com/en/Products/---/MOULDS-FOR-CEMENT/mortar-mixers/e093-automatic-mortar-mixer>



## Seznam obrázků

Obr. č. 1- Cement.....	8
Obr. č. 2 - Předhomogenizační zastřešená skládka.....	9
Obr. č. 3 - Rotační pec.....	10
Obr. č. 4 - Cementárny v České republice [3] .....	11
Obr. č. 5 - Postup výroby cementu [3] .....	11
Obr. č. 6 - Jehlicovité krystaly ettringitu a destičkovité krystaly portlanditu. Snímek z elektronového mikroskopu; velikost objektů v mikrometrech [7] .....	15
Obr. č. 7 - Vicatův přístroj    Obr. č. 8 – Le Chatelierova objímka.....	18
Obr. č. 9 - Normalizační označení cementu [8] .....	22
Obr. č. 10 - Mikrosilika v elektronovém mikroskopu.....	27
Obr. č. 11 - Zaplnění prostorů mezi zrny cementu křemičitým úletem [11] .....	29
Obr. č. 12- Schéma vysokoteplotního spalování uhlí.....	30
Obr. č. 13 - Mikrostruktura popílku .....	31
Obr. č. 14 - Mikrostruktura metakaolinu .....	32
Obr. č. 15 - Výroba železa ve vysoké peci .....	34
Obr. č. 16 - Struska chlazená vzduchem.....	35
Obr. č. 17 - Granulovaná vysokopecní struska .....	35
Obr. č. 18- Navážené suroviny.....	36
Obr. č. 19 – Navážená mikrosilika.....	38
Obr. č. 20 - Zkušební trámečky z mikrosiliky .....	41
Obr. č. 21 - Automatická míchačka E093 [15] .....	42
Obr. č. 22 - Typická forma [13] .....	43
Obr. č. 23 - Formy vyplněné cementovou směsí .....	43
Obr. č. 24 - Označená zkušební tělesa .....	44
Obr. č. 25 - Pyknometr s metakaolinem a vodou .....	45
Obr. č. 26 - Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu [13].....	47
Obr. č. 27 - Trámeček tvořený s 5% náhradou popílkem uložený ve zkušebním tělese pro zjištění pevnosti v tahu za ohybu.....	47
Obr. č. 28 - Zkušební stroj pro zkoušku v tlaku [13].....	48
Obr. č. 29 - Porušené těleso zkouškou v tlaku.....	49
Obr. č. 30 - Objemová hmotnost směsi s metakaolinem.....	51
Obr. č. 31 - Objemová hmotnost směsi s mikrosilikou .....	52
Obr. č. 32 - Objemová hmotnost směsi s popílkem.....	53
Obr. č. 33 - Metakaolin 0%.....	54
Obr. č. 34 - Metakaolin 5%.....	55
Obr. č. 35 - Metakaolin 10%.....	55
Obr. č. 36 - Metakaolin 20%.....	56
Obr. č. 37 - Metakaolin 30%.....	56
Obr. č. 38 - Metakaolin 50%.....	57
Obr. č. 39 - Metakaolin 80%.....	57
Obr. č. 40 - Metakaolin – průměrné hodnoty .....	58
Obr. č. 41 - Metakaolin – pevnost v tahu za ohybu .....	59





**ČVUT v Praze, Fakulta stavební, katedra betonových a zděných konstrukcí**  
Studie změny mechanických vlastností cementu při částečné náhradě  
cementu latentně hydraulickou příměsí

Obr. č. 42 - Mikrosilika 0%.....	59
Obr. č. 43 - Mikrosilika 5%.....	60
Obr. č. 44 - Mikrosilika 10%.....	60
Obr. č. 45 - Mikrosilika 20%.....	61
Obr. č. 46 - Mikrosilika 30%.....	61
Obr. č. 47 - Mikrosilika 50%.....	62
Obr. č. 48 - Mikrosilika 80%.....	62
Obr. č. 49 - Mikrosilika – průměrné hodnoty .....	63
Obr. č. 50 - Mikrosilika – pevnost v tahu za ohybu .....	64
Obr. č. 51 - Popílek 0% .....	64
Obr. č. 52 - Popílek 5% .....	65
Obr. č. 53 - Popílek 10% .....	65
Obr. č. 54 - Popílek 20% .....	66
Obr. č. 55 - Popílek 30% .....	66
Obr. č. 56 - Popílek 50% .....	67
Obr. č. 57 - Popílek 80% .....	67
Obr. č. 58 - Popílek – průměrné hodnoty.....	68
Obr. č. 59 - Popílek – pevnost v tahu za ohybu .....	69
Obr. č. 60 - Metakaolin – pevnost v tlaku .....	70
Obr. č. 61 - Mikrosilika – pevnost v tlaku .....	71
Obr. č. 62 - Popílek – pevnost v tlaku.....	72
Obr. č. 63 - Porovnání průměrných pevností v tahu jednotlivých příměsí.....	73
Obr. č. 64 - Porovnání průměrných pevností v tlaku jednotlivých příměsí.....	74



## Seznam tabulek

Tab. č. 1 - Přehled hlavních složek portlandského slínku [6].....	13
Tab. č. 2 - Vlastnosti hydratovaných slínkových minerálů [5] .....	13
Tab. č. 3 - Mechanické a fyzikální požadavky dle [9] .....	18
Tab. č. 4 - Druhy cementu pro obecné použití [9] .....	25
Tab. č. 5 - Koeficient k podle použité příměsi.....	26
Tab. č. 6 - Složení vysokopeční granulované strusky .....	33
Tab. č. 7 - Receptura obsahující metakaolin.....	37
Tab. č. 8 - Receptura obsahující mikrosiliku .....	39
Tab. č. 9 - Receptura obsahující popílek.....	40
Tab. č. 10 - Objemová hmotnost jednotlivých složek .....	50
Tab. č. 11 - Metakaolin – rozměry těles a jejich objemová hmotnost.....	51
Tab. č. 12 - Mikrosilika – rozměry těles a jejich objemová hmotnost .....	52
Tab. č. 13 - Popílek – rozměry těles a jejich objemová hmotnost .....	53