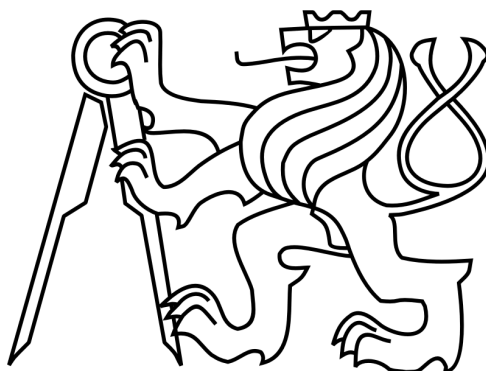


České vysoké učení technické v Praze

Fakulta stavební

Katedra betonových a zděných konstrukcí



Bakalářská práce

Vliv příměsí na rychlost nárůstu pevnosti

Influence of admixtures on of compressive strength increase rate

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

Letní semestr 2017/2018

Barbora El Aminová



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: El Aminová

Jméno: Barbora

Osobní číslo: 409855

Zadávající katedra: Katedra betonových a zděných konstrukcí

Studijní program: Stavitelství

Studijní obor: Realizace pozemních a inženýrských staveb

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Vliv příměsí na rychlost nárůstu pevnosti

Název bakalářské práce anglicky: Influence of admixtures on of compressive strength increase rate

Pokyny pro vypracování:

Zpracujte rešerši k tématu náhrad cementu, která bude obsahovat:

- Popis hydratace cementu v čase a vývoj tlakové pevnosti v čase.
- Porovnání vlastností metakaolinu, mikrosiliky a elektrárenského popílku.
- Zhodnocení vlivu výše zmíněných příměsí jako částečné náhrady cementu.

Experimentálně ověřte vliv výše zmíněných příměsí na nárůst tlakové pevnosti v čase. Ověření proved'te pro různé dávky náhrady cementu danou příměsí.

Seznam doporučené literatury:

Pytlík, P.: Technologie betonu, VUT v Brně, Brno 2000

Aitcin, P.C.: Vysokohodnotný beton, ČKAIT, Praha, 2005

Collepari, M.: Moderní beton, ČKAIT, Praha, 2006

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Josef Fládr, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 22.2.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.5.2018

Údaj uveďte v souladu s časovým plánem 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“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Abstrakt

Bakalářská práce se zaměřuje na příměsi, které se mimo jiné používají do vysokohodnotných betonů. Nejprve se zabývá složkami, návrhem receptury a výrobou prostého a vysokohodnotného betonu, následně jsou specifikovány možné faktory ovlivňující tlakovou pevnost ztvrdlého betonu. V neposlední řadě jsou představeny a posouzeny tři hlavní příměsi, použité jako částečné náhrady cementu. Posuzována je hlavně schopnost příměsí dosáhnout vyšší tlakové pevnosti. Výsledkem laboratorní činnosti je zhodnocení vlivu příměsí na průběh nárůstu pevnosti. Cílem je zjistit, která z příměsí je schopna dosáhnout maximální počáteční a konečné pevnosti. Závěrem je zhodnocení celé práce a jsou zde také vyhodnoceny výsledky zkoušek jednotlivých příměsí.

Klíčová slova

Vysokohodnotný beton, příměsi do betonu, pevnost v tlaku, faktory ovlivňující pevnost, popílek, křemičitý úlet, metakaolin.

Abstract

The bachelor thesis focuses on admixtures which, among others things, are used in high-performance concrete. Firstly, it deals with components, the proposal recipe and the production of simple and high-performance concrete, then are specified factors that influence the compressive strength of tough concrete. Last but not least, three main admixtures, which are used as partial cement substitutes, are introduced and evaluated. In particular, the ability of the admixtures to achieve higher compressive strength is assessed. The result of the laboratory activity is to evaluate the influence of the admixtures on the course of the increase in strength. The aim is to find out which of the admixtures is able to achieve maximum initial and final strength. The conclusion is the evaluation of the whole work and also the results of the tests of the individual admixtures.

Key words

High-performance concrete (HPC), concrete admixtures, compressive strength, factors affect strength, fly ash, silica fume, metakaolin.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracovala samostatně, a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem č. 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.“

V Praze dne 27. 5. 2018

.....
podpis autora

Poděkování:

Prostřednictvím tohoto odstavce bych ráda poděkovala Ing. Josefu Fládrovi, Ph.D., který se ochotně ujal vedení mé bakalářské práce. Děkuji především za jeho čas, který mi věnoval, za cenné připomínky, odborné rady a veškerou pomoc při práci v laboratoři. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Karlu Šepsovi, Ing. Romanu Chylíkovi a Ing. Tomáši Trtíkovi za pomoc při laboratorních zkouškách.

OBSAH

ÚVOD.....	8
TEORETICKÁ ČÁST.....	9
1. PROSTÝ BETON.....	9
1.1 DEFINICE A SLOŽENÍ PROSTÉHO BETONU	9
1.1.1 Plnivo	9
1.1.2 Pojivo	9
1.1.3 Voda	10
1.1.4 Přísady.....	10
1.1.5 Příměsi.....	10
1.2 NÁVRH RECEPTURY PROSTÉHO BETONU.....	11
2. VYSOKOHODNOTNÝ BETON.....	13
2.1 HISTORIE VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU	13
2.2 DEFINICE A SLOŽENÍ VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU	13
2.2.1 Pojivo	14
2.2.2 Příměsi.....	14
2.2.3 Přísady.....	15
2.2.4 Voda	15
2.2.5 Plnivo	16
2.3 VÝROBA VYSOKOHODNOTNÉHO BETONU.....	16
3. PARAMETRY OVLIVŇUJÍCÍ TLAKOVOU PEVNOST BETONU	17
3.1 NÁVRH SMĚSI A VODNÍ SOUČINITEL	17
3.1.1 Výběr typu cementu	17
3.1.2 Použití superplastifikátorů.....	18
3.1.3 Použití příměsí	18
3.1.4 Výběr vhodného kameniva.....	18
3.2 TEPLOTA PROSTŘEDÍ A HYDRATAČNÍ TEPLA	19
3.2.1 Teplota okolního prostředí	19
3.2.2 Hydratační teplo	20
3.3 PÓROVITOST A OBSAH VZDUCHU	20
3.4 DOBA HUTNĚNÍ	21
3.5 ZPŮSOB A DOBA OŠETŘOVÁNÍ.....	21
3.5.1 Důvody ošetřování	21
3.5.2 Způsoby ošetřování	22
3.5.3 Doba ošetřování	22
3.6 VLIV ZKUŠEBNÍHO ZAŘÍZENÍ A POSTUPU	23
4. CEMENT	24
4.1 DEFINICE A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	24
4.1.1 Definice cementu	24
4.1.2 Typy cementů.....	24
4.1.3 Třídy pevnosti cementů.....	25
4.1.4 Označení cementu	26
4.1.5 Vlastnosti cementu.....	26
4.2 HYDRATACE CEMENTU, POČÁTEK A DOBA TUHNUTÍ A TVRDNUTÍ	27
4.2.1 Počátek a doba tuhnutí	27
4.2.2 Tvrdnutí betonu	27

4.3	MOŽNÉ NÁHRADY CEMENTU	28
5.	KŘEMIČITÝ ÚLET (MIKROSILIKA).....	30
5.1	DEFINICE A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	30
5.2	VLASTNOSTI PŘÍMĚSI A VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONU	31
6.	ELEKTRÁRENSKÝ POPÍLEK.....	32
6.1	DEFINICE A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	32
6.2	VLASTNOSTI PŘÍMĚSI A VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONU	33
7.	METAKAOLIN.....	34
7.1	DEFINICE A ZÁKLADNÍ VLASTNOSTI	34
7.2	VLASTNOSTI PŘÍMĚSI A VLIV NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONU	35
8.	POROVNÁNÍ PŘÍMĚSÍ Z HLEDISKA VLIVU NA MECHANICKÉ VLASTNOSTI BETONU	36
	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	37
9.	PŘEDSTAVENÍ EXPERIMENTU	37
10.	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	38
10.1	SLOŽENÍ A NÁVRH SMĚSI	38
10.2	ZKUŠEBNÍ VZORKY A JEJICH POČET	40
10.3	POSTUP VÝROBY, UKLÁDÁNÍ A OŠETŘOVÁNÍ	41
11.	ZKOUŠENÍ PEVNOSTI	43
11.1	PEVNOST V TAHU ZA OHYBU.....	43
11.2	PEVNOST V PROSTÉM TLAKU	44
12.	VÝSLEDKY MĚŘENÍ.....	46
12.1	VÝSLEDKY REFERENČNÍHO VZORKU	46
12.2	VÝSLEDKY 1. SÉRIE - 10% NÁHRADA CEMENTU.....	49
12.3	VÝSLEDKY 2. SÉRIE - 30% NÁHRADA CEMENTU.....	53
12.4	POROVNÁNÍ TLAKOVÝCH PEVNOSTÍ 1. A 2. SÉRIE	57
13.	ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	58
13.1	PEVNOST V TAHU ZA OHYBU.....	58
13.2	PEVNOST V PROSTÉM TLAKU	58
13.3	POČÁTEČNÍ TLAKOVÁ PEVNOST.....	59
13.4	KONEČNÁ (28DENNÍ) TLAKOVÁ PEVNOST	59
	ZÁVĚR	60
	CITOVANÁ LITERATURA	61
	SEZNAM OBRÁZKŮ	63
	SEZNAM TABULEK.....	64

ÚVOD

Bakalářská práce se zaměřuje na jemné práškovité látky neboli příměsi, používané do vysokohodnotných betonů. Tyto příměsi mohou výrazně zlepšovat vlastnosti ztvrdlého betonu, jako je vyšší pevnost, delší trvanlivost a odolnost proti agresivitě prostředí. Další podstatnou výhodou příměsí je, že pro své chemické složení mohou, v optimálních dávkách, částečně nahrazovat cement.

Teoretická část této práce se nejprve zabývá složením prostých a vysokohodnotných betonů. Především jsou zde popsány jednotlivé složky čerstvých betonů a postup návrhu. Další velkou kapitolou jsou faktory ovlivňující tlakovou pevnost betonu. Na vývinu tlakové pevnosti se totiž podílí řada činitelů, které musí být při celém procesu výroby zohledněny. Jelikož je celá práce zaměřena na pojící hydraulické látky, jsou dále popsány vlastnosti cementů a jejich možné náhrady. Závěr teoretické části se zabývá třemi vybranými příměsmi a porovnáním jejich vlastností. Tyto vybrané látky splňují požadavky vysokohodnotných betonů a slouží i jako vhodné částečné náhrady cementu. Jedná se o křemičitý úlet neboli mikrosiliku, elektrárenský létavý popílek a metakaolin.

Cílem experimentální části je ověřit, zda výše zmíněné příměsi opravdu zlepšují mechanické vlastnosti betonu a jakým způsobem se podílejí na vývinu tlakové pevnosti. Experiment spočívá ve výrobě zkušebních vzorků a ve zjišťování nárůstu pevností v časových intervalech. Laboratorní vzorky jsou vyráběny ve dvou sériích, přičemž každá z nich disponuje jiným procentem té dané příměsi, jakožto náhrady cementu. Vyhodnocením zkoušek je pak zjištění, která příměs nejvíce ovlivňuje počáteční, též nazývanou 24 hodinovou, pevnost, a která je schopna dosáhnout nejvyšší pevnosti po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí.

TEORETICKÁ ČÁST

1. Prostý beton

1.1 Definice a složení prostého betonu

V současném pojetí se z technologického hlediska beton definuje jako kompozitní stavební látka složená z kameniva, cementu a vody. Nicméně to není vše, z čeho se skládá. Prostý beton vzniká smícháním pěti základních složek, kde každá má svou nezastupitelnou funkci. (1)

1.1.1 Plnivo

Funkci plniva zastává směs drobného a hrubého kameniva. Kamenivo zaujímá značnou část objemu celé betonové směsi, více jak 70 %, a jeho hlavní funkcí je vytvoření pevné kostry. Vzhledem k velké mezerovitosti hrubého kameniva je použito i drobné kamenivo o velikosti zrn do 4 mm, které vyplňuje mezery a snižuje tak pórovitost celé směsi. Ne všechna zrna kameniva jsou však vhodná pro použití do betonové směsi, a proto jsou evropskou normou ustanoveny základní požadavky.

Důležitým aspektem pro výběr vhodného kameniva je druh horniny, ze které je kamenivo vyrobeno. U horniny se zkoumá její tvrdost, pevnost v tlaku a také nasákavost. Dalšími požadavky jsou například granulometrická zkouška, mezerovitost, objemová hmotnost a tvarový index. (1), (2)

1.1.2 Pojivo

Pojivem bývá nejčastěji cement, což je jemně mletá anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi, která v důsledku chemických reakcí po smíchání s vodou tuhne a tvrdne. Díky své konzistenci na sebe dokáže vázat zrna kameniva a vytváří tak kompaktní stavební hmotu.

Také cement podléhá evropským normám (ČSN EN 197-1), ve kterých je definováno pět druhů základních cementů a další speciální cementy. Nejčastěji používaným pojivem je portlandský cement, jehož hlavní složkou je mletý portlandský slínek. Cement vykazuje řadu chemických a fyzikálních vlastností, které výrazně ovlivňují jak čerstvou betonovou směs, tak ztvrdlý beton, a je proto důležitou složkou celé směsi. (1), (3), (4)

1.1.3 Voda

Další důležitou složkou betonu je voda. Pro výrobu betonu se používá takzvaná voda záměsová, která obsahuje dostatečné množství minerálů. Stejně jako kamenivo a cement, i voda podléhá jistým požadavkům, které jsou definovány evropskou normou (ČSN EN 1008). Norma především definuje, které vody jsou vhodné a použitelné, ale také vody nepoužitelné. Nevhodné vody mohou způsobit znehodnocení betonové směsi, korozi použité výztuže a celkovou degradaci konstrukce. (1), (5)

1.1.4 Přísady

Za účelem modifikace vlastností betonu se dále do směsí přidávají chemické sloučeniny neboli přísady, ovlivňující proces výroby a zpracování betonové směsi. Chemické přísady jsou v současnosti hojně využívány. Základními typy přísad jsou přísady plastifikační, stabilizační, provzdušňující, ale také přísady urychlující a zpomalující tuhnutí a tvrdnutí cementu. Přísady reagují s cementovou směsí a jejich konečné vlastnosti jsou závislé na jejím druhu, především pak na jejím chemickém složení. (1)

1.1.5 Příměsi

Poslední, a pro tuto závěrečnou práci důležitou složkou betonové směsi, jsou příměsi. Příměsi jsou sypké, povětšinou latentní a pucolánové, látky přidávané do čerstvé betonové směsi pro zlepšení určitých vlastností ztvrdlého betonu. Příměsi se do betonové směsi přidávají pouze v určitém množství, aby se zabránilo nepříznivému ovlivnění vlastností betonu, jako je například snížení trvanlivosti nebo koroze ocelové výztuže. Mezi nejznámější příměsi patří přírodní a umělé pucolány, popílký, křemičité úlety, barevné pigmenty a další hydraulika. (1)

1.2 Návrh receptury prostého betonu

Složení čerstvé betonové směsi je závislé na řadě faktorů, které je nutné znát ještě před samotným návrhem jednotlivých podílů složek betonu. Jednotlivé složky a jejich poměry v betonové směsi rozhodují o budoucích vlastnostech betonu.

Pro návrh složení betonové směsi je v první fázi potřeba definovat následující podmínky:

- **Stupeň agresivity prostředí**

Zde se uvažuje možné negativní chemické působení na betonovou konstrukci. Podle budoucího umístění konstrukce je definováno šest základních tříd prostředí (X0, XC, XD, XS, XF a XA).

Každá třída je specifická druhem možného poškození konstrukce od prostředí bez rizika poškození, přes korozi způsobenou karbonatací nebo chloridy, až po poškození vlivem chemických sloučenin. Pro každou třídu jsou dále definovány požadavky na vodní součinitel, množství cementu, minimální třídu pevnosti betonu a procentní objem vzduchu. (1)

- **Třída pevnosti betonu**

Pevnost betonu vychází ze statického výpočtu zatížení konstrukce. Pevnostní třídy jsou definovány poměrem válcové a krychlené pevnosti betonu v tlaku. Česká norma uvádí 4 doporučené třídy pevnosti betonu (C 12/15, C 20/25, C 30/37, C 40/50) a 5 doplňkových tříd (C 16/20, C 25/30, C 35/45, C 45/55, C 50/60). Evropská norma pevnosti rozšiřuje o dalších 7 pevnostních tříd, především třídy vysokopevnostní (C 8/10, C 55/37 - C 100/115). Také uvádí 14 pevnostních tříd pro lehké betony (LC 8/9 - LC 80/88). (1), (2)

- **Technologické požadavky**

Požadavky definují způsoby zpracování, dopravy, ukládání čerstvého betonu a hutnění. S tím souvisí například určení minimální doby pro zpracování čerstvého betonu a počátku tuhnutí a tvrdnutí. Vzhledem k technologii je dále definován podíl chemických přísad. (1)

- **Zvláštní požadavky**

Tyto požadavky jsou specifické pouze pro určité druhy betonů, jako jsou lehké, recyklované, silniční nebo také vláknobetony. Definují například objemovou hmotnost nebo organizační podmínky výroby betonu (transportbeton). (1)

Ve druhé fázi výroby čerstvého betonu jsou specifikovány požadavky na kamenivo – kvalita, frakce, mezerovitost, na cement – kvalita, chemické složení, množství, na přísady – plastifikační, urychlující a zpomalující tuhnutí a tvrdnutí a jiné, a příměsi, především jako částečné náhrady cementu (latentní hydraulika, pucolány, popílky, strusky a další). (1)

Z výše uvedených informací vyplývá, že celý výpočet složení betonové směsi podléhá řadě požadavků. Díky mnoha zkouškám a experimentům se ustálilo jakési procentní a hmotnostní složení prostého betonu, které uvádí procentní nebo hmotnostní podíly jednotlivých složek. Z procentního hlediska je uváděno, že složení betonu se skládá ze 75 % kameniva, 13,4 % cementu, 7,6 % vody, 3,9 % příměsí a 0,1 % přísad. (1)

Hmotnostní složení je definováno především výslednou objemovou hmotností. Prostý beton má objemovou hmotnost v rozmezí 2000–2600 kg/m³, z čehož vyplývá, že na 1 m³ čerstvého betonu je potřeba přibližně 1500–1950 kg kameniva, 270–350 kg cementu, 150–200 kg vody, 80–100 kg příměsí a nepatrné množství přísad.

Nicméně každá betonová směs je pro své složení jedinečná a je zde určitá flexibilita, co se týče poměrů jednotlivých složek.

2. Vysokohodnotný beton

2.1 Historie vysokohodnotného betonu

Když vezmeme v potaz historii betonu jako takového, není pojem "vysokohodnotný beton" až tak starý. Začátek výroby vysokohodnotného betonu je datován teprve z druhé poloviny 60.let 20. století, kdy byl beton označován jako vysokopevnostní. Tehdy byla jeho speciální vlastností pouze vyšší tlaková pevnost.

Na základě dosavadních konvenčních znalostí byl beton chápán pouze jako materiál vhodný na zakládání staveb, stavbu podlah nebo jako ochrana oceli před účinky požáru. Pro některé jedince nebylo toto použití dostačující a díky spolupráci s výrobcí betonu bylo možné využít beton i pro významnější objekty. Celý vývoj vysokopevnostního betonu však komplikoval fakt, že například tehdy dostupné cementy měly hrubší zrna a používané plastifikátory při vysokých dávkách způsobovaly oddálení doby tuhnutí betonu. Z dnešního pohledu byly tyto složky naprosto nevhodné pro vysokohodnotné betony.

Tehdejší vysokopevnostní betony dosahovaly pevnosti v tlaku o 10–15 MPa více než běžně používané betony. V průběhu přibližně 10 let se podařilo vyvinout betony s pevností v tlaku mezi 45 až 60 MPa, což bylo do té doby naprosto nemyšlitelné.

Na počátku 70.let dvacátého století se ovšem vývoj zastavil. Pro dosahování vyšších pevností bylo potřeba ještě více snížit vodní součinitel, což tehdejší plastifikátory nedokázaly a také se ukázalo, že na snížení vodního součinitele je závislý i výběr cementu. Tehdy přišly na řadu superplastifikátory. Zpočátku se používaly pouze na staveništi, kde pomáhaly snadnějšímu ukládání betonové směsi, protože působily jako ztekucovače. V průběhu 80.let se zjistilo, že je možné superplastifikátory dávkovat v různém množství, a to vedlo k možnosti snížit vodní součinitel až na 0,30 při zachování konzistence.

Dalším významným milníkem vývoje vysokohodnotného betonu byl výzkum H. H. Bacheho, který se zmiňuje o snížení vodního součinitele až na 0,16 při použití vysokých dávek superplastifikátorů a velmi jemné příměsi (křemičitý úlet). Jeho výzkum uváděl dosažení pevnosti v tlaku až 280 MPa, i když jen v laboratorních podmínkách. Výzkum Bacheho a dalších vedl k tomu, že počátkem 80.let dvacátého století se celosvětově zavedl křemičitý úlet jako příměs do betonu.

Koncem 80.let se do dalšího výzkumu pustila řada vědců, a tak se křemičitý úlet nestal jedinou možnou příměsí vhodnou do vysokohodnotného betonu. (6)

2.2 Definice a složení vysokohodnotného betonu

Vysokohodnotný beton nemá jednotnou, obecně uznávanou, definici, ale je možné jej formulovat jako beton obohacený přísadami a příměsmi, díky kterým dosahuje lepších vlastností, především pak vyšších pevností v tlaku.

Profesor P.C. Aïtcin je nicméně přesvědčen, že vysoká pevnost v tlaku není hlavní pozitivní vlastností:

„Ačkoliv je až doposud vysokohodnotný beton používán zejména pro svoji vysokou tlakovou pevnost, je jisté, že v blízké budoucnosti bude specifikován a používán zejména pro svoji trvanlivost.“

[Pierre-Claude Aïtcin, Vysokohodnotný beton, str.15] (6)

Složení vysokohodnotného betonu je z velké části totožné se složením prostého betonu. Je zde však kladen větší důraz na kvalitu jednotlivých složek, na výběr vhodných příměsí, a k nim potřebných superplastifikátorů. (6)

2.2.1 Pojivo

První složkou, kterou je u vysokohodnotného betonu nutno určit, je cement. Na ten se potom vážou další důležité složky.

Praxe ukázala, že portlandský cement je, i přes určité nedostatky, nejlepší variantou. Zásahu na tom má jeho chemické složení, především pak vysoký obsah portlandského slínku. Pokud hovoříme o vysokohodnotném betonu je pevnost samotné cementové pasty velmi důležitá. Právě ona je hlavním nositelem pevnosti ve ztvrdlém betonu. I proto by třída pevnosti cementu neměla být nižší než 42,5 (v některých případech 52,5). Podrobněji bude cement popsán v kapitole 4. (6)

Nicméně u vysokohodnotných betonů není pojivem pouze cement. Jistou část zaujmají příměsí, které v tomto případě působí také jako pojivo.

2.2.2 Příměsí

Jak je zmíněno o pár řádků výše, mají příměsí u vysokohodnotného betonu trochu jinou funkci než u betonu prostého. Do betonu jsou přidávány hlavně jako částečná náhrada cementu. Podle typu příměsí je cement možné nahradit z 10–30 %. Toto procentní rozmezí se opírá o řadu zkoušek, kdy při větším hmotnostním zastoupení příměsí docházelo ke ztrátě kvality betonu a zhoršení výsledných vlastností. Mimo snížení obsahu cementu nám příměsí poskytují zvýšení pevnosti v tlaku. K tomu přispívá hlavně jemnost částic. Více v kapitole 4.3.

Minerální příměsí se podle technické normy (ČSN EN 206-1+A1) dělí na inertní (neaktivní) a pucolánové nebo latentně hydraulické (aktivní). (2), (6)

▪ Typ I – inertní příměsí:

Inertní neboli neaktivní látky jsou do betonu přidávány za účelem docílení kompaktnější hmoty. Ve formě filleru zvětšují objem cementové pasty, ale na rozdíl od aktivních příměsí se nepodílejí na chemických reakcích. Také je zde potřeba většího vodního součinitele kvůli zachování zpracovatelnosti. Nejčastěji se jedná o kamennou moučku nebo barevné pigmenty. (1), (7)

- **Typ II – aktivní příměsi:**

Tyto příměsi se k betonové směsi přidávají proto, že přispívají k nárůstu pevnosti cementové pasty. Je možné je dále dělit na příměsi pucolánové a příměsi latentně hydraulické. Pucolánové příměsi jsou typické tím, že nejsou schopny sami tuhnout a tvrdnout. Obsahují velké množství oxidu křemičitého (SiO_2) a k chemické reakci je zapotřebí hydroxid vápenatý (Ca(OH)_2) neboli přírodní portlandit, který je obsažen v cementu. Mezi pucolánové příměsi patří přírodní tufy, tufity nebo trasy a umělé vysokopecní popílky nebo křemičité úlety.

Latentně hydraulické příměsi mají podobné vlastnosti jako pucolány. K reakci dochází také za přítomnosti Ca(OH)_2 , při normální teplotě a ve vodním prostředí. Rozdíl je pouze v obsahu jednotlivých minerálů. Mezi tyto příměsi patří především vysokopecní strusky. (1), (7)

S příměsmi dále úzce souvisí přísady. Aby bylo možné použít relativně velké množství příměsí, je nezbytné zvolit k nim vhodné superplastifikační látky.

2.2.3 Přísady

Ve složení prostého betonu se zmiňují o přísadách chemicky modifikujících beton. Stejně, popřípadě podobné látky (plastifikátory), se používají i pro beton vysokohodnotný. Mimo to se používají ještě přísady silně snižující obsah vody neboli superplastifikátory. Tyto polymerní látky umožňují snížit vodní součinitel a zachovat zpracovatelnost. Jejich použití se považuje za ohromný pokrok v oblasti technologie betonu, protože bez těchto přísad by nebylo možné vyrábět vysokohodnotný beton, jak jej známe dnes. (6), (8)

2.2.4 Voda

I záměsová voda zůstává stejná jako pro prostý beton. Její minerální složení taktéž podléhá příslušné technické normě (ČSN EN 1008) a jedinou odlišností je množství použité vody. Aby bylo možné vyrobit beton, který bude považován za vysokohodnotný, je nezbytné držet vodní součinitel mezi 0,25 - 0,35. (5), (6)

Jen pro zajímavost, letos na jaře byl v odborném článku představen výzkum, který možná zapříčiní významný pokrok v oblasti vody do betonu. Vědci z britské University of Exeter se zabývají výzkumem, při kterém se pokoušejí prokázat možnost zvýšení pevnosti betonu za pomoci tzv. grafenové vody. Jejich výzkum se opírá o fakt, že přidáním grafenové vody do betonové směsi dosáhli několikanásobného zvýšení tlakové pevnosti ztvrdlého betonu. Grafen, jako jistá forma uhlíku, je jednou z nejpevnějších surovin na naší zemi.

I přes pozitivní výsledky, kterých vědci z britské univerzity dosáhli, je jasné, že bude zapotřebí celá řada dalších zkoušek, než se grafenová voda stane běžně používanou složkou betonu. (9)

2.2.5 Plnivo

Plnivem zůstává hrubé a drobné kamenivo. Vzhledem k dosahování vyšších pevností v tlaku oproti prostému betonu, je zde důležitý pečlivý výběr kvalitního kameniva s ohledem na jeho vlastnosti. Drobné kamenivo je, stejně jako pro prostý beton, vhodné při velikosti zrna do 4 mm. Pro hrubé kamenivo je z hlediska výroby nejvhodnější velikost zrna mezi 10-12 mm (odpovídá frakci 8/16). Zkušenosti s přírodními zrny kameniva o velikostí nad 25 mm ukázaly problémy při výrobě vysokohodnotného betonu, proto se nedoporučují. Z důvodu dosahování vyšších tlakových pevností je také potřeba vybrat kamenivo dostatečně hutné a pevné, například vápenec, žulu, gabro nebo diabas. (6), (8)

2.3 Výroba vysokohodnotného betonu

Výroba vysokohodnotného betonu začíná pečlivým výběrem jednotlivých složek směsi. Jak bylo již zmíněno, je zde kladen velký důraz na kvalitu. Před započítím samotné výroby směsi je vždy nutné zkontrolovat potřebné vlastnosti dodávaných výrobků, které jsou pro směs použity. Výslednou pevnost totiž může ovlivnit i sebemenší nedostatek. Jedním z příkladů může být zbytkové množství vody v autodomíchávači. Vodní součinitel betonu je držen na velmi nízké hodnotě a pokud v domíchávači zůstane po výplachu voda, dojde zvýšením obsahu vody ve směsi ke snížení pevnosti. Také vlastnosti cementu by se měly před použitím řádně zkontrolovat. I přes hodnoty, které výrobce cementu deklaruje v technických listech, je dobré požadované parametry ověřit vlastními zkouškami.

Po důkladné kontrole jak jednotlivých složek, tak výrobních strojů, je možné přejít k míchání a výrobě směsi. Na rozdíl od běžného betonu je doba míchání obvykle delší, závislá na konkrétním případě a není přesně stanovena.

Vysokohodnotný beton je také velmi citlivý na nepřesné dávkování, především vody a superplastifikátorů. Například superplastifikátory mohou být do směsi přimíchány třemi různými způsoby. Prvním je, že se celá dávka superplastifikátoru přidá do směsi najednou. Druhý způsob spočívá v rozděleném dávkování. Přibližně 2/3 jsou do směsi přidány na začátku míchání a zbylá 1/3 na úplném konci. Posledním způsobem dávkování je přidání části superplastifikátoru během výroby a zbytek se do směsi přidává až na stavbě, před samotným ukládáním. Který z těchto způsobů je nejlepší, a nejvíce přispívá k dobré zpracovatelnosti a vysoké pevnosti, není jasně rozhodnuto. Každý ze způsobů má své klady a zápory a je jen na výrobcu, který postup zvolí. (1), (6)

3. Parametry ovlivňující tlakovou pevnost betonu

Beton, tím spíše vysokohodnotný, je materiál, který vykazuje vysoké tlakové pevnosti. Není to ale vlastnost, která by byla automaticky zajištěna. Vzhledem k tomu, že na tlakovou pevnost má vliv řada faktorů, je nutné vyvarovat se možných pochybení během návrhu směsi, výroby, ošetřování a řadě dalších.

3.1 Návrh směsi a vodní součinitel

Prvotním parametrem, který ovlivňuje pevnost v tlaku, je návrh směsi, se kterým úzce souvisí i vodní součinitel (w/c). Dřívější výzkumy prokázaly, že nejvyšších pevností dosahují betony s velmi nízkým vodním součinitelem, a proto se celý návrh směsi odvíjí právě od množství použité vody.

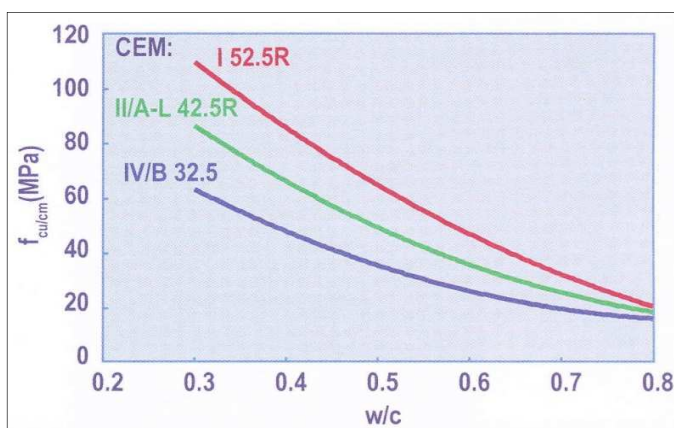
Pro vysokohodnotné betony se používají jemněji mleté cementy (například CEM I 42,5 N/R), u kterých je optimální vodní součinitel kolem 0,4 - 0,5. Tento vodní součinitel ovšem neodpovídá vodnímu součiniteli pro vysokohodnotné betony, který se pohybuje mezi 0,25 - 0,35.

Pro dosažení požadované tlakové pevnosti je nutné optimálně zkombinovat následující varianty, které umožňují snížení vodního součinitele na požadovanou hodnotu. (8)

3.1.1 Výběr typu cementu

Různé typy cementů vykazují různé pevnosti v tlaku v závislosti na vodním součiniteli. Všechny typy sice vykazují rostoucí pevnost při snižování vodního součinitele, ale pro vysokohodnotné betony jsou nejvhodnější portlandské cementy s třídami pevností 42,5 a 52,5 (hodnoty odpovídají minimální tlakové pevnosti v MPa po 28 dnech). Pokud chceme snížit vodní součinitel, jsou tyto vysokopevnostní cementy nejlepší volbou. (6), (8)

Obr. 1: Vliv třídy pevnosti cementu na pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli (w/c) (8)



3.1.2 Použití superplastifikátorů

Při dostatečné dávce chemických přísad neboli superplastifikátorů, je možné zachovat množství cementu a zároveň snížit množství záměsové vody. Snížením vodního součinitele tak dosáhneme vyšší tlakové pevnosti a s použitím superplastifikátorů nedojde ke zhoršení zpracovatelnosti směsi. Kombinace cementu, příměsí a chemických přísad se stala nejvyužívanější variantou, jak snížit vodní součinitel. (6), (8)

Profesor Mario Collepardi ve své publikaci Moderní beton uvádí příklad, ve kterém ukázal výhodnost přísady:

„Při použití 1 % superplastifikátoru bylo možné snížit množství záměsové vody o 20 % tak, aby bylo rozlité zachováno na 120 mm (pozn. odpovídá třídě konzistence S3). Obsah cementu nebyl pozměněn, pro dorovnání objemu byl však zvýšen obsah kameniva.“

[Mario Collepardi, Moderní beton, str.188] (8)

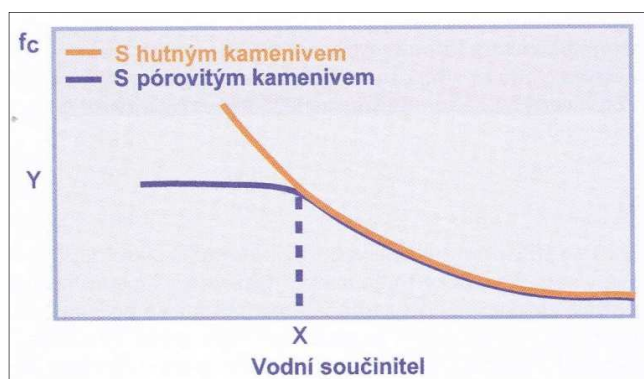
3.1.3 Použití příměsí

Použitím vhodných příměsí, jedné nebo kombinací dvou různých, je možné snížit množství cementu a tím i vodní součinitel. V současnosti používané příměsí vykazují podobné vlastnosti jako samotný cement, proto je možné ho částečně nahradit. Některé latentně hydraulické nebo pucolánové příměsí dokonce sami o sobě přispívají k vyšší pevnosti v tlaku (více v kapitole 4.3). (7), (8)

3.1.4 Výběr vhodného kameniva

Kamenivo má největší vliv na zpracovatelnost čerstvé směsi a snížením množství vody se zpracovatelnost zhoršuje. Při použití superplastifikátorů ale tento problém odpadá. Nicméně výběr vhodného kameniva má na tlakovou pevnost také vliv. Cementová pasta, vzniklá smícháním cementu, příměsí, superplastifikátorů a vody, může dosáhnout větší pevnosti než samotné kamenivo. Z tohoto důvodu je vhodné použít kamenivo pevné a hutné. Kamenivo pórovité se při zatěžování poruší dříve než okolní cementová pasta a celý prvek tak nemůže dosáhnout vyšších pevností. (6), (8)

Obr. 2: Vliv pórovitosti kameniva na pevnost v tlaku (8)



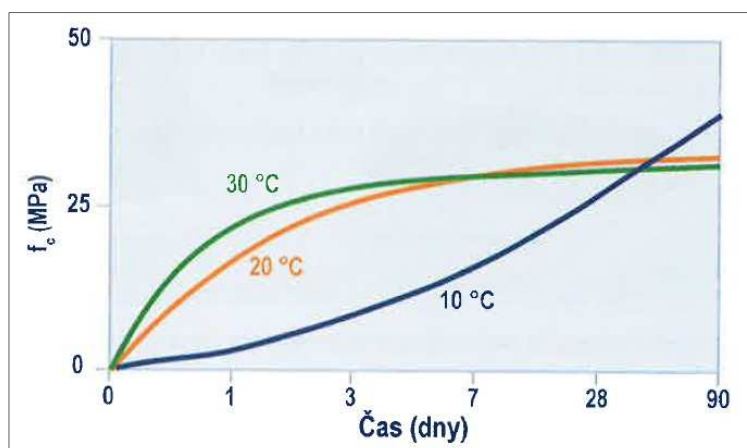
3.2 Teplota prostředí a hydratační teplo

Na vývoj pevnosti v tlaku mají vliv dva druhy teplot. Jedním je teplota okolního prostředí a druhým je teplo vzniklé hydratací cementu.

3.2.1 Teplota okolního prostředí

Řadou zkoušek a měření se ukázalo, že na počáteční pevnosti má teplota značný vliv. Pokud betonáž probíhá při nízkých teplotách, je i počáteční pevnost velmi nízká. To má souvislost hlavně s oddálením chemických reakcí v betonu, především s nižší rychlostí hydratace cementu. Růst pevnosti v čase je proto v prvních dnech pozvolný, ale po 28 dnech je dosaženo požadované tlakové pevnosti.

Betonáž při letních teplotách (kolem 30 °C) naopak vykazuje velmi rychlý nárůst pevnosti. Po 3 dnech však dochází k ustálení a minimální změně vzhledem k pevnosti po 28 dnech. (8)



Obr. 3: Vliv teploty na vývoj pevnosti (8)

Obecně nejvhodnější teplotou pro betonáž je teplota 20 °C (± 2 °C). Poté, co se zjistilo, že teplota má vliv na pevnost cementu i betonu, byla tato teplota zvolena jako výchozí. Na základě této teploty byly také stanoveny pevnostní třídy cementu a betonu, které uvádějí normy ČSN EN 197-1 a ČSN EN 206-1+A1. (2), (3)

V současnosti, kdy se celý průběh stavby urychluje, se betonáž v letním období může zdát jako přínosná, ale nesmíme zapomínat na negativa, která s sebou přináší. Hlavními zápory je bezpochyby rychlejší vysychání betonu, které může vést k příliš rychlému smrštění konstrukce, vzniku trhlin a ke snížení pevnosti. Proto bychom měli klást velký důraz na vhodné ošetřování betonu po celou dobu vývoje pevnosti (viz kapitola 3.5). (8)

3.2.2 Hydratační teplo

Cement, jakožto hydraulická látka, vyvolává po smíchání s vodou exotermickou reakci, při níž vzniká takzvané hydratační teplo. Tuto reakci vyvolává především chemické složení samotného cementu (více viz kapitola 4).

U vysokohodnotných betonů, kde je nízký vodní součinitel (kolem 0,25), nevzniká tak velké hydratační teplo jako u betonů, kde se vodní součinitel pochybuje kolem hodnoty 0,6. Je to způsobeno hlavně tím, že čerstvá směs betonu obsahuje malé množství vody potřebné pro hydrataci cementu.

Proces hydratace ovlivňuje především počáteční tlakové pevnosti. Při hydrataci dochází k chemickým reakcím, při kterých se vytváří kompaktní hmota. Na povrchu zrn cementu a případných příměsí, se při hydrataci tvoří mikroskopická vlákna, díky kterým se k sobě jednotlivá zrna pojí. Například použitím mikrosiliky (viz kapitola 5) se proces hydratace ještě více urychlí a vývin tepla je zesílen. Oproti tomu při použití popílku (viz kapitola 6) je proces hydratace oddálen a zpomalen je i nárůst pevnosti. Takto kompaktní hmota je díky provázanosti jednotlivých zrn schopna po 24 hodinách dosáhnout pevností kolem 20 a 30 MPa. Vliv maximálního hydratačního tepla na 28denní pevnost, kterého je během hydratace dosaženo, nebyl prokázán. (6), (7), (8)

3.3 Pórovitost a obsah vzduchu

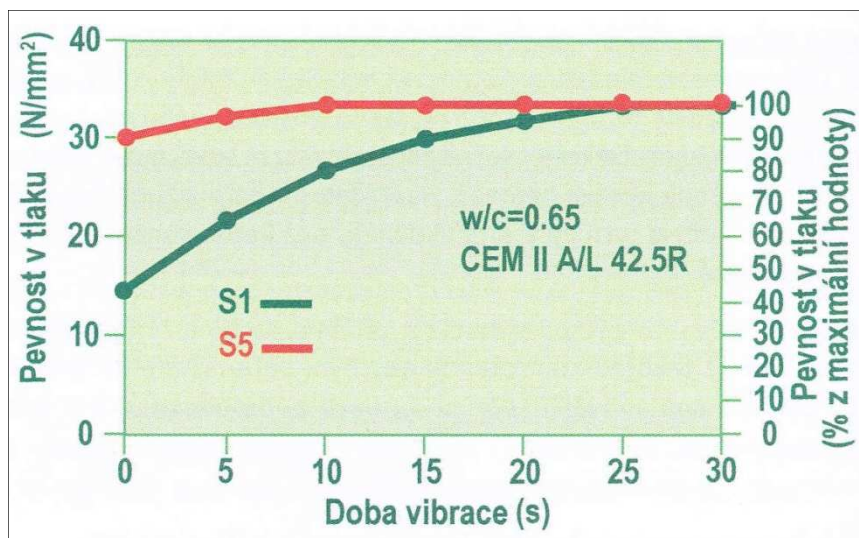
Vzhledem ke složení a struktuře je beton považován za materiál pórovitý. Mezi zrnny kameniva, která jsou obalena zrny cementu, se mohou vytvářet i mikroskopické mezery neboli póry. I ty mohou mít na pevnost v tlaku jistý vliv. Pokud prvek obsahuje velké množství pórů, je náchylnější na porušení a jeho pevnost je nižší. Nicméně jsou případy, kdy je vyšší pórovitost přímo vyžadována, nikoliv však u vysokohodnotných betonů. Nejčastěji se jedná o betony, které mají odolávat vodě a mrazu. Do těchto betonů je přidávána provzdušňující přísada, která způsobí vznik pórů o průměru 50–300 μm . Ty pak zaujmají přibližně 4–6 % celkového objemu betonu. Je dokázáno, že více pórovité betony jsou vodotěsné a mrazuvzdorné, avšak na úkor pevnosti. Objem vzduchu v betonu je, i bez provzdušňujících přísad, kolem 0,5 - 2,5 % z celkového objemu. Zvýšení obsahu vzduchu o 1 % může způsobit pokles pevnosti až o 6 %. (1), (6)

▪ Způsob hutnění:

Pórovitost je velmi úzce svázána právě s vhodným způsobem hutnění. Za nejúčinnější způsob se v současné době považuje vibrování. Zhutnění probíhá pomocí kmitavých pohybů, které působí na jednotlivé částice celé směsi. Při těchto opakovaných otřesech dochází k tomu, že se jednotlivá zrna kameniva neuspořádaně pohybují, narážejí do sebe a snižují tak mezerovitost čerstvého betonu. Vibrační dochází k seskupení zrn těsně vedle sebe, vyplnění všech volných míst a vytlačení přebytečného vzduchu. (1), (4)

3.4 Doba hutnění

Na tlakovou pevnost může mít vliv i doba vibrace, ale velmi záleží na třídě konzistence. S každou třídou konzistence (S1 – S5) se potřebná doba vibrace liší. Pro betony s třídou konzistence S5 (tekutý beton) stačí 5s vibrace, abychom dosáhli 100% hodnoty pevnosti. Naproti tomu betony hutnější (třída S1) dosáhnou své maximální pevnosti až po 25s vibrace. Pro dosažení 100 % hodnoty pevnosti pro všechny konzistence (třídy S1 – S5) je optimální doba hutnění 30s. (1), (6), (8)



Obr. 4: Vliv doby vibrace na pevnost v tlaku betonů s třídou konzistence S1 a S5 (8)

3.5 Způsob a doba ošetřování

Dalším parametrem, který výrazně ovlivňuje tlakovou pevnost a trvanlivost betonu, je způsob a doba ošetřování. Ošetřování je proces, při kterém se snažíme zabránit odpařování vody, která je důležitá nejen pro chemické reakce, ale také pro získání potřebných mechanických vlastností betonu. Patřičné ošetřování je důležité jak pro konstrukce z prostého, tak pro konstrukce z vysokohodnotného betonu. (1)

3.5.1 Důvody ošetřování

Hlavními důvody, proč je beton potřeba ošetřovat, je snížení, či úplné zamezení, smršťování konstrukce a dostatečná hydratace cementu. Ke smršťování dochází především z důvodu odpařování vody. Pokud není prvek ošetřován a vysychá, může docházet k tahovým napětím a vzniku trhlin. I ty ovlivňují výslednou pevnost, ale především snižují trvanlivost betonu.

U vysokohodnotných betonů, kde je velmi nízký vodní součinitel, dochází k rychlému spotřebování obsažené vody. Bez potřebného ošetřování, nemůže správně zhydratovat a dosáhnout tak vyšších pevností.

Ošetřování vysokohodnotného betonu je ale pro řadu vědců stále otázkou. Někteří tvrdí, že musí být ošetřován stejně jako beton prostý a jiní jsou přesvědčeni, že ho není potřeba ošetřovat vůbec. (1), (8)

3.5.2 Způsoby ošetřování

Ošetřování může probíhat dvěma základními způsoby. Prvním je mokré ošetřování, kdy je konstrukce v přímém kontaktu s vodou a druhý spočívá v zabránění odpařování vody.

Variantami mokrého ošetřování jsou: pravidelné stříkání vodou, úplné ponoření a zakrytí vlhčícími rohožemi. Ponoření konstrukce je ve většině případů nemožné, proto se nejčastěji využívá pravidelný postřik.

K zabránění odpařování vody je možné použít nepropustné membrány, jako jsou například plastové fólie, nebo nástřiky parotěsnými látkami. Tyto emulze pak vytvoří na povrchu konstrukce ochranný film.

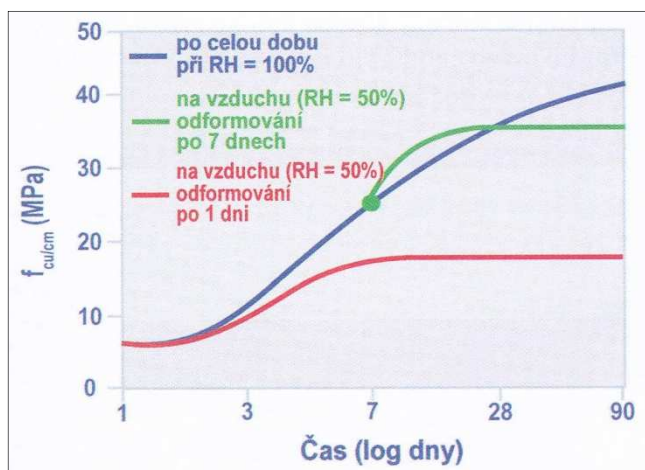
Vhodnost jednotlivých variant se odvíjí od povětrnostních podmínek a vodního součinitele. Hodně také záleží na začátku doby ošetřování, takže návrh způsobu a ošetřovacích prostředků je individuální. (1), (8)

3.5.3 Doba ošetřování

I přesto, že u řady vědců zůstává nutnost ošetřování otázkou, je jasné, že musí začít co nejdříve. Doba, po kterou je beton nutné ošetřovat, se liší z hlediska složení betonové směsi a okolních podmínek. Minimální doporučenou dobu ošetřování, v závislosti na všech aspektech, uvádí evropská norma ČSN EN 206-1+A1.

S ohledem na typ cementu, teplotu prostředí a vodní součinitel se minimální doba ošetřování pohybuje mezi 1–10 dny. Prodloužení minimální potřebné doby ošetřování nemá na pevnost v tlaku negativní dopad. (2), (8)

Obr. 5: Vliv ošetřování na vývoj pevnosti (8)



Pozn.:

RH = relativní vlhkost
vyjádřená v procentech

3.6 Vliv zkušebního zařízení a postupu

Metody zkoušení mechanických vlastností vysokohodnotného betonu jsou stejné jako pro běžné betony. Existují ovšem výjimky, kdy obvyklé metody nelze využít. To je často zapříčiněno tím, že zkušební stroje nejsou schopny vyvinout potřebnou sílu pro měření.

V dnešní moderní době je k dispozici velká řada zkušebních zařízení a postupů. I když by se mohlo zdát, že způsob zkoušení vzorků betonu nemá na pevnost vliv, není tomu tak. Na základě řady výzkumů se ukázalo, že i to, jak betonový prvek zatěžíme, může ovlivnit výslednou pevnost.

Jedním z příkladů je vliv rozměrů zatěžovací hlavy. Profesor Aïtcin, při svém univerzitním výzkumu mimo jiné ukázal, jak je důležité dodržovat normové předpisy. Když válcový betonový prvek o průměru 100 mm zatížil hlavou o průměru 150 mm, dosáhl nižší pevnosti, než když vzorek zatížil hlavou, kterou norma uvádí jako vhodnou, pro daný průměr vzorku, tj. průměr 100 mm. Rozměr zkušebních hlav se projevil i na tvaru porušení prvku. (6)

Dalším negativním vlivem se ukázala být excentricita mezi osou lisovací hlavy a osou vzorku. Pro vysokohodnotné betony, pokud je excentricita větší než 4 mm, dochází ke snížení pevnosti o desítky megapascalů. Profesor Adam Neville dokázal tento vliv při svých pokusech a význam excentricity také publikoval. (10)

4. Cement

4.1 Definice a základní vlastnosti

Cement je, dalo by se říci, nejdůležitější složkou betonu. I přesto, že je beton materiál vyrobený ze tří základních složek (cement, voda a kamenivo) a nemohl by fungovat ani bez jedné, je právě cement tou nejpodstatnější. Je totiž hlavním činitelem pro dosažení potřebné pevnosti konstrukce.

4.1.1 Definice cementu

„Cement je práškové hydraulické stavební pojivo vzniklé pálením jemné stejnoměrné suroviny vhodného složení do slinutí a rozemletím takto vzniklých slínek, popř. s přísadou hydraulicky aktivních látek přírodních nebo umělých, na jemnou moučku po účelném zchlazení a odležení.“

[Josef Hermáček, Stavební pojiva, str. 84] (4)

„Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Po smíchání s vodou postupně tuhne a tvrdne. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost ve vodě.“

[Petr Pytlík, Technologie betonu, str. 41] (1)

„Cement je hydraulické pojivo. Jedná se o jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne.“

[ebeton.cz, Slovník pojmů – Cement] (11)

Způsobů, jak definovat cement, je několik. Podstatné, co bychom si ale měli z výše uvedených definic vzít, je to, že cement je namletá prášková látka, která vykazuje hydraulické vlastnosti. Pro své chemické složení vyvolává po smíchání s vodou exotermickou reakci, při níž se vytváří tzv. hydratační teplo a cementová kaše začíná houstnout. Během procesu hydratace se cementová pasta postupně mění na pevnou látku, čemuž se odborně říká tuhnutí. Po tomto procesu nastává takzvané tvrdnutí, při němž cementový prvek postupně získává svoji pevnost a je schopen odolávat mechanickému namáhání. (1), (4)

4.1.2 Typy cementů

Oproti začátkům výroby betonu, máme k dispozici hned několik druhů cementů, které jsou specifické především svým chemickým složením. Technická norma ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, definuje pět základních typů cementů, které je ve stavebnictví možné použít. Cementy se vzájemně liší především v procentním obsahu portlandského slínku a příměsí. (3), (4), (8)

Rozdělení, které definuje evropská norma, je následující:

Druh cem.	Název cementu	Označení cem.	Slínek (K)	Vysokopecní struska (S)	Křemičitý úlet (D) ³⁾	Pucolán přírodní (P)	Pucolán průmyslový (Q) ⁴⁾	Popílek křemičitý (V)	Popílek vápenatý (W)	Kalcinovaná břidlice (T)	Vápenec (L)	Doplňující složky ²⁾		
I	Portlandský cement	I	95 – 100	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
II	Portlandský struskový cement	I/A-S	80 – 94	6 – 20	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
		I/B-S	65 – 79	21 – 35	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
	Portlandský cement s křemičitým úletem	I/A-D	90 – 94	~	6 – 10	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
	Portlandský pucolánový cement	I/A-P	80 – 94	~	~	6 – 20	~	~	~	~	~	0 – 5		
		I/B-P	65 – 79	~	~	21 – 35	~	~	~	~	~	0 – 5		
		I/A-Q	80 – 94	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	0 – 5		
		I/B-Q	65 – 79	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	0 – 5		
	Portlandský popílkový cement	I/A-V	80 – 94	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	~	0 – 5	
		I/B-V	65 – 79	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	~	0 – 5	
		I/A-W	80 – 94	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	~	0 – 5	
		I/B-W	65 – 79	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	~	0 – 5	
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	I/A-T	80 – 94	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	~	0 – 5	
		I/B-T	65 – 79	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	~	0 – 5	
	Portlandský cement s vápencem	I/A-L	80 – 94	~	~	~	~	~	~	~	6 – 20	~	0 – 5	
		I/B-L	65 – 79	~	~	~	~	~	~	~	21 – 35	~	0 – 5	
	Portlandský směsný cement	I/A-M	80 – 94						6 – 20 ⁵⁾				~	~
		I/B-M	65 – 79						21 – 35 ⁵⁾				~	~
		III/A	35 – 64	36 – 65	~	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5	
III	Vysokopecní cement	III/B	20 – 34	66 – 80	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
		III/C	5 – 19	81 – 95	~	~	~	~	~	~	~	0 – 5		
IV	Pucolánový cement	IV/A	65 – 89	~	11 – 35			~	~	~	~	0 – 5		
		IV/B	45 – 64	~	36 – 55			~	~	~	~	0 – 5		
V	Směsný cement	V/A	40 – 64	18 – 30	~	18 – 30		~	~	~	~	0 – 5		
		V/B	20 – 39	30 – 50	~	30 – 50		~	~	~	~	0 – 5		

¹⁾ Hodnoty v tabulkách se vztahují na hlavní a doplňující složky cementu bez síranu vápenatého a přísad
²⁾ Jako doplňující složky mohou být použita plniva nebo jedna či více látek, používaných jako hlavní složky, pokud v cementu nejsou jako hlavní složky použity
³⁾ Obsah křemičitého úletu je limitován do 10 %
⁴⁾ Obsah jiných strusek než vysokopecní strusky je limitován do 15 %
⁵⁾ Obsah plniva je limitován do 5 %

Obr. 6: Rozdělení cementů dle ČSN EN 197-1 (12)

Dalšími typy, které jsou na dnešním trhu také k dostání, jsou speciální cementy. Každý z nich je svými vlastnostmi specifický pro určité použití. Například bílý cement se využívá především pro dekorace a povrchové úpravy, silniční cement se zase vyznačuje vysokou pevností v tahu za ohybu, objemovou stálostí a dlouhodobou trvanlivostí. Hlinitanové cementy dobře odolávají v agresivním prostředí, ale časem ztrácejí svoji pevnost. (1)

4.1.3 Třídy pevnosti cementů

Nejen na základě chemického složení lze cementy třídit. Velmi podstatným údajem, podle kterého si můžeme cement vybrat, je normalizovaná třída pevnosti. Ta nám říká, jaké minimální tlakové pevnosti je cement schopen dosáhnout po 28 dnech tuhnutí a tvrdnutí. Vyráběné třídy pevnosti jsou: 32,5N, 32,5R, 32,5L, 42,5N, 42,5R, 42,5L, 52,5N, 52,5R a 52,5L, kde číslo (např. 42,5) definuje hodnotu minimální pevnosti v MPa po 28 dnech a symbol uvedený za hodnotou pevnosti (N – normal, R – rapid, L – low) uvádí, zda se jedná o normální, rychlý nebo pomalý nárůst počáteční pevnosti.

Pro představu, cementy s třídou pevnosti 42,5N a 42,5R mají po 28 dnech stejnou pevnost v tlaku, tj. 42,5 MPa, ale počáteční pevnost (po 2 dnech) je u cementu 42,5R vyšší o 10 MPa, oproti cementu 42,5N. (3), (8)

Tab. 1 Fyzikální vlastnosti cementů

Třída cementu	Pevnost v tlaku (MPa)			Začátek tuhnutí (min)	Objemová stálost (min)
	počáteční pevnost		normalizovaná pevnost		
	2 dny	7 dní	28 dní		
32,5 N	–	≥ 16,0	≥ 32,5	≤ 52,5	≤ 10
32,5 R	≥ 10,0	–			
42,5 N	≥ 10,0	–	≥ 42,5	≤ 62,5	
42,5 R	≥ 20,0	–			
52,5 N	≥ 20,0	–	≥ 52,5	–	
52,5 R	≥ 30,0	–			≥ 45

Obr. 7: Minimální tlakové pevnosti pro různé třídy cementu dle ČSN EN 197-1. (13)

4.1.4 Označení cementu

Evropská norma ČSN P ENV 197-1: *Cement. Složení, jakostní požadavky a kritéria pro stanovení shody. Část 1: Cementy pro obecné použití*, později nahrazena normou ČSN EN 197-1: *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*, zavedla v roce 1993 jednotné označování cementů.

Každý symbol představuje určitou specifikaci. Například **CEM II-A/S 32,5R** je směsný portlandský cement (II) struskový (S), s množstvím vysokopecní strusky 6–20 % (A), pevností v tlaku 32,5 MPa a s rychlým nárůstem počáteční pevnosti (R). (1), (3)

4.1.5 Vlastnosti cementu

Základní a nejdůležitější vlastností cementu je jeho schopnost pojít k sobě jednotlivá zrna kameniva a cementu. Za pomoci této vazby jsme schopni vyrobit z původně sypkých materiálů hmotu celistvou. Cement také způsobuje, že z původní, relativně řídké směsi, dokáže díky hydrataci vytvořit pevný a odolný prvek. I sám o sobě, v podobě cementového tmelu, je schopen dosahovat vysokých tlakových pevností a odolávat tak nemalým zatížením.

Pro vysokohodnotné betony se stal nejvhodnější variantou Portlandský cement s třídou pevnosti 42,5 a 52,5. Zásahu na tom má jak jeho chemické složení, tak jemnost mletí a pevnosti, kterých dosahuje. (1), (6)

4.2 Hydratace cementu, počátek a doba tuhnutí a tvrdnutí

Jak bylo již několikrát zmíněno, hydratace je chemický proces, při němž se z betonu uvolňuje teplo a směs začíná tuhnout a tvrdnout. Proces tuhnutí se odehrává v řádu hodin, maximálně dní, ale tvrdnutí může v závislosti na prostředí probíhat i několik let. Už mnohokrát bylo dokázáno, že normový konec tvrdnutí betonu (popř. cementu) nastává po 28 dnech, kdy prvek dosahuje své maximální pevnosti v prostém tlaku. (1)

4.2.1 Počátek a doba tuhnutí

To, jakou rychlostí nastane počátek tuhnutí, má velký význam pro beton z hlediska technologie. Ve stádiu tuhnutí totiž dochází ke zhoršení zpracovatelnosti směsi a ztrátě tvárnosti. Tento nedostatek, ovlivňující technologii zpracování, lze ovšem částečně odstranit přidáním chemických přísad. Zásahu na tom má především neustálý vývoj v oblasti stavebnictví.

Počátek doby tuhnutí je nyní možné oddálit použitím takzvaných zpomalovačů tuhnutí. Nejčastěji se jedná o tekuté chemické látky neboli přísady, které svým složením umožní zpomalení nástupu chemických reakcí, které vedou k tuhnutí cementové pasty. Když uvážíme, že chemické reakce v betonové směsi nastávají již během několika desítek minut po zamíchání, bylo by bez těchto přísad prakticky nemožné dovážet čerstvý beton na vzdálenější staveniště.

Také počátek a doba tuhnutí čerstvé směsi jsou předepsány evropskou normou (ČSN EN 197-1). Pro cementy s pevnostní třídou do 42,5 musí počátek tuhnutí nastat nejdříve po 60 minutách, po 45 minutách pro cementy vyšší pevnostní třídy (52,5). Doba trvání procesu tuhnutí je obvykle 3-5 hodin. Konec tuhnutí není normou definován, ale měl by nastat maximálně po 12 hodinách od zamíchání.

Co se týká vlivu počátku a doby tuhnutí cementu na tlakovou pevnost, prozatím neexistuje vztah, který by vzájemné ovlivnění prokázal. (1), (3), (6)

4.2.2 Tvrdnutí betonu

Na rozdíl od tuhnutí se na vývoji tlakové pevnosti značně podílí proces tvrdnutí. Právě při tomto procesu získávají betonové prvky své mechanické vlastnosti. Tvrdnutí nastává po ukončení fáze tuhnutí a projevuje se především zpomalením hydratace. Normovým časem, kdy končí fáze tvrdnutí a betonový prvek má potřebné mechanické vlastnosti, je 28 dní od výroby čerstvé směsi. Neznamená to ale, že by se veškeré chemické reakce v konstrukci úplně zastavily. Další fázi, tj. po 28 dnech, můžeme označit jako "dozrívání". Tato fáze může trvat i několik let, během nichž se mechanické vlastnosti stále nepatrně mění. (1), (6)

Jelikož je tlaková pevnost přímo závislá na počátku a době tvrdnutí, rozlišujeme v praxi tři druhy tvrdnutí:

1. **Normové tvrdnutí betonu**, při kterém je zajištěna optimální teplota zrání (20 ± 2 °C) a vhodný způsob ošetřování
2. **Zpomalené tvrdnutí**, za použití zpomalovacích přísad nebo při tvrdnutí za nízkých teplot (méně než 15 °C)
3. **Urychlené tvrdnutí**, kterého je docíleno použitím urychlovačů tuhnutí, zvýšením teploty anebo také použitím cementu s označením R.

Na základě výše zmíněných druhů tvrdnutí se rozlišuje rychlý, střední, pomalý a velmi pomalý vývoj pevnosti v tlaku, který mimo jiné uvádí technická norma ČSN EN 206-1+A1. (1), (2), (6)

4.3 Možné náhrady cementu

Velmi populárním a diskutovaným tématem současnosti jsou pojiva, kterými je možné alespoň částečně nahrazovat cement. Potřeba náhrady vychází z několika důvodů, ale za hlavní jsou označovány dva. Prvním důvodem je finanční stránka výroby betonu. Jelikož cement stále zůstává nejdražší složkou betonové směsi, jakákoli částečná náhrada by umožnila snížení celkové ceny betonu. Druhým, a dle mého názoru podstatnějším, důvodem je dopad výroby cementu na životní prostředí. Při výrobě portlandského cementu vzniká při spalování vápence CO_2 (oxid uhličitý), který dále uniká do ovzduší. V současnosti, kdy je beton hojně využíván a vyrábí se tak více cementu, je produkce emisí CO_2 o to vyšší.

Další pozitivní stránkou věci je zlepšování kvality betonu. Příměsi nahrazující cement umožnily nástup nových typů betonů, jako jsou betony vysokohodnotné (HPC) nebo samozhutnitelné (SCC). (4), (7)

Předpokladem náhrady cementu by v první fázi mělo být prokázání hydraulických vlastností látky (schopnosti tvrdnout ve vodním prostředí), kterou cement nahrazujeme. Jelikož minerální příměsi, které se dnes běžně používají, jsou většinou vedlejší průmyslové produkty, dalo by si říci průmyslové odpady, může být definování jejich chemického složení obtížné. Nicméně moderní technologie a laboratorní zkoušky dokážou hydraulicitu prokázat, a proto máme k dispozici hned několik možných příměsí. (6)

Mezi aktivní příměsi (viz kapitola 2.2.2), kterými lze částečně nahradit cement, patří přírodní a umělé pucolány, klasické elektrárenské popílký, fluidní popílký, křemičité úlety (mikrosilika), nanosilika, vysokopecní strusky, mikromletý vápenec, metakaolin a kamenná moučka. (7)

Některé z těchto příměsí jsou používány již řadu let, nikoli však jako příměsi do betonu, ale jako minerální složky směsných cementů. Například přírodní pucolány, vysokopecní struska nebo křemičitý úlet jsou míseny s portlandským cementem už při jeho výrobě. (1)

Každá z těchto příměsí je jedinečná svým chemickým složením, a proto i jejich vliv na počáteční a konečné vlastnosti betonu je odlišný. I přes tento fakt mají jednotlivé příměsí něco společné. Tím je schopnost vytvářet, za přítomnosti vody a vápna, stejné chemické reakce, které vznikají při hydrataci portlandského cementu. Mimo jiné u nich bylo prokázáno zkvalitnění směsi jak čerstvého, tak ztvrdlého, betonu. Jedná se o hutnější strukturu, tedy o dokonalejší obalení jednotlivých zrn a vyplnění i mikroskopických mezer mezi zrny cementu. To vede k lepší odolnosti proti mechanickému namáhání, vyšším pevnostem v tlaku a k prodloužení trvanlivosti. (6)

V následujících kapitolách budou podrobněji představeny tři možné příměsí – křemičitý úlet, elektrárenský popílek a metakaolin, především pak jejich možný vliv na budoucí mechanické vlastnosti betonu. Druhá část této bakalářské práce (experimentální část) se zaměřuje právě na tyto příměsí a jejich vlastnosti. Předmětem pokusu je hlavně ověřit, jaký mají vliv na průběh nárůstu tlakové pevnosti.

5. Křemičitý úlet (mikrosilika)

5.1 Definice a základní vlastnosti

Křemičité úlety a jejich základní vlastnosti jsou známy již od 70. let minulého století. Vzhledem k tomu, že k nim tehdy chyběly dnes dostupné superplastifikátory, nebylo možné plně využít jejich potenciálu. Po příchodu superplastifikačních přísad, především ztekucovačů, se použití rozšířilo a bylo možné je začít používat jako plnohodnotné látky nahrazující cement. (6), (8)

- **Původ křemičitých úletů:**

Jedná se o vedlejší průmyslový produkt, který vzniká při výrobě křemíku a slitin obsahující křemík, jako například ferosilicium, dále používané k výrobě oceli a litin. Než se ukázalo jeho možné využití, byly vyprodukované křemičité úlety vyváženy na skládky jako nežádoucí odpad.

Výroba křemíku probíhá v elektrických obloukových pecích, kde při vysokých teplotách vzniká plynný SiO_2 . Tento plyn se shromažďuje v horní části pece, kde se ochlazuje a kondenzuje. Tím vznikají velmi jemné částice zachycující se v odlučovacím systému výrobní pece.

Křemičité úlety jsou tvořeny především chemickou sloučeninou SiO_2 neboli tzv. silikou. Proto se někdy označují jako mikrosilika. Ty mohou mít rozdílné chemické složení, jiný obsah SiO_2 , což závisí na slitině, která je zrovna vyráběna. Pokud se jedná o výrobu čistého křemíku, je obsah SiO v křemičitém úletu mezi 90–98 %, ale například při výrobě ferosilicia (Fe-Si) je obsah SiO jen přibližně 85 %. (6), (7), (8)

- **Specifikace mikrosiliky:**

Křemičitý úlet má světle až tmavě šedou barvu. Jeho velmi jemné částice mají prakticky dokonale kulatý tvar o velikosti zrn 0,1 - 2 μm . Oproti rozměrům zrn cementu jsou zrna mikrosiliky prakticky stonásobně menší a k jejich vidění je zapotřebí speciálních mikroskopů.

Jako maximální množství mikrosiliky, kterým lze cement nahradit, se v praxi uvádí 10 % z hmotnosti cementu. Při vyšších dávkách by se musel zvětšit vodní součinitel, což je v rozporu s idejí vysokohodnotného betonu. (6), (7)

- **Struktura:**

Vzhledem k opravdu velmi malým rozměrům jednotlivých částic může mikrosilika vyplňovat i mezery mezi zrny cementu. To má za následek hutnější a kompaktnější strukturu výsledného prvku, ale hlavně pevnou vazbu mezi kamenivem a cementem. Taktéž to napomáhá ke snížení nežádoucí pórovitosti. (7)

Hlavní nevýhodou jemnosti mikrosiliky je větší spotřeba záměsové vody, a to z důvodu zachování určitého stupně zpracovatelnosti. Pro zachování dobré zpracovatelnosti směsi a nízkého vodního součinitele je v tomto případě nezbytné užití superplastifikátorů. (7)

5.2 Vlastnosti příměsi a vliv na mechanické vlastnosti betonu

Podstatnou vlastností mikrosiliky je, že výrazně urychluje proces hydratace. Jelikož je vysoce reaktivní, urychluje počáteční vývin tepla a celkově přispívá k hydrataci cementu. Díky hutné mikrostruktuře zlepšuje tlakové pevnosti, zejména v prvních fázích tvrdnutí, tzn. mezi 7 a 28 dny.

Přidáním křemičitých úletů do betonu můžeme výrazně zlepšit i vlastnosti čerstvé směsi. Jejich použitím se dá předejít například tzv. krvácení betonu (bleeding) neboli odmísení vody, která je potřebná pro průběh hydratace.

U ztvrdlého betonu jsou hlavními výhodami odolnost proti agresivním vlivům prostředí, omezení propustnosti vody, prodloužená trvanlivost a také vyšší pevnost v tlaku. (6), (7)

6. Elektrárenský popílek

6.1 Definice a základní vlastnosti

Dalším průmyslovým odpadem, který se stal součástí vysokohodnotných betonu, je létavý elektrárenský popílek. Než byl používán jako příměs do betonu, byl hojně využíván při výrobě směsných portlandských cementů.

- **Původ elektrárenského popílku:**

Popílek vzniká v tepelných elektrárnách při spalování uhlí. Namleté uhlí je vháněno do kotle, kde se při vysokých teplotách spaluje. Při tomto spalování vzniká vedlejší produkt – jemný popílek, který je spalinami unášen vzhůru a zachycován v odlučovacím systému elektrárny.

Stejně jako křemičité úlety i popílek vykazuje pucolánové vlastnosti. Je složen převážně z oxidu křemičitého (SiO_2) a oxidu hlinitého (Al_2O_3).

Popílky se rozlišují v závislosti na typu uhlí, spalovacím procesu a způsobu odlučování ze spalin. Pokud popílek vzniká spalováním černého uhlí, bude mít jiné vlastnosti než popílek vzniklý ze spalování hnědého uhlí. Další rozdíl ve vlastnostech může být způsoben jiným typem spalovacího systému. I když bude spalováno například pouze černé uhlí, bude se chemické složení popílků z různých elektráren lišit. Proces spalování také nepřímo ovlivňuje velikost jednotlivých částic popílku. Podle toho, jakým způsobem se létavý popílek zachycuje v odlučovacím systému, se liší jemnost jeho částic. (6), (7)

Dále se popílky dělí, v závislosti na teplotě spalování, na vysokoteplotní a fluidní. Vysokoteplotní čili klasické popílky vznikají spalováním uhlí při teplotě přibližně $1500\text{ }^\circ\text{C}$. Mají optimální chemické složení a jsou proto vhodné jako příměs. Fluidní neboli nízkoteplotní popílky vznikají při teplotě spalování pouze kolem $850\text{ }^\circ\text{C}$ a s přidáním vápence. Tyto popílky se jako příměs do betonu prakticky nepoužívají, protože ve většině případů nesplňují požadavky technické normy. Může za to hlavně vysoký obsah volného CaO (oxid vápenatý) a SO_3 (oxid sírový). (7)

- **Specifikace popílku:**

Částice popílku vzniklého ze spalování černého uhlí, mají sklovitý kulovitý tvar, kde velikost jednotlivých částic je podobná velikosti zrn cementu. V průměru jsou velké $1\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$. Hnědouhelný popílek je jako příměs méně vhodný, především kvůli nepravidelnému tvaru jednotlivých zrn.

Elektrárenským popílkem je možné nahradit cement až ze 30 %. Je to způsobeno hlavně velikostí jednotlivých zrn. Jelikož jsou zrna popílku přibližně stejně velká jako zrna cementu, nestává se směs hutnější, jako je tomu například u mikrosiliky. (1), (7)

- **Struktura:**

Směs, ve které je obsažen elektrárenský popílek, svou strukturou připomíná směs s čistě cementovým pojivem. Pomocí popílku je dosaženo nižší pórovitosti, ale směs není tak hutná a zpracovatelnost je zachována. Přidáním příměsi je nutné zvýšit vodní součinitel, nikoli však kvůli zpracovatelnosti, ale z důvodu hydratace. Značnou část záměsové vody totiž spotřebuje k absorpci povrch zrn popílku. (1), (7)

6.2 Vlastnosti příměsi a vliv na mechanické vlastnosti betonu

Létavý popílek zlepšuje reologické vlastnosti čerstvého betonu. Svým chemickým složením činí beton odolnější proti vlivům agresivního prostředí. Jeho velkým přínosem je, mimo jiné, i snížení ceny betonu. Popílek je levnější než cement a možnost nahradit ho až ze 30 % umožňuje výrazné snížení výsledné ceny betonu.

Hlavní vlastností elektrárenského popílku je zpomalení hydratace. Tato příměs způsobuje oddálení počátku hydratace, tím i nižší vývin hydratačního tepla a v neposlední řadě i pomalejší nárůst pevnosti. Zpoždění hydratace cementu způsobuje, že pevnost po 28 dnech zrání je nižší než u betonu, kde je obsažen pouze cement. Nicméně, i když můžeme nárůst pevnosti pozorovat až mezi 28 a 90 dnem tvrdnutí, celková tlaková pevnost betonu je vyšší. (1), (6), (7)

7. Metakaolin

7.1 Definice a základní vlastnosti

Asi prozatím nejméně používanou příměsí, která slouží také jako náhrada cementu, je metakaolin. Ten, jako jeden z mála příměsí, není průmyslovým odpadem, ale je cíleně vyráběn.

- **Původ metakaolinu:**

Metakaolin je vyráběn pálením kaolinu, kaolinitických jílů a dalších surovin při teplotě přibližně 600–900 °C. Při výpalu se z jílového kaolinu odstraňují molekuly vody, které se odpařují a přispívají tak k silně porézní struktuře výsledného metakaolinu. Podle způsobu využití mohou být vyráběny ve formě prášku nebo koncentrované suspenze. (7), (14), (15)

Předními výrobci metakaolinu v České republice jsou Sedlecký kaolin a.s. a České lupkové závody, a.s. Kaolin, ze kterého se metakaolin vyrábí, je tradiční surovinou pro výrobu porcelánu. (16), (17)

- **Specifikace metakaolinu:**

Částice metakaolinu jsou nepravidelně podlouhlé, placaté (destičkovité) a krystalického tvaru. Velikost jednotlivých částic se pohybuje mezi 1–5 μm, tudíž je metakaolin jemnější než cement, ale hrubší než mikrosilika. (14)

V chemickém složení převládá obsah SiO₂ (oxidu křemičitého) a Al₂O₃ (oxidu hlinitého). Spolu s vodou a hydroxidem vápenatým (Ca(OH)₂) dochází k pucolánové reakci. Přitom vznikají nové hydratační zplodiny a modifikuje se pórovitá struktura prvku. (7)

Metakaolin, jako chemický produkt, reaguje s Ca(OH)₂ (portlanditem) pozvolněji než například křemičitý úlet. I přes to je, u směsí obsahující metakaolin, pozorován rychlý vývin hydratačního tepla.

Hodnota procentní náhrady cementu se v různých publikacích liší. Pro vyvážení veškerého Ca(OH)₂ je uváděna 20–24 % náhrada (7), ale také 30–40 % (14).

- **Struktura:**

Struktura betonu obsahující metakaolin je velmi homogenní. Jednotlivé částice v betonu působí jako filler, díky kterému je výsledná směs hutná a málo pórovitá. Ani směsi s touto příměsí se neobejdou bez zvýšení vodního součinitele nebo přidání dostatečné dávky chemické přísady (superpastifikátoru). (14)

7.2 Vlastnosti příměsi a vliv na mechanické vlastnosti betonu

Pozitivní vlastností metakaolinu je nepochybně zlepšení fyzikálně-mechanických vlastností betonu. Nejenže přispívá k hutnější struktuře a lepší reologii betonu, ale byla u něj například prokázána i odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám (CHRL). (7), (15)

Metakaolin je spolu s cementem výborným nositelem tlakové pevnosti. Například z průzkumu, který publikují X. Jin a Z. Li (*Effects of Mineral Admixtures on Properties of Young Concrete (2003)*), je patrné, že beton s 10 % metakaolinem dosahuje velmi vysokých pevností v tlaku. Prakticky po celou dobu zrání dosahuje vyšších pevností než betony s jinými nebo žádnými příměsmi. (14)

8. Porovnání příměsí z hlediska vlivu na mechanické vlastnosti betonu

Na základě zjištěných informací o příměsích můžeme porovnat jejich vliv na mechanické vlastnosti, především pak na nárůst tlakové pevnosti.

Každá příměs nějakým způsobem pozitivně ovlivňuje budoucí vlastnosti betonu, ale jejich výběr by měl probíhat na základě vlastností, které jsou od nově navržené konstrukce očekávány.

- **Maximální počáteční pevnost:**

Pokud chceme dosáhnout vysoké počáteční pevnosti, jeví se jako nejvhodnější betony s příměsí metakaolinu. Ty dosahují vysoké pevnosti už po 24 hodinách tuhnutí a tvrdnutí.

Druhou nejlepší příměsí, z hlediska počátečních pevností, se ukazuje být křemičitý úlet. Přidáním této příměsi do betonu můžeme očekávat dostatečně pevný prvek už po 7 dnech zrání.

- **Maximální normová pevnost (po 28 dnech):**

Maximální pevnosti po 28 dnech zrání dosahují betony s metakaolinem. Betony obsahující elektrárenský popílek nemají maximální počáteční ani normové pevnosti. Potenciál popílku se totiž projevuje až po 28 dnech tvrdnutí a výborných výsledků dosahuje až přibližně za 90 dní.

EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

9. Představení experimentu

Cílem experimentální část této bakalářské práce bylo ověření, která ze zkoušených příměsí má největší vliv na vývoj pevnosti v prostém tlaku. Zároveň byl zadán požadavek na zjištění, která příměs vykazuje nejvyšší počáteční pevnosti, což může být výhodné v praxi, například z hlediska možnosti brzkého odstranění bednění. Mimo tlakové pevnosti byly příměsi zkoušeny také na pevnost v tahu za ohybu.

Pro experiment byly vybrány tři příměsi. Jedná se o křemičitý úlet (mikrosilika) (*Obr. 8a.*), létavý popílek (*Obr. 8b.*) a metakaolin (*Obr. 8c.*). Každá z těchto příměsí byla použita jako částečná náhrada cementu, přičemž náhrady byly zvoleny v první sérii vzorků na 10 % a v druhé na 30 %. Dále byly pro možnost porovnání vyrobeny vzorky obsahující 100 % cementu.

Celý experiment probíhal v laboratoři na Fakultě stavební, ČVUT, přičemž laboratorní práce spočívala ve výrobě cementových trámečků o rozměru 40x40x160 mm, které se v časových intervalech zatěžovaly a zjišťovaly se přitom jejich pevnosti.



a.

b.

c.

Obr. 8: Použité příměsi; a. - Křemičitý úlet, b. - Popílek, c. - Metakaolin

10. Výroba zkušebních těles

10.1 Složení a návrh směsi

S ohledem na skutečnost, že je cement sám o sobě schopen ve ztvrdlém stavu odolávat mechanickému zatěžování, byly zkušební vzorky vyrobeny pouze z cementu a příměsí, bez přítomnosti kameniva. Pro výrobu byly použity následující typy složek:

- Cement: CEM I 42,5R – Mokrý (Českomoravský cement, a.s.)
- Křemičitý úlet: Microsilika – sioxid (Slovenská republika)
- Popílek: Popílek S1, Popílek S2+S3 (ČEZ, a.s.)
- Metakaolin: Mefisto L05 (České lupkové závody, a.s.)

Množství jednotlivých složek, tedy cementu, vody a příměsí, bylo navrženo v závislosti na objemu zkušebních forem, objemové hmotnosti složek a podle procentní náhrady cementu. Objem, na který bylo množství navrženo, je 1 dm³.

Nejprve byly vyrobeny referenční neboli cementové zkušební vzorky.

Tab. 1: Složení směsi cementových vzorků

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1375 g
Voda	1000 kg/m ³	550 g
Vodní součinitel		0,4

Spolu s referenčními vzorky byla vyrobena první série vzorků, tj. s 10 % náhradou cementu. Receptury pro jednotlivé příměsi byly následující:

Tab. 2: Složení směsi vzorků s křemičitým úletem (10 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1177 g
Křemičitý úlet - Silika SK	2400 kg/m ³	118 g
Voda	1000 kg/m ³	565 g
Vodní součinitel		0,44

Tab. 3: Složení směsi vzorků s elektrárenským popílkem (10 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1260 g
Popílek S1	2000 kg/m ³	84 g
Popílek S2+S3	2000 kg/m ³	42 g
Voda	1000 kg/m ³	524 g
Vodní součinitel	0,4	

Tab. 4: Složení směsi vzorků s metakaolinem (10 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1233 g
Metakaolin - Mefisto L05	2300 kg/m ³	123 g
Voda	1000 kg/m ³	543 g
Vodní součinitel	0,4	

Ve druhé sérii byly vyrobeny vzorky s 30 % náhradou cementu a složení směsí je uvedeno v tabulkách níže.

Tab. 5: Složení směsi vzorků s křemičitým úletem (30 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	905 g
Křemičitý úlet - Silika SK	2400 kg/m ³	272 g
Voda	1000 kg/m ³	590 g
Vodní součinitel	0,5	

Tab. 6: Složení směsi vzorků s elektrárenským popílkem (30 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1080 g
Popílek S1	2000 kg/m ³	216 g
Popílek S2+S3	2000 kg/m ³	108 g
Voda	1000 kg/m ³	484 g
Vodní součinitel	0,4	

Tab. 7: Složení směsi vzorků s metakaolinem (30 % náhrada cementu)

Složka	Objemová hmotnost	Množství
Cement CEM I 42,5R - Mokrý	3050 kg/m ³	1022 g
Metakaolin - Mefisto L05	2000 kg/m ³	307 g
Voda	1000 kg/m ³	532 g
Vodní součinitel		0,4

10.2 Zkušební vzorky a jejich počet

Pro zkoušení pevnosti cementu jsou technickou normou ČSN EN 196-1 definovány vhodné zkušební formy a rozměry vzorků. Formy bývají složeny z ocelových dílů, které jsou k sobě pevně smontovány (Obr. 9). Standardním rozměrem zkušebního vzorku je 40 / 40 / 160 mm (š/v/d). Vzhledem k rozměrům se zkušební vzorky nazývají trámečky. (18)

Protože zadáním experimentu je ověřit vývoj pevnosti v čase, bylo potřeba vyrobit dostatečné množství vzorků. Pro zkoušení pevnosti je vždy nutné mít na jedno měření minimálně 3 vzorky ze stejné směsi, aby byla zkouška průkazná. Výslednou hodnotou pevnosti je pak průměr ze tří hodnot. Od každé směsi bylo proto vyrobeno 15 vzorků, celkem 105 zkušebních trámečků.



Obr. 9: Ocelová forma na výrobu zkušebních vzorků

10.3 Postup výroby, ukládání a ošetřování

Nezbytnou součástí experimentu byla příprava pracovních pomůcek a strojů, během níž se kontroloval technický stav a správná funkčnost.

K výrobě zkušebních trámečků byly zapotřebí ocelové formy, které se před použitím natírají tenkou vrstvou oleje. Ten zabraňuje přilepení směsi na stěny a umožňuje snazší odbednění. (Obr. 9)

Dále bylo pomocí digitální váhy, misek a odměrek na vodu přesně naváženo množství složek dle předem stanoveného hmotnostního složení (viz kapitola 10.1). Sypké složky byly naváženy zvlášť do misek a množství vody do odměrek. Všechny složky, a od každé příměsi, byly naváženy celkem 5krát. Bylo tak vyrobeno pět totožných směsí, přičemž z každé směsi byly dále vyrobeny 3 zkušební trámečky.

Mísění směsi probíhalo v automatické míchačce MATEST Auto-Mortat Mixer (Obr. 11), která splňuje normové požadavky. Pro zhotovení směsi na zkušební vzorky jsou normou ČSN EN 196-1 definovány parametry vhodné míchačky, otáčky a také doba, po kterou jsou jednotlivé složky míseny. (18)

Po uložení čerstvé směsi do ocelové formy byla forma přidržena na zhuťovacím stolku a vibrování probíhalo přibližně 20s. Jelikož byla konzistence směsi spíše řídká, byla tato doba hutnění dostatečná.

Po zhuťnění byly vzorky uloženy na stůl v laboratoři, kde byla udržována teplota vzduchu 22 °C a relativní vlhkost 38 %. Všechny zkušební vzorky byly po 24 hodinách od výroby odbedněny a tuhnutí a tvrdnutí probíhalo již mimo formu.

První polovina vzorků (15 kusů cementových a 15 kusů obsahujících 10 % popílku) nebyla nijak ošetřována. Po 3 dnech zrání však došlo k výraznému poklesu pevnosti v tahu za ohybu (viz kapitola 12). Možnou příčinou byla právě absence ošetřování, příliš rychlé vysychání a vznik trhlin. Proto byly všechny ostatní vzorky již od 1 dne trvale ponořeny ve vodě. Později se ukázalo, že ošetřování nemělo na vývin pevnosti v tahu za ohybu vliv. Více v kapitole 12.



Obr. 10: Navážka cementu CEM I 42,5R

Obr. 11: Automatická míchačka MATEST



Obr. 12: Uložení ztuhnutých vzorků



Obr. 13: Hotové zkušební vzorky



11. Zkoušení pevnosti

Zkoušení pevnosti probíhalo v předem stanovených dnech, které zároveň uvádí technická norma. Jednalo se o 1 (po 24 hodinách od výroby), 3, 7, 14 a 28 den. (18)

Pozn.: U druhé série vzorků došlo k opomenutí měření ve 3 dni, a proto tyto pevnosti chybí. Za to máme navíc k dispozici 22denní pevnosti. Také chybí 28denní pevnosti, ale jsou k dispozici 29denní.

▪ Parametry zkušebních vzorků:

Jak bylo zmíněno, zkušební vzorky byly po celou dobu ošetřovány ve vodní lázni. Vyndány byly vždy 24 hodin před samotnou zkouškou tak, aby došlo k jejich vyschnutí a mohly být zváženy a změřeny. Po zvážení byla pomocí posuvného měřítka zjišťována šířka a výška trámečku. Jelikož se trámečky zkouší kolmo na směr ukládání, je šířka a výška měřena, vzhledem ke zkoušce, také kolmo.

Vzhledem k tomu, že po celou dobu tuhnutí a tvrdnutí mění zkušební vzorky svůj tvar a váhu, je nezbytné tyto parametry zjišťovat až bezprostředně před zkouškou.

11.1 Pevnost v tahu za ohybu

První zkouškou pevnosti cementových trámečků byla pevnost v tahu za ohybu. Zkouška probíhala následovně: Po zvážení a změření byl vzorek vložen do zkušebního lisu. Zatěžování probíhalo při tříbodovém uspořádání, kde je vzorek položen bokem na dvě pevné, válečkové podpory a uprostřed zatěžován kolmým kyvným válečkem, který na vzorek působí určitou silou (*Obr. 14*). Rozpětí podpor bylo 100 mm a rychlost zatěžování bylo normových 50 ± 10 N/s. (18)

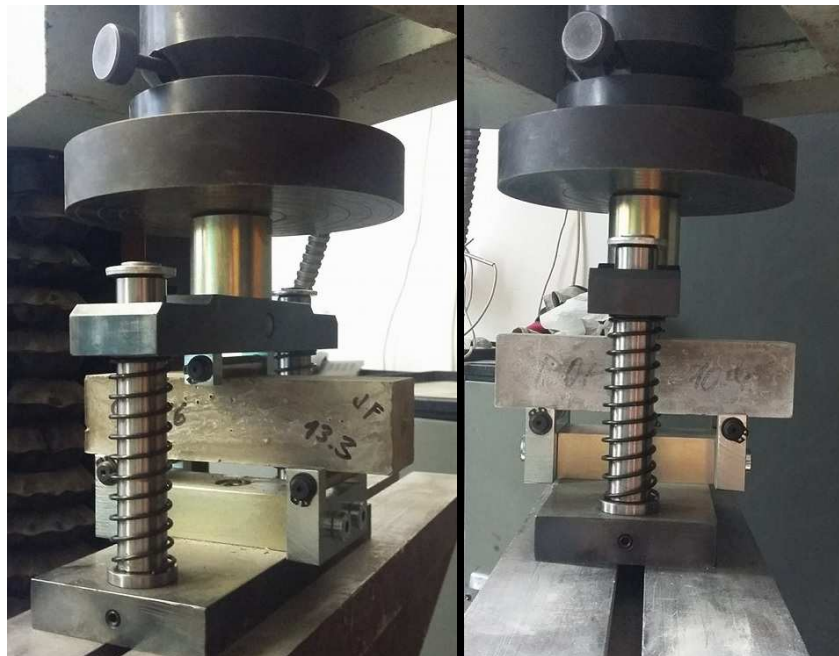
Jakmile se vzorek porušil (praskl na dvě poloviny), bylo dosaženo maximální možné zatěžovací síly. Ze zjištěné síly byla dále vypočtena maximální pevnost, a to pomocí následujícího matematického vzorce:

$$R_f = \frac{1,5 \cdot F_f \cdot l}{b^3}$$

Kde: R_f je pevnost v tahu za ohybu [MPa; N/mm²]
 F_f je maximální zatěžovací síla při porušení [N]
 l je vzdálenost mezi podporami [mm]
 b je strana čtvercového průřezu zkušebního vzorku [mm]

(18)

Na obrázku níže je vidět zkušební lis, jeho části a princip tříbodového uspořádání zkoušky – dvě válečkové podpory a jeden zatěžovací váleček.



Obr. 14: Zkouška v tahu za ohybu

11.2 Pevnost v prostém tlaku

Tato zkouška probíhala po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu na obou polovinách vzorků. I zde byly vzorky zatěžovány kolmo na směr ukládání. Každá jednotlivá polovina byla vložena do lisu mezi dvě pevné ocelové plochy o rozměru 40x40 mm. Na rozdíl od předchozí zkoušky, kde byl vzorek zatěžován osamělou silou, zde byly vzorky zatěžovány celoplošně.

Při této zkoušce dochází k postupnému porušování vzorku, až dojde k úplnému rozpadu. Postupně se tvoří svislé tlakové trhliny, nejdříve v místě, kde končí zatěžovací plocha, poté postupně na celém vzorku. Maximální zatěžovací síly se dosáhne při úplném porušení vzorku. Vzorec pro výpočet tlakové pevnosti je následující:

$$R_c = \frac{F_c}{A}$$

Kde: R_c je pevnost v tlaku [MPa; N/mm²]
 F_c je maximální zatěžovací síla při porušení [N]
 A je průřezová plocha zkušebního tělesa [mm²]

(18)

Následující obrázky ukazují průběh zkoušky tlakové zkoušky pevnosti a postupné porušení celého vzorku.



Obr. 15: Zkouška v prostém tlaku

12. Výsledky měření

Výsledkem experimentální části jsou zjištěné pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu pro každou ze zkoušených příměsí. Naměřené pevnosti jsou uvedeny v následujících tabulkách a průběhy nárůstu pevností jsou zobrazeny na příslušných grafech.

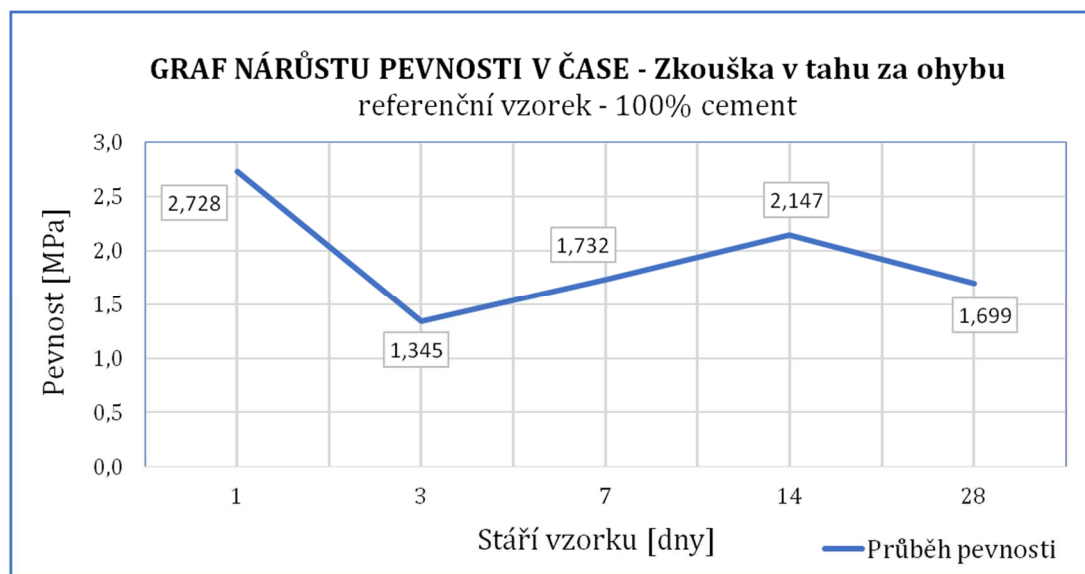
12.1 Výsledky referenčního vzorku

Aby bylo možné porovnat zjištěné pevnosti, byly vyrobeny a vyzkoušeny i cementové čili referenční vzorky (označovány CEM). Vzhledem k tomu, že jsou příměsí používány do vysokohodnotných betonů, mimo jiné vykazující vyšší tlakové pevnosti, měly by cementové vzorky oproti ostatním vykazovat nižší pevnosti po celou dobu vývoje pevnosti.

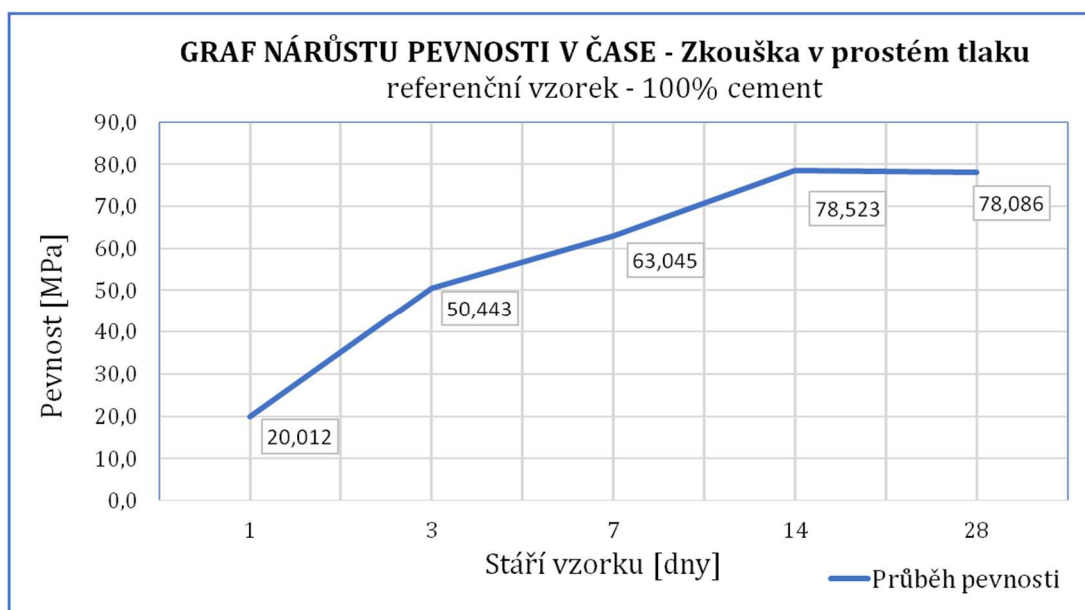
Tab. 8: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku referenčního vzorku

CEM - referenční vzorek (100% cement)					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	1	1,125	2,728	30,880	20,012
2					
3					
4	3	0,562	1,345	79,076	50,443
5					
6					
7	7	0,726	1,732	98,773	63,045
8					
9					
10	14	0,901	2,147	125,636	78,523
11					
12					
13	28	0,699	1,699	124,938	78,086
14					
15					

Následující grafy (Obr. 17, Obr. 18) zobrazují průběh vývinu pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku cementového vzorku.



Obr. 17: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahové pevnosti referenčního vzorku

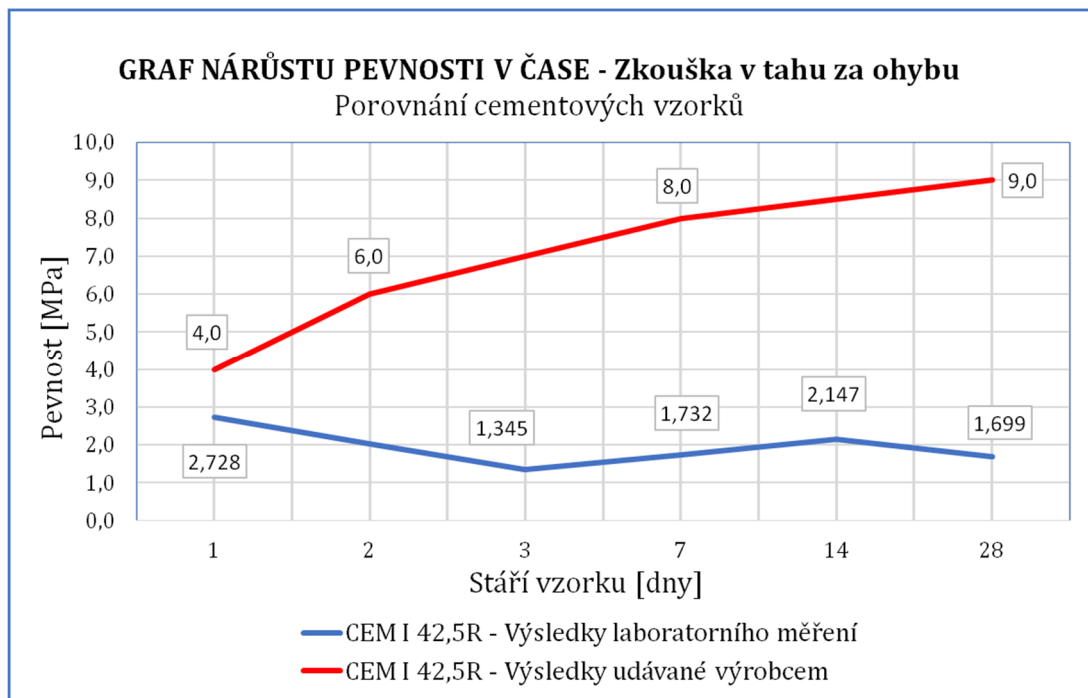


Obr. 18: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakové pevnosti referenčního vzorku

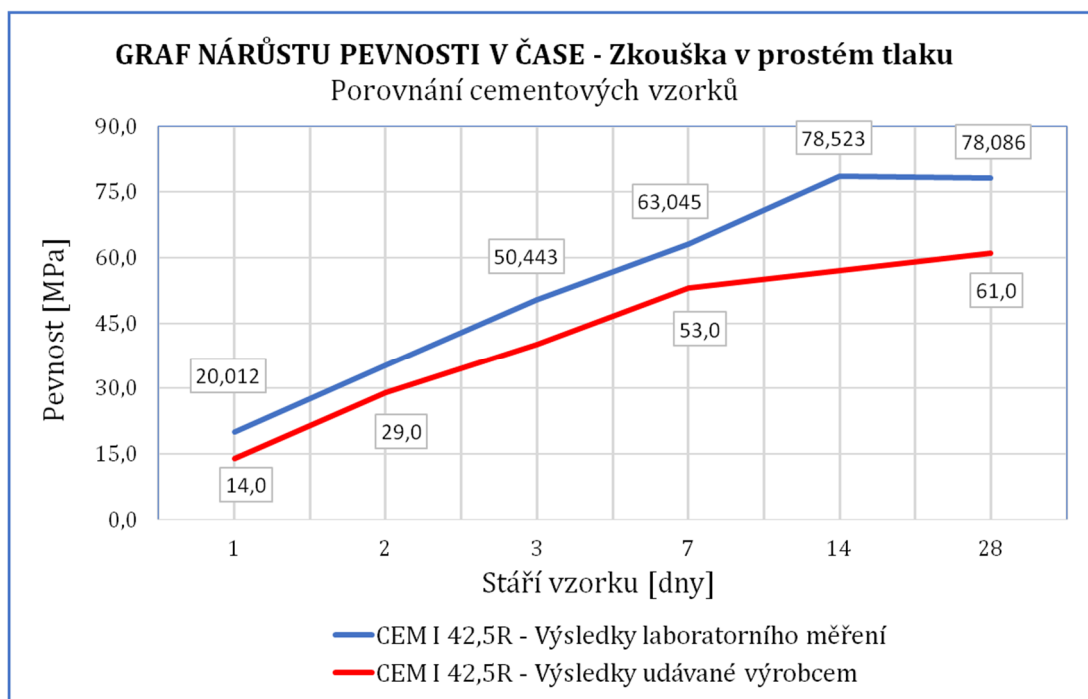
Tlakové pevnosti jsou dle předpokladu rostoucí a jsou splněny i normové požadavky na minimální tlakovou pevnost po 2 a 28 dnech. Výrobce portlandského cementu, který byl pro tento experiment použit, uvádí pevnosti taktéž rostoucí, ale hodnoty se liší (viz Obr. 20). (3), (19)

Naproti tomu výsledky pevnosti v tahu za ohybu se staly nečekaným překvapením. Jelikož se pevnost v tahu za ohybu matematicky odvozuje z tlakové pevnosti, byla mým předpokladem rostoucí pevnost u obou zkoušek.

Technický list výrobce cementu uvádí i tahové pevnosti rostoucí. Pro porovnání je níže uveden graf průběhu pevnosti mého referenčního vzorku a pevnosti uváděné výrobcem (Obr. 19). Obě zkoušky probíhaly v souladu s evropskou normou ČSN EN 196-1. (18), (19)



Obr. 19: Porovnání tahových pevností cementových vzorků



Obr. 20: Porovnání tlakových pevností cementových vzorků

12.2 Výsledky 1. série - 10% náhrada cementu

Následující tabulky uvádějí výsledky měření pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v prostém tlaku pro jednotlivé příměsi (označované MIC – Mikrosilika, POP – Popílek, MET – Metakaolin), kterými byl cement nahrazen z 10 %.

Tab. 9: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % mikrosilikou

MIC - 10% náhrada cementu mikrosilikou					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [kN]	Síla [kN]	Pevnost [kN]
1	1	1,085	2,629	29,900	19,251
2					
3					
4	3	0,480	1,190	66,058	43,347
5					
6					
7	7	0,528	1,311	95,857	62,899
8					
9					
10	16	0,301	0,733	105,311	68,552
11					
12					
13	28	0,331	0,797	117,035	75,154
14					
15					

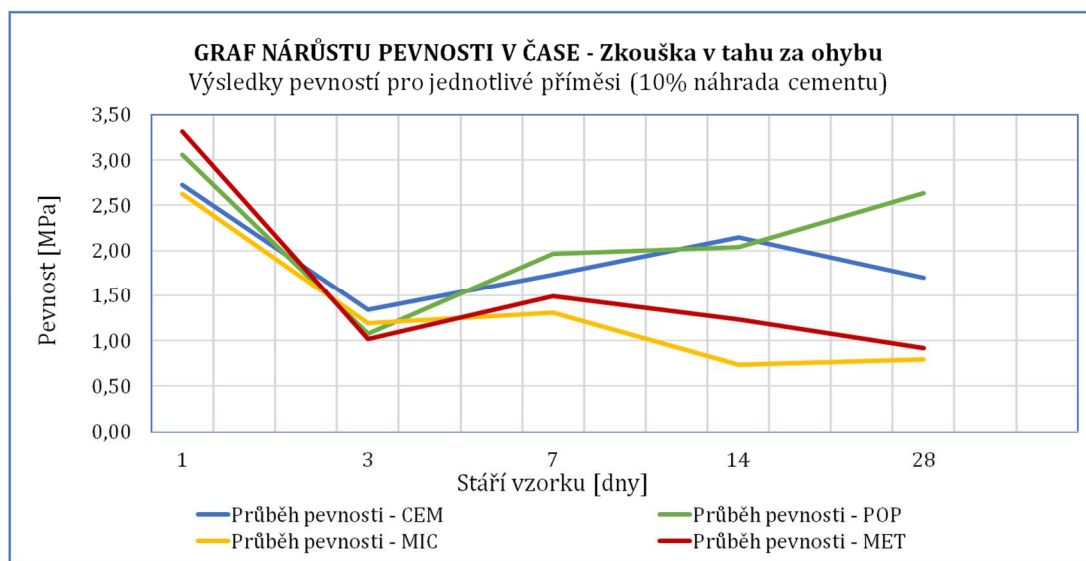
Tab. 10: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % popílkem

POP - 10% náhrada cementu popílkem					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	1	1,271	3,059	26,177	16,756
2					
3					
4	3	0,451	1,077	73,724	46,773
5					
6					
7	7	0,817	1,960	101,139	64,645
8					
9					
10	14	0,854	2,040	122,874	78,496
11					
12					
13	28	1,093	2,636	131,431	84,235
14					
15					

Tab. 11: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % metakaolinem

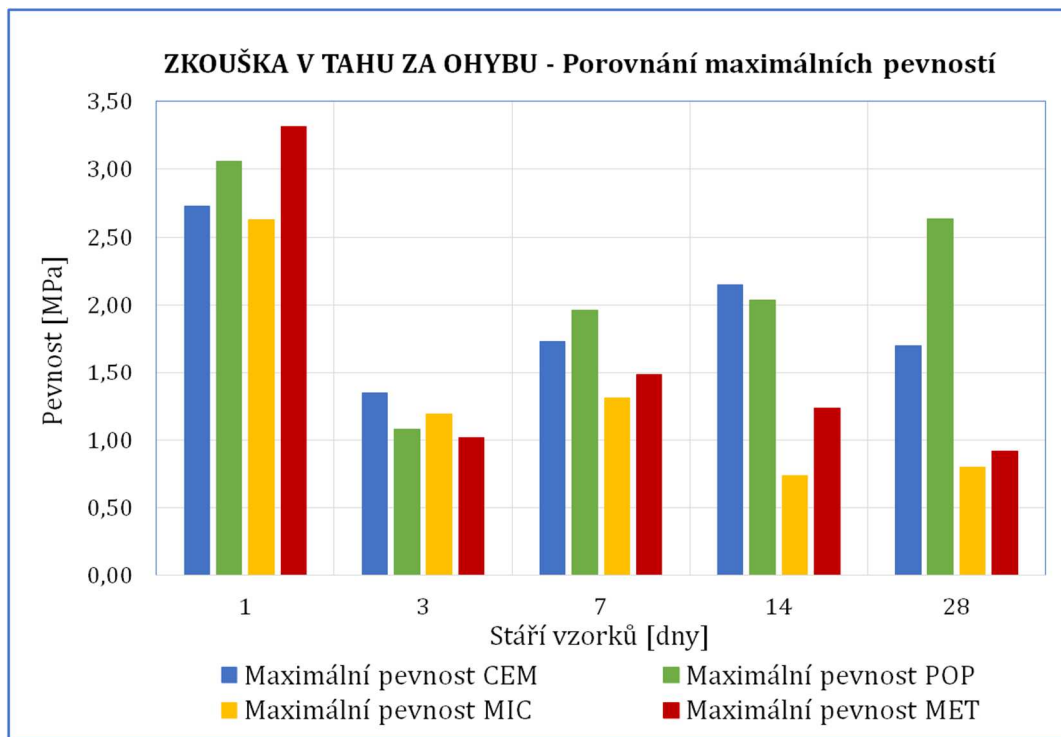
MET - 10% náhrada cementu metakaolinem					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [kN]	Síla [kN]	Pevnost [kN]
1	1	1,381	3,315	36,227	23,122
2					
3					
4	3	0,426	1,019	85,351	54,312
5					
6					
7	7	0,611	1,489	117,470	76,360
8					
9					
10	16	0,501	1,236	129,841	81,151
11					
12					
13	28	0,376	0,916	133,713	85,866
14					
15					

Obr. 21 graficky zobrazuje průběh nárůstu pevnosti v tahu za ohybu pro jednotlivé příměsi a pro porovnání je uveden i průběh referenčního vzorku.



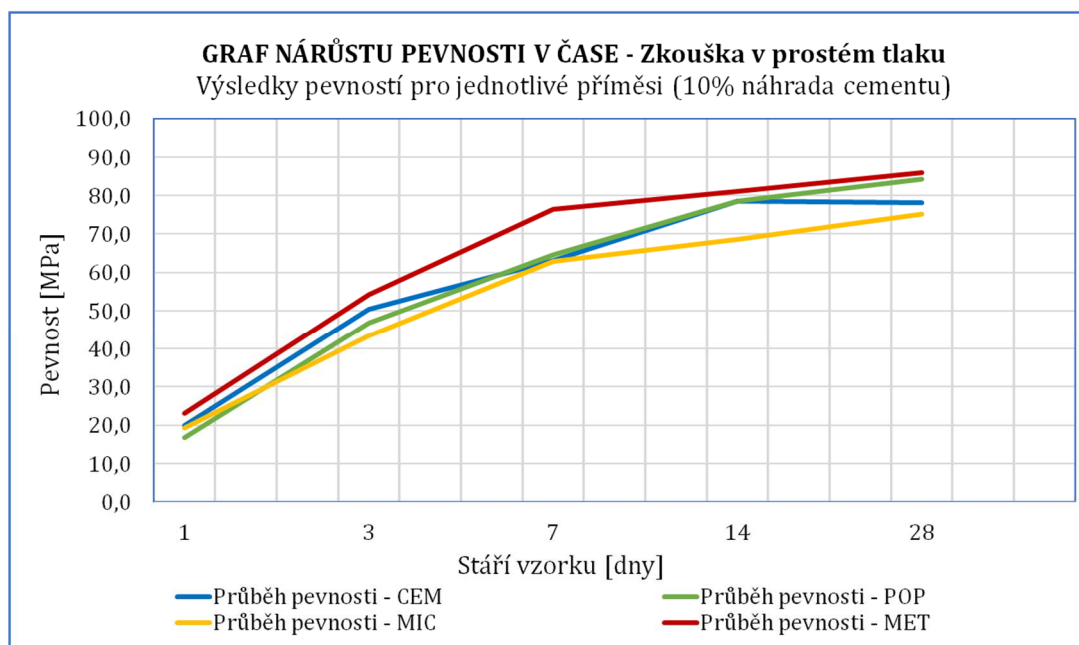
Obr. 21: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahových pevností jednotlivých příměsí (10 % náhrada cementu)

Obr. 22 porovnává maximální dosažené pevnosti v tahu za ohybu u použitých příměsí a referenčního vzorku.



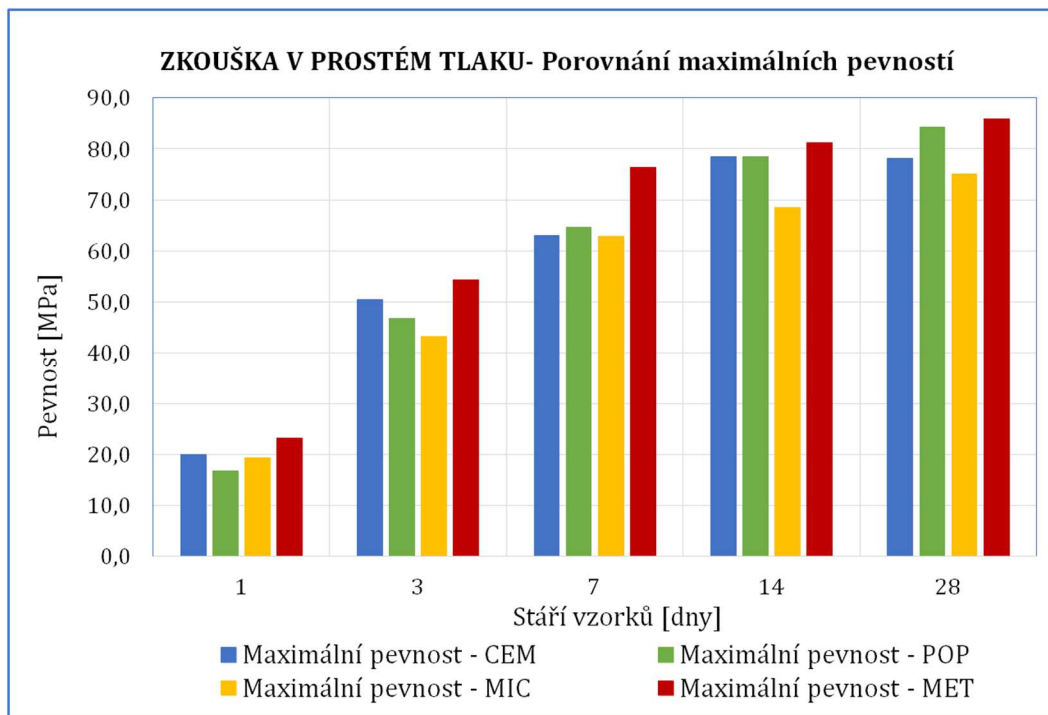
Obr. 22: Porovnání maximálních tahových pevností - 1.série vzorků

Obr. 23 zobrazuje průběh nárůstu pevnosti v prostém tlaku pro jednotlivé příměsí a pro porovnání je uveden i průběh referenčního vzorku.



Obr. 23: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakových pevností jednotlivých příměsí (10% náhrada cementu)

Následující graf porovnává maximální dosažené pevnosti v prostém tlaku u použitých příměsí a referenčního vzorku.



Obr. 24: Porovnání maximálních tlakových pevností - 1.série vzorků

12.3 Výsledky 2. série - 30% náhrada cementu

Níže uvedené tabulky ukazují výsledky měření pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v prostém tlaku pro jednotlivé příměsi (označované MIC – Mikrosilika, POP – Popílek, MET – Metakaolin), kterými byl tentokrát cement nahrazen ze 30 %.

Tab. 12: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % mikrosilikou

MIC - 30% náhrada cementu mikrosilikou					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	1	0,973	2,235	36,939	22,596
2					
3					
4	7	0,200	0,473	72,263	45,411
5					
6					
7	14	0,340	0,791	74,489	46,170
8					
9					
10	22	0,210	0,485	80,550	49,495
11					
12					
13	29	0,185	0,422	90,223	54,915
14					
15					

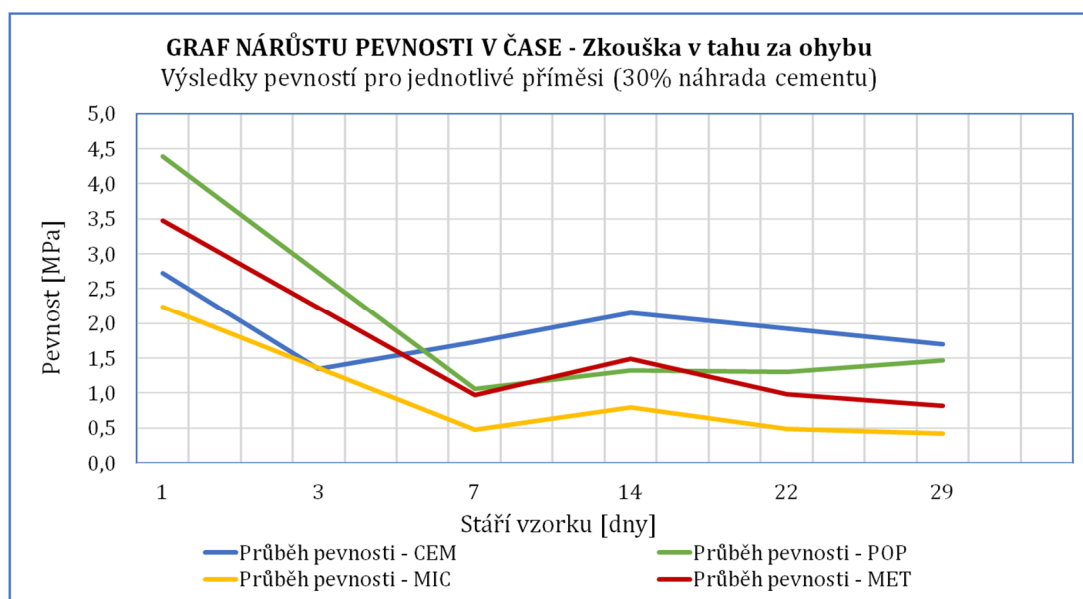
Tab. 13: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % popílkem

POP - 30% náhrada cementu popílkem					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	1	1,872	4,396	53,239	33,454
2					
3					
4	7	0,441	1,065	106,067	68,004
5					
6					
7	14	0,553	1,322	110,664	70,555
8					
9					
10	22	0,548	1,307	109,920	69,966
11					
12					
13	29	0,606	1,473	116,708	75,647
14					
15					

Tab. 14: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % metakaolinem

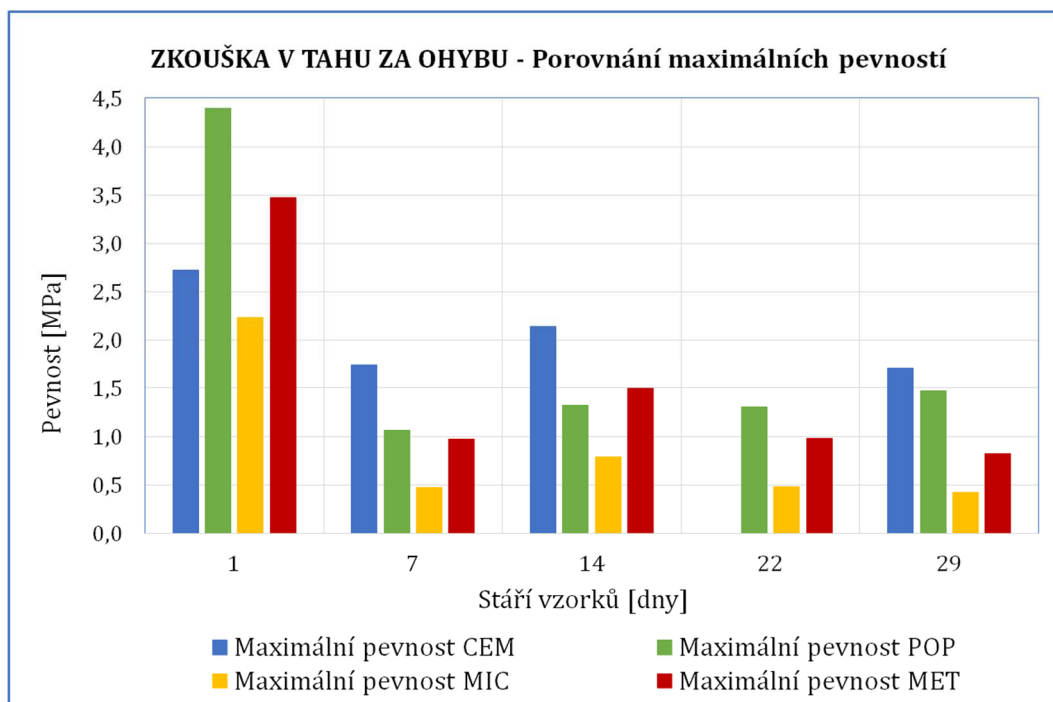
MET - 30% náhrada cementu metakaolinem					
Číslo vzorku	Stáří vzorků [dny]	Zkouška v tahu ohybem		Zkouška v prostém tlaku	
		Síla [kN]	Pevnost [MPa]	Síla [kN]	Pevnost [MPa]
1	1	1,485	3,475	47,450	29,595
2					
3					
4					
5	7	0,400	0,969	110,407	71,207
6					
7					
8	14	0,633	1,491	120,448	75,407
9					
10					
11	22	0,418	0,982	107,131	67,207
12					
13					
14	29	0,343	0,822	117,047	74,814
15					

Obr. 25 graficky znázorňuje průběh nárůstu pevnosti v tahu za ohybu pro jednotlivé příměsi a pro porovnání je uveden i průběh referenčního vzorku.



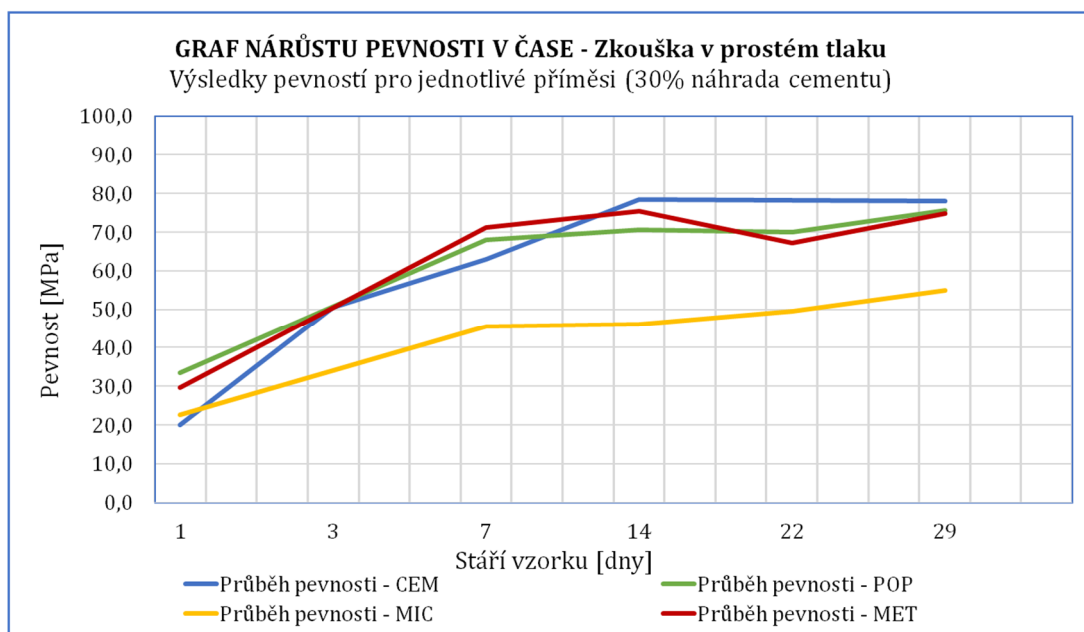
Obr. 25: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahových pevností jednotlivých příměsí (30 % náhrada cementu)

Obr. 26 porovnává maximální dosažené pevnosti v tahu za ohybu u použitých příměsí a referenčního vzorku, tentokrát s 30% náhradou cementu.



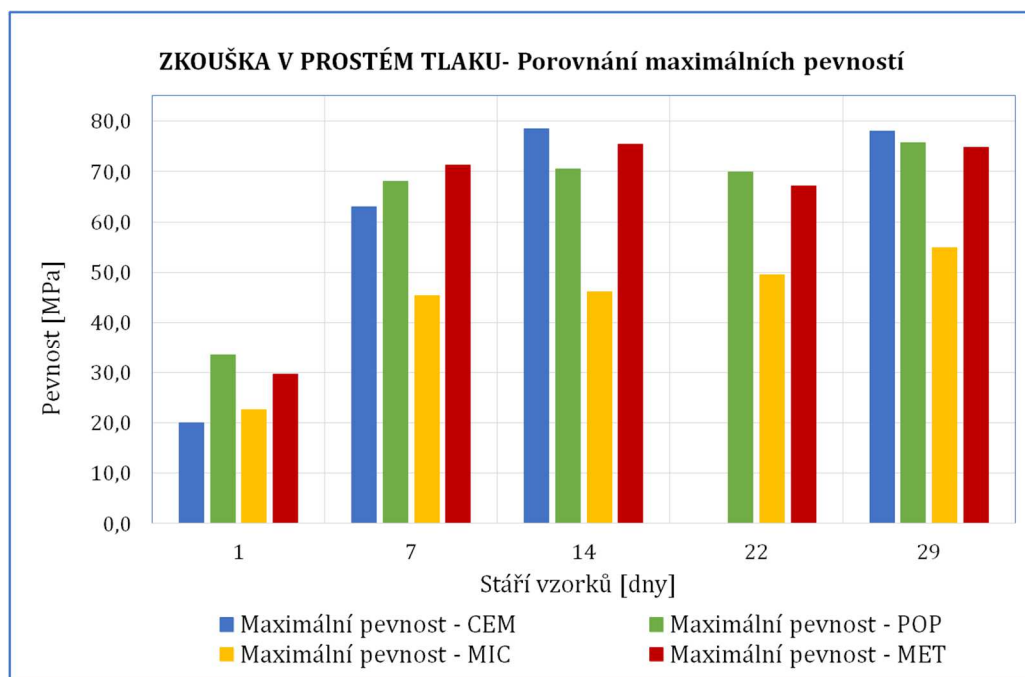
Obr. 26: Porovnání maximálních tahových pevností - 2.série vzorků

Níže uvedený graf zobrazuje průběh nárůstu pevnosti v prostém tlaku pro jednotlivé příměsí, taktéž nahrazující cement ze 30 %, a pro porovnání je uveden i průběh referenčního vzorku.



Obr. 27: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakových pevností jednotlivých příměsí (30 % náhrada cementu)

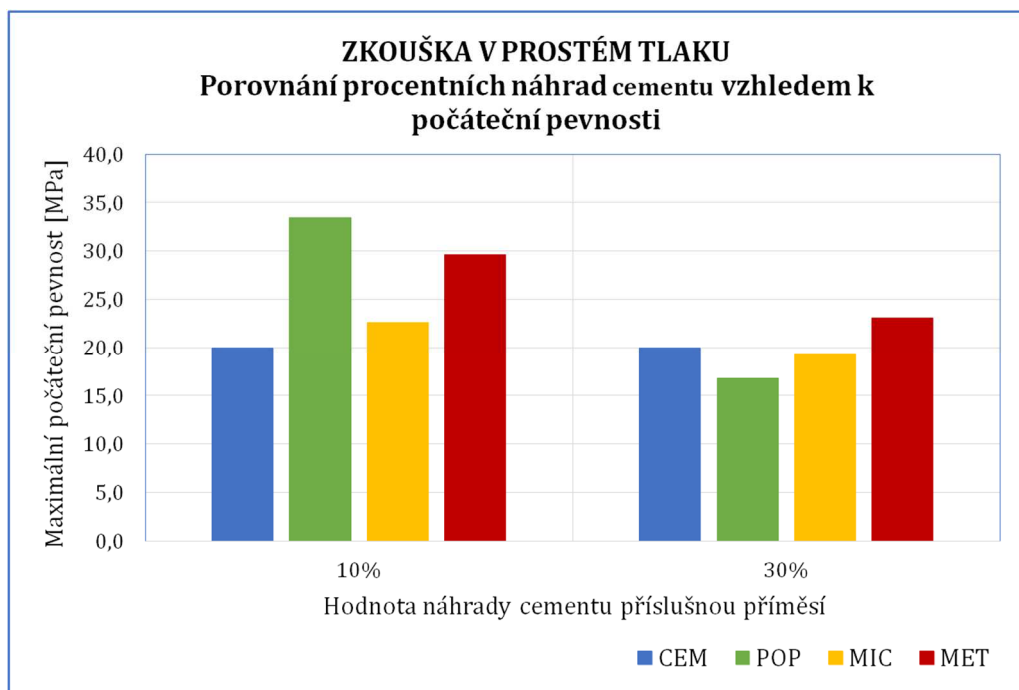
Následující graf porovnává maximální dosažené pevnosti v prostém tlaku u použitých příměsí nahrazující cement ze 30 % a referenčního vzorku.



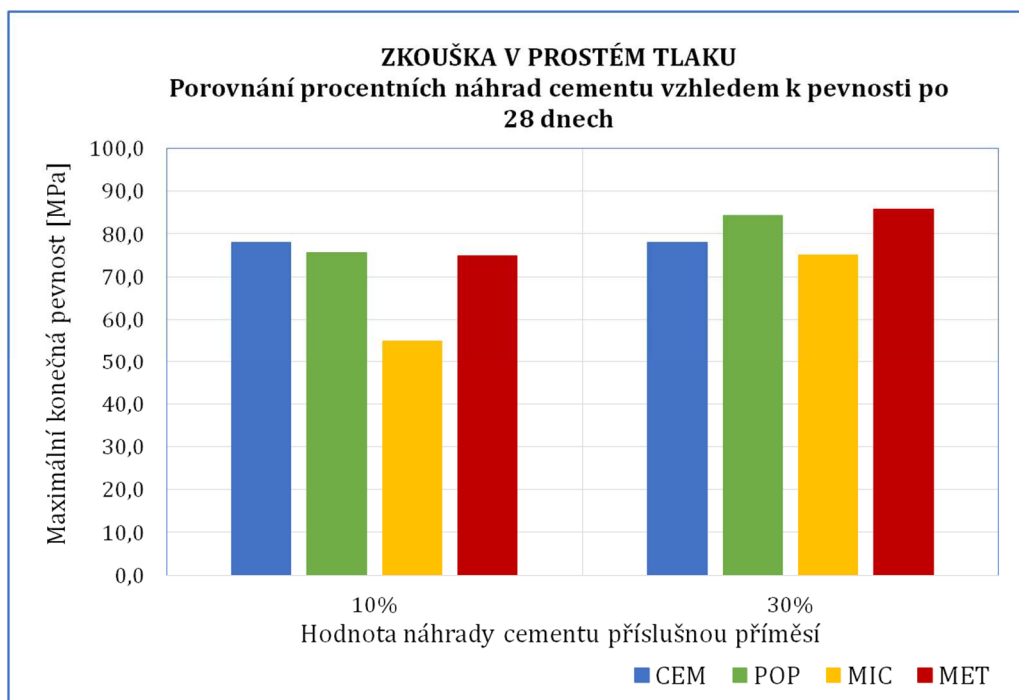
Obr. 28: Porovnání maximálních tlakových pevností - 2.série vzorků

12.4 Porovnání tlakových pevností 1. a 2. série

Pro porovnání procentních náhrad cementu jsou níže uvedeny grafy, ze kterých je patrné, která příměs a při jakém objemu dosahuje nejvyšších pevností počátečních (po 24 hodinách) a konečných (28 den) tlakových pevností.



Obr. 29: Porovnání maximálních počátečních tlakových pevností



Obr. 30: Porovnání maximálních konečných tlakových pevností

13. Zhodnocení výsledků

13.1 Pevnost v tahu za ohybu

- **Průběh:**

U všech příměsí a obou sérií vzorků došlo k neočekávanému průběhu nárůstu pevnosti. Pevnosti v jednotlivých dnech měření mají velice proměnlivý charakter. U všech vzorků bylo v prvním dni měření dosaženo pevnosti mezi 2 - 4,5 MPa, což jsou docela uspokojivé hodnoty. Ve třetím (u druhé série v sedmém) dni ale dochází k hlubokému poklesu a z předchozích, relativně vysokých, pevností se dostáváme na hodnoty 0,4 - 1,5 MPa. V dalším průběhu se rostoucí a klesající pevnosti stále střídají, u druhé série vzorků převažují ty klesající. Konečné pevnosti (po 28 dnech) se pohybují v rozmezí 0,4 - 2,75 MPa.

Žádný vzorek se zkoumanými příměsmi, ani čistě cementový, nedosáhl po 28 dnech své počáteční pevnosti. Referenční vzorek nedosáhl ani na pevnosti, které uvádí výrobce použitého cementu ve svém technickém listě.

Ale i přes překvapivé výsledky můžeme říci, která z použitých příměsí vykazuje maximální počáteční a konečné pevnosti.

- **Maximální pevnosti v 1.sérii:**

Při 10 % náhradě cementu dosáhl maximální počáteční pevnosti vzorek s metakaolinem (3,3 MPa) a maximální konečné pevnosti vzorek s popínkem (2,6 MPa).

- **Maximální pevnosti ve 2.sérii:**

Při náhradě cementu ze 30 % dosáhl maximální počáteční i konečné pevnosti vzorek s popínkem – počáteční pevnost 4,4 MPa a konečná 1,5 MPa.

13.2 Pevnost v prostém tlaku

- **Průběh:**

Nárůst tlakové pevnosti splnil očekávání a je, až na výjimky ve 2.sérii, trvale rostoucí. Počáteční pevnosti se pohybují v rozmezí 15–35 MPa a pevnosti po 28 dnech v rozmezí 54–86 MPa. U popínku a metakaolinu použitého ze 30 % objemu cementu došlo ve 22 dni měření k mírnému poklesu tlakové pevnosti, ale konečná pevnost ještě vzrostla.

Jelikož jsou zkoušené příměsi dnes běžně používány do vysokohodnotných betonů, bylo mým předpokladem dosažení vyšších pevností oproti pevnostem referenčního vzorku v každém dni měření. To se ovšem nepotvrdilo. Například křemičitý úlet se ukázal jako příměs absolutně nezvyšující tlakovou pevnost.

- **Maximální pevnosti v 1.sérii:**

Při 10 % náhradě cementu dosáhl nejlepších výsledků vzorek s metakaolinem. Maximální počáteční pevnosti byla 23,1 MPa a maximální konečná pevnost 85,9 MPa. Vzorek s metakaolinem dosahoval nejvyšších pevností po celou dobu vývoje pevnosti.

- **Maximální pevnosti ve 2.sérii:**

Při náhradě cementu ze 30 % dosáhl maximální počáteční i konečné pevnosti opět vzorek s popílkem. Počáteční pevnost byla 33,5 MPa a konečná 75,7 MPa.

13.3 Počáteční tlaková pevnost

Z experimentu vyplývá, že pokud chceme dosáhnout maximální počáteční pevnosti betonu, například z technologického hlediska, je nejvhodnější příměsí elektrárenský popílek, přidaný do betonu jako 10 % náhrada objemu cementu. Další vhodnou příměsí je metakaolin, taktéž o objemu 10 % z objemu cementu. Křemičitý úlet (mikrosilika) se vhodným nejeví. Při použití jako 10 % náhrada cementu vykazuje jen nepatrně vyšší pevnost než referenční vzorek a při použití ze 30 % vykazuje pevnost dokonce nižší.

13.4 Konečná (28denní) tlaková pevnost

V případě, že se požaduje dosažení maximální konečné pevnosti, je dle mého zkoušení nejvhodnější příměsí metakaolin jako 30 % náhrada cementu. Na druhém místě je pak 30 % náhrada cementu elektrárenským popílkem. Pokud je cement možné nahradit pouze v 10 %, jeví se nejlépe popílek a po něm metakaolin. I zde se mikrosilika ukázala jako nejméně vhodnou příměsí, ať už by s ní byl cement nahrazen z 10 nebo 30 %.

ZÁVĚR

Bakalářská práce se zabývala vyhodnocením nevhodnější příměsi z hlediska mechanických vlastností betonu. V dnešní době, kdy jsou kladeny stále vyšší požadavky na betonové konstrukce, jsou právě příměsi jednou z variant, jak vyrábět konstrukce z vysokohodnotných betonů. Jejich velkou výhodou je vysoká pevnost v tlaku a dlouhá trvanlivost. Z jistého hlediska mohou mít příměsi pozitivní vliv také na finanční stránku věci a na snížení emisí oxidu uhličitého, který vzniká při výrobě tolik potřebného cementu.

V teoretické části jsou především představeny všechny možné faktory, které by mohly ovlivnit výslednou tlakovou pevnost betonu. Pevnost totiž neovlivňuje pouze složení čerstvého betonu nebo přidané příměsi, ale celá řada činitelů. Nárůst pevnosti může být ovlivňován během celého procesu. Mimo vliv složení betonu, je zde ovlivňujícím faktorem také množství přidané vody, které úzce souvisí s hydratací cementu. Dále je zde způsob a doba hutnění směsi, s tím související pórovitost a v neposlední řadě ošetřování betonu během procesu tuhnutí a tvrdnutí.

Úkolem experimentální části bylo ověřit, jaká z použitých příměsí má největší vliv na nárůst tlakové pevnosti. Laboratorními zkouškami bylo dosaženo několika překvapivých výsledků. Prvním, naprosto nečekaným, výsledkem se stal průběh nárůstu pevnosti v tahu za ohybu. Jednotlivé pevnosti, které měly mít dle předpokladu rostoucí charakter, se ukázaly být velmi proměnlivé, dalo by se říci dokonce klesající. Všechny možné faktory, které by tento průběh mohly zapříčinit, byly v průběhu experimentu odstraněny, nicméně se situace nezměnila. Jediným možným vysvětlením se tak stal nevhodný způsob zkoušení pevnosti. Zkoušky probíhaly při tříbodovém uspořádání, kdy je vzorek zatěžován jednou silou uprostřed. Je možné, že kdyby se pevnosti měřily při čtyřbodovém uspořádání zkoušky, tj. dvě pevné válcové podpory a dvě zatěžovací síly vnášené do prvku pomocí kyvných válečků, byly by výsledky jiné.

Druhým, taktéž nečekaným, výsledkem se staly tlakové pevnosti křemičitých úletů. Tato příměs se do vysokohodnotných betonů přidává mimo jiné pro dosažení vyšší pevnosti. Můj experiment ovšem ukázal, že vzorky s křemičitým úletem, prakticky ani jedenkrát, nedosáhly na pevnost čistě cementových vzorků.

Nejvhodnějšími příměsmi se tak staly metakaolin a létavý popílek. Nejvyšší počáteční pevnosti dosáhl vzorek, kde bylo 10 % objemu cementu nahrazeno elektrárenským popílkem a nejvyšší 28denní pevnosti dosáhl vzorek, kde byl cement nahrazen metakaolinem ze 30 %.

CITOVANÁ LITERATURA

1. **Pytlík, Petr.** *Technologie betonu*. Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1997. ISBN 80-214-0779-4.
2. **ČSN EN 206-1+A1.** *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha : ÚNMZ, 2018.
3. **ČSN EN 197-1 ed.2.** *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementu pro obecné použití*. Praha : ÚNMZ, 2012.
4. **Harmáček, Josef.** *Stavební pojiva*. Praha : Státní nakladatelství technické literatury, 1961.
5. **ČSN EN 1008.** *Záměsová voda do betonu - Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárně, jako záměsové vody do betonu*. Praha : ÚNMZ, 2003.
6. **Aïtcin, Pierre-Claude.** *Vysokohodnotný beton*. Praha : Informační centrum ČKAIT, 2005. ISBN 80-86769-39-9.
7. **Veselý, Vladimír.** *Přísady a příměsi. Beton*. Technologie a materiály, 2015, Sv. 2/2015.
8. **Collepari, Mario.** *Moderní beton*. Praha : Informační centrum ČKAIT, s.r.o., 2009. ISBN 978-80-87093-75-7.
9. **Dimov, Dimitar.** Featured News: Scientists create innovative new 'green' concrete using graphene. *University of Exeter*. [Online] 23. April 2018. [Citace: 27. Duben 2018.]
https://www.exeter.ac.uk/news/featurednews/title_654766_en.html.
10. **Neville, Adam M.** *Properties of Concrete*. London : autor neznámý, 2011. ISBN 978-0-273-75580-7.
11. **Ebeton.** Slovník pojmů: Cement. *ebeton.cz*. [Online] [Citace: 26. Duben 2018.]
<http://www.ebeton.cz/pojmy/cement>.
12. **Institut geologického inženýrství.** Anorganická pojiva. *Katedra stavebních hmot a hornického stavitelství*. [Online] Fakulta stavební, Vysoká škola báňská, Ostrava. [Citace: 15. Duben 2018.]
http://geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/anorganicka_pojiva.html.
13. **Horský, Marek, Lusová, Ivana a Briatka, Peter.** Činitele ovlivňující rychlost nárůstu pevnosti betonu I. *ABS-portal.cz; Odborný stavební portál*. [Online] 8. Srpen 2013. [Citace: 21. Duben 2018.]
<https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/beton/cinitele-ovlivnujici-rychlost-narustu-pevnosti-betonu-i>.

14. **Máca, Petr.** *Concrete containing metakaolin admixture.* Praha : České vysoké učení technické v Praze, 2010. ISBN 978-3-659-55581-7.
15. *Metakaolin 2011.* **Konvalinka, Petr, a další.** Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2011. ISBN 978-80-214-4256-6.
16. **Sedlecky-kaolin.cz.** Výrobky a služby - Kaolin Sedlec Ia. *Sedlecky-kaolin.cz.* [Online] 2008. [Citace: 5. Květen 2018.] <http://www.sedlecky-kaolin.cz/cz/vyrobky-a-sluzby/kaolin-sedlec-ia.htm>.
17. **České lupkové závody, a.s.,** Metakaolin - Obecné informace. *České lupkové závody, a.s.* [Online] 2006-2018. [Citace: 4. Květen 2018.] <http://www.cluz.cz/cz/metakaoliny-obecne-informace>.
18. **ČSN EN 196-1.** *Metody zkoušení cementu - Část 1: Stanovení pevnosti.* Praha : ÚNMZ, 2016.
19. **Českomoravský cement.** Produkty - Balený portlandský cement CEM I 42,5R. *Českomoravský cement.* [Online] Heidelberg Cement Group. [Citace: 10. Květen 2018.] <https://www.heidelbergcement.cz/cs/cement/baleny-cement/cemi425r>.

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1: Vliv třídy pevnosti cementu na pevnost betonu v závislosti na vodním součiniteli (w/c)</i>	17
<i>Obr. 2: Vliv pórovitosti kameniva na pevnost v tlaku</i>	18
<i>Obr. 3: Vliv teploty na vývoj pevnosti</i>	19
<i>Obr. 4: Vliv doby vibrace na pevnost v tlaku betonů s třídou konzistence S1 a S5</i>	21
<i>Obr. 5: Vliv ošetřování na vývoj pevnosti</i>	22
<i>Obr. 6: Rozdělení cementů dle ČSN EN 197-1</i>	25
<i>Obr. 7: Maximální tlakové pevnosti pro různé třídy cementu dle ČSN EN 197-1</i>	26
<i>Obr. 8: Použité příměsi; a. - Křemičitý úlet, b. - Popílek, c. - Metakaolin</i>	37
<i>Obr. 9: Ocelová forma na výrobu zkušebních vzorků</i>	40
<i>Obr. 10: Navážka cementu CEM I 42,5R</i>	41
<i>Obr. 11: Automatická míchačka MATEST</i>	42
<i>Obr. 12: Uložení zhutněných vzorků</i>	42
<i>Obr. 13: Hotové zkušební vzorky</i>	42
<i>Obr. 14: Zkouška v tahu za ohybu</i>	44
<i>Obr. 15: Zkouška v prostém tlaku</i>	45
<i>Obr. 16: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahové pevnosti referenčního vzorku</i>	47
<i>Obr. 17: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakové pevnosti referenčního vzorku</i>	47
<i>Obr. 18: Porovnání tahových pevností cementových vzorků</i>	48
<i>Obr. 19: Porovnání tlakových pevností cementových vzorků</i>	48
<i>Obr. 20: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahových pevností jednotlivých příměsí (10% náhrada cementu)</i>	50
<i>Obr. 21: Porovnání maximálních tahových pevností - 1.série vzorků</i>	51
<i>Obr. 22: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakových pevností jednotlivých příměsí (10% náhrada cementu)</i>	51
<i>Obr. 23: Porovnání maximálních tlakových pevností - 1.série vzorků</i>	52
<i>Obr. 24: Grafické znázornění průběhu nárůstu tahových pevností jednotlivých příměsí (30% náhrada cementu)</i>	54
<i>Obr. 25: Porovnání maximálních tahových pevností - 2.série vzorků</i>	55

<i>Obr. 26: Grafické znázornění průběhu nárůstu tlakových pevností jednotlivých příměsí (30% náhrada cementu)</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 27: Porovnání maximálních tlakových pevností - 2.série vzorků</i>	<i>55</i>
<i>Obr. 28: Porovnání maximálních počátečních tlakových pevností</i>	<i>57</i>
<i>Obr. 29: Porovnání maximálních konečných tlakových pevností</i>	<i>57</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1: Složení směsi cementových vzorků</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 2: Složení směsi vzorků s křemičitým úletem (10% náhrada cementu)</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 3: Složení směsi vzorků s elektrárenským popílkem (10% náhrada cementu)</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 4: Složení směsi vzorků s metakaolinem (10% náhrada cementu)</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 5: Složení směsi vzorků s křemičitým úletem (30% náhrada cementu)</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 6: Složení směsi vzorků s elektrárenským popílkem (30% náhrada cementu)</i>	<i>39</i>
<i>Tab. 7: Složení směsi vzorků s metakaolinem (30% náhrada cementu)</i>	<i>40</i>
<i>Tab. 8: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku referenčního vzorku</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 9: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % mikrosilikou</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 10: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % popílkem</i>	<i>49</i>
<i>Tab. 11: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 10 % metakaolinem</i>	<i>50</i>
<i>Tab. 12: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % mikrosilikou</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 13: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % popílkem</i>	<i>53</i>
<i>Tab. 14: Výsledky pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku vzorku s 30 % metakaolinem</i>	<i>54</i>

