



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

# MOŽNOSTI STANOVENÍ K-HODNOTY A INDEXU ÚČINNOSTI PRO AKTIVNÍ PŘÍMĚSI A JEJICH POSOUZENÍ A STANOVENÍ PRO BETONY

POSSIBILITIES OF DETERMINING THE K-VALUE AND EFFICIENCY INDEX FOR ACTIVE  
ADMIXTURES AND THEIR ASSESSMENT AND DETERMINATION FOR CONCRETES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Šperling

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. ADAM HUBÁČEK, Ph.D.

BRNO 2021



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	NPC-SIM Stavební inženýrství – stavební materiály a technologie
<b>Typ studijního programu</b>	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
<b>Specializace</b>	bez specializace
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Bc. Petr Šperling
<b>Název</b>	Možnosti stanovení k-hodnoty a indexu účinnosti pro aktivní příměsi a jejich posouzení a stanovení pro betony
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. Adam Hubáček, Ph.D.
<b>Datum zadání</b>	31. 3. 2021
<b>Datum odevzdání</b>	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA,  
dr.h.c.  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.  
Děkan Fakulty stavební VUT

## PODKLADY A LITERATURA

- Časopis Beton TKS
- ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda
- ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace
- Sborníky z českých a mezinárodních konferencí
- Časopis Stavebnictví
- Internetové zdroje, např. databáze SCOPUS

## ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Cílem Diplomové práce bude shrnutí poznatků o možnostech stanovení k-hodnoty a indexu účinnosti aktivních příměsí do betonu, zejména elektrárenského popílku a jemně mleté vysokopecní strusky.

V současnosti jsou pro tyto příměsi hodnoty K-koncepce uvedeny v normě ČSN EN 206+A1, tyto hodnoty jsou však dosti obecné a zcela nezohledňují reálné parametry těchto materiálů.

Základní body diplomové práce budou následující:

- Popis a shrnutí dosavadních poznatků o stanovení K-hodnoty a indexu účinnosti pro popílek a strusku,
- studium zásad koncepce ekvivalentních vlastností betonu (ECPC) a koncepce ekvivalentních kombinací (EPCC),
- posouzení vlivu různých typů cementu na K-hodnotu a index účinnosti příměsí.

Experimentální část práce se bude zabývat studiem vlastností betonů, u kterých byla při výrobě použita různá dávka aktivní příměsí. Bude provedeno posouzení k-hodnoty a indexu účinnosti pro betony s elektrárenským popílkem, jemně mletou struskou, případně dalšími příměsemi. Tyto parametry budou ověřeny nejdříve na cementových trámečcích s těmito příměsemi a následně na navržených recepturách betonu.

Sledovány budou vlastnosti čerstvého betonu a zejména pevnostní charakteristiky cementových malt a betonů až do stáří 90 dní.

Jednotlivé receptury betonu budou modifikovány zejména poměrem dávky cementu a příměsí a dále také použitím různých hodnot vodního součinitele. Na těchto recepturách betonů bude sledována jejich zpracovatelnost v čerstvém stavu a vývin pevnosti betonu, s částečnou náhradou cementu příměsí, v čase.

Závěrem bude vyhodnocena k-hodnota a indexy účinnosti těchto sledovaných příměsí a jejich vliv na vlastnosti betonu. Na základě zjištěných hodnot budou navrženy matematické modely pro výpočet receptur betonů, kde je část cementu nahrazena aktivní příměsí.

Rozsah práce cca 80 stran.

## STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá možnostmi stanovení tzv.  $k$ -hodnoty a indexu účinnosti pro aktivní příměsi. Cílem práce bylo shrnout možnosti stanovení těchto parametrů a následně stanovit tyto parametry pro elektrárenský popílek, jemně mletou granulovanou vysokopecní strusku a mikromletý vápenec. Vyhodnocení proběhlo na základě výsledků zkoušek malt a betonů s různými náhradami cementu aktivní příměsí. Na základě dosažených výsledků byla sestavena matematická funkce popisující pevnost v tlaku v závislosti na čase a množství příměsi, která umožňuje pro dané příměsi predikci pevností v tlaku pro cementové malty a betony. Díky této funkci je dále možné predikovat pro tyto příměsi indexy účinnosti a také zde byla popsána možnost použití této funkce pro stanovení  $k$ -hodnoty.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

beton, aktivní příměs, index účinnosti, koncepce  $k$ -hodnoty, koncepce ekvivalentních vlastností betonu, koncepce ekvivalentních kombinací

## **ABSTRACT**

This diploma thesis deals with possibilities of determining the so called  $k$ -value and activity index for active additions. The aim of the work is to summarize the possibilities of determining these parameters and then determine these parameters for fly ash, ground granulated blast furnace slag and micronized limestone. The evaluation was based on the results of tests on mortars and concretes with various cement substitutes of active additions. Based on the results, a mathematical function describing the compressive strength as a function of time and the amount of addition was compiled, which allows the prediction of compressive strengths for cement mortars and concretes for the given additions. Thanks to this function, it is also possible to predict efficiency indices for these additions, and the possibility of using this function to determine the  $k$ -value is also studied here.

## **KEYWORDS**

concrete, active addition, activity index,  $k$ -value concept, equivalent concrete performance concept, equivalent performance of combinations concept

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Petr Šperling *Možnosti stanovení k-hodnoty a indexu účinnosti pro aktivní příměsi a jejich posouzení a stanovení pro betony*. Brno, 2021. 119 s., 0 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Možnosti stanovení k-hodnoty a indexu účinnosti pro aktivní příměsi a jejich posouzení a stanovení pro betony* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 27. 12. 2021

---

Bc. Petr Šperling

autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Možnosti stanovení k-hodnoty a indexu účinnosti pro aktivní příměsi a jejich posouzení a stanovení pro betony* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 27. 12. 2021

---

Bc. Petr Šperling

autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Adamu Hubáčkovi, Ph.D. za odborné vedení práce, za trpělivost a cenné rady při vypracování této práce. Dále panu prof. Ing. Rudolfu Helovi CSc. za odborné konzultace při řešení experimentální části práce. Dále také pracovníkům výzkumného centra AdMaS a ÚTHD FAST VUT Brno za pomoc při zkoušení vzorků. Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům, kteří mě při psaní práce podporovali.

# Obsah

Úvod .....	11
Cíle práce .....	12
Teoretická část .....	13
1. Příměsí do betonu.....	13
1.1. Aktivní příměsí.....	13
1.2. Vliv aktivních příměsí na ekologii .....	15
2. Popílek do betonu.....	17
2.1. Vznik elektrárenského popílku .....	17
2.2. Vlastnosti elektrárenských popílků.....	19
2.3. Vliv popílku na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu .....	21
3. Vysokopecní struska.....	22
3.1. Vznik vysokopecní strusky.....	22
3.2. Vlastnosti jemně mleté, granulované vysokopecní strusky.....	23
3.3. Vliv jemně mleté, granulované vysokopecní strusky na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.....	23
4. Jemně mletý vápenec.....	24
4.1. Mechanismy působení jemně mletého vápence v betonu.....	24
4.2. Vlastnosti betonu s obsahem mletého vápence .....	26
5. Index účinnosti.....	27
6. Koncepce ekvivalentních vlastností betonu.....	28
6.1. Nizozemská metoda .....	28
6.2. Belgická metoda .....	31
7. Koncepce ekvivalentních kombinací .....	32
7.1. Britská metoda.....	32
7.2. Irská metoda.....	33
7.3. Portugalská metoda.....	34
8. Koncepce <i>k</i> -hodnoty .....	36
8.1. Princip koncepce <i>k</i> -hodnoty .....	36



8.2.	Metoda stanovení $k$ -hodnoty.....	37
	Experimentální část .....	40
9.	Metodika experimentální části práce a prováděné zkoušky .....	40
9.1.	Zkoušky vstupních surovin.....	41
9.2.	Postup výroby a zkoušení malt.....	41
9.3.	Postup výroby a zkoušení reologie cementových kaší .....	42
9.4.	Postup výroby a zkoušení betonů.....	42
10.	Popis a vlastnosti vstupních surovin.....	42
10.1.	Cement .....	42
10.2.	Příměsi.....	43
10.3.	Kamenivo.....	45
10.4.	Voda .....	49
10.5.	Plastifikační přísada .....	49
11.	Postupy provedených zkoušek.....	49
11.1.	Zkoušky provedené na čerstvých maltách.....	49
11.2.	Zkoušky provedené na zatvrdlých maltách.....	50
11.3.	Zkoušení reologických vlastností cementových kaší .....	51
11.4.	Zkoušky provedené na čerstvém betonu.....	52
11.5.	Zkoušky provedené na ztvrdlém betonu.....	53
12.	Složení receptur malt a betonů.....	54
13.	Výsledky a vyhodnocení zkoušek.....	57
13.1.	Výsledky zkoušek čerstvých a zatvrdlých malt .....	57
13.2.	Reologické vlastnosti.....	75
13.3.	Výsledky zkoušek čerstvých a ztvrdlých betonů .....	79
14.	Diskuse výsledků .....	101
	Závěr .....	106
	Seznam tabulek.....	109
	Seznam grafů .....	111
	Seznam obrázků.....	113

Seznam použité literatury .....	114
---------------------------------	-----

## Úvod

Beton, jako jeden z nejvíce používaných stavebních materiálů, má vysoký dopad jak na cenu konstrukcí, tak i na vliv konstrukce na životní prostředí. Nejdražší vstupní surovinou pro výrobu betonu je cement. Při výrobě cementu vzniká velké množství skleníkových plynů, zejména CO<sub>2</sub>. Přibližně se jedná o 0,82 tuny CO<sub>2</sub> na jednu tunu portlandského slínku. Z výše uvedených důvodů lze usoudit, že snížení množství cementu v betonu vede ke snížení nákladů na jeho výrobu a snížení uhlíkové stopy betonu. Z toho důvodu se cement nahrazuje tzv. aktivními příměsemi, které mohou částečně cement nahradit a nemají negativní vliv na vlastnosti betonu. Jako aktivní příměsi se většinou používají druhotné suroviny. Použitím druhotných surovin, jako náhrady cementu se dále přispívá ke snížení negativního dopadu na životní prostředí. Jedná se například o elektrárenský popílek, který vzniká při spalování jemně mletého uhlí v tepelných elektrárnách. Dále se jedná o jemně mletou granulovanou vysokopecní strusku. Vysokopecní struska vzniká při tavení železa z železné rudy ve vysokých pecích. Jako aktivní příměsi lze použít například i jiné druhotné suroviny. V tomto případě se jedná nejčastěji například o zbytky po pálení organických materiálů, nebo po spalování komunálního odpadu [3], [63].

Možnosti použití aktivních příměsí jako náhrady cementu v betonu řeší v České republice tzv. koncepce *k*-hodnoty. Tato koncepce je uvedena v evropské normě EN 206+A2: Beton – Specifikace, výroba a shoda, kde jsou uvedeny číselné *k*-hodnoty pro aktivní příměsi jako je elektrárenský popílek, jemně mletá granulovaná vysokopecní struska a křemičité úlety. V této normě však není popsána žádná možnost stanovení těchto *k*-hodnot a samotná koncepce je uvedena velmi obecně. Mezi další možnosti posouzení množství aktivních příměsí a vlivu na beton slouží koncepce ekvivalentních vlastností a koncepce ekvivalentních kombinací, které se však v České republice nepoužívají. Z tohoto důvodu je práce zaměřena na shrnutí poznatků o možnostech posouzení množství aktivních příměsí do betonu a jejich vlivu na beton a cementové malty, jako je index účinnosti, koncepce ekvivalentních vlastností betonu, koncepce ekvivalentních kombinací a koncepce *k*-hodnoty.

## Cíle práce

Cílem teoretické části této diplomové práce bylo shrnutí poznatků o možnostech posouzení vlivu aktivních příměsí na beton. Konkrétně se práce zabývala elektrárenským popílkem, jemně mletou granulovanou vysokopecní struskou a mikromletým vápencem. Dále se teoretická část zabývala shrnutím poznatků o možnostech stanovení indexu účinnosti a možnostech použití aktivních příměsí do betonu, kterými se zabývá koncepce ekvivalentních vlastností betonu, koncepce ekvivalentních kombinací a koncepce  $k$ -hodnoty.

Cílem experimentální části diplomové práce bylo posouzení vlivu elektrárenského popílku, jemně mleté granulované vysokopecní strusky a mikromletého vápence na cementové malty, beton a reologii cementových past pro náhrady cementu od 10 do 70 %. Posouzení se týkalo jak vlastností čerstvých cementových malt a betonů, tak i vlastností v ztvrdlém stavu. Dále byly vyhodnoceny indexy účinnosti pro jednotlivé příměsi v náhradách 10, 30, 50 a 70 % a na základě těchto výsledků byly stanoveny matematické funkce pevností v tlaku pro jednotlivé příměsi, které jsou závislé na stáří a množství cementu. Pro betony budou stanoveny  $k$ -hodnoty pro jednotlivé stáří a množství příměsí nahrazující cement. Dále se posuzovala možnost využití funkcí pevnosti pro cementové malty a betony pro stanovení indexů účinnosti a  $k$ -hodnoty v jednotlivých stářích a pro dané hodnoty náhrad cementu.

# Teoretická část

## 1. Příměsi do betonu

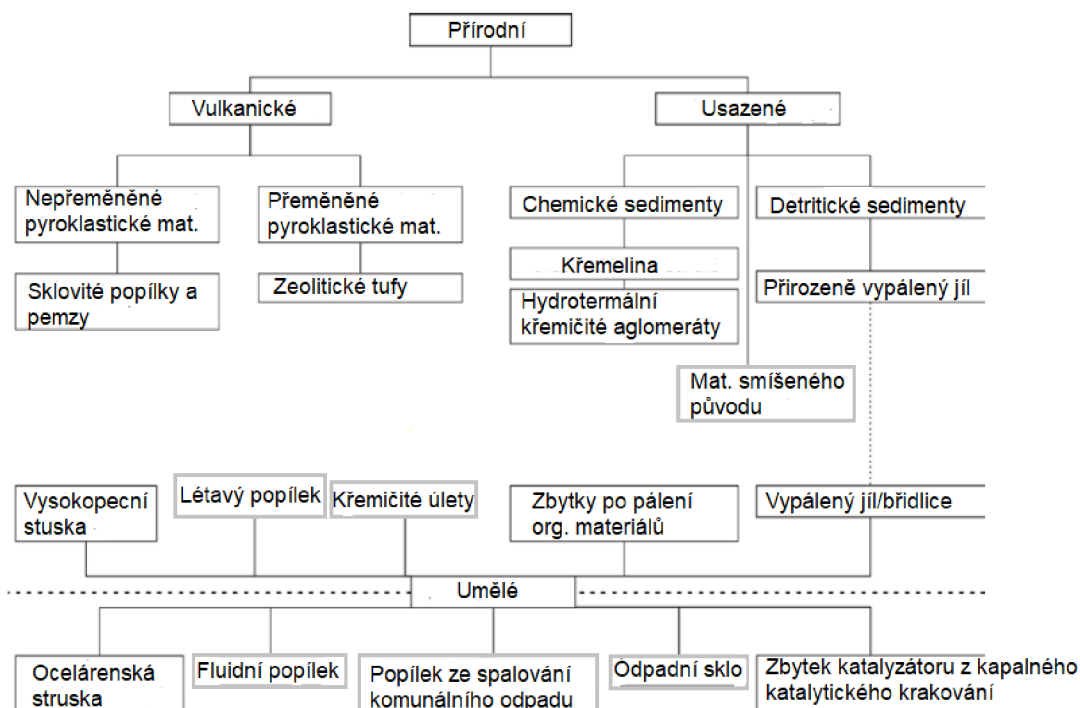
Příměsi do betonu jsou jemné práškovité látky, které se používají za účelem ovlivnění některých vlastností čerstvého i ztvrdlého betonu, nebo pro získání betonu se speciálními vlastnostmi. Při výrobě betonu vyhovujícího ČSN EN 206+A2: Beton – Specifikace, výroba a shoda lze použít [1]:

- Příměsi I. druhu, které působí v procesu hydratace cementového tmele téměř inertně
  - Kamenné moučky
  - Práškové pigmenty barevných tónů
- Příměsi II. druhu (aktivní příměsi), pro které jsou charakteristické pucolánové vlastnosti, nebo latentní hydraulická projevující se chemicko-fyzikální aktivitou při hydrataci cementového tmele
  - Elektrárenský popílek
  - Křemičité úlety
  - Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska [1], [2]

### 1.1. Aktivní příměsi

Aktivní příměsi jsou skupina materiálů, která se skládá z materiálů, které vykazují pucolánové a hydraulické vlastnosti. Hydraulické pojiva jsou materiály, které mohou ztuhnout a ztvrdnout pod vodou pomocí vytvoření hydratačních produktů podobných jako u hydratace cementu. Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska běžně vykazuje latentní hydraulicitu, to znamená, že její hydratační schopnost je malá ve srovnání s portlandským cementem a pro iniciaci a zrychlení její hydraulické reakce je nutná chemická, nebo fyzikální aktivace. Pro chemickou aktivaci se používají například alkalické hydroxidy, sulfáty ve formě sádry, nebo anhydritu a nejčastěji přísady vápna, nebo vápenných produktů jako například portlandského cementu. Chemická aktivace spočívá v tom, že se v roztoku vytváří alkalické prostředí, které iniciuje hydrataci latentně hydraulické látky. Dále je potřeba poznamenat, že hydraulické látky mohou nahrazovat cement v daleko větší míře než pucolány [3], [5].

Následující obrázek popisuje rozdělení aktivních příměsí na umělé a přírodní. Jsou zde uvedené jednotliví zástupci přírodních a umělých příměsí a také látky jejichž aktivita je zatím součástí výzkumu.



Obrázek 1: Klasifikační schéma aktivních příměsí (Pod přerušovanou čarou jsou umístěny aktivní příměsi, jejichž aktivita se zatím zkoumá) [3]

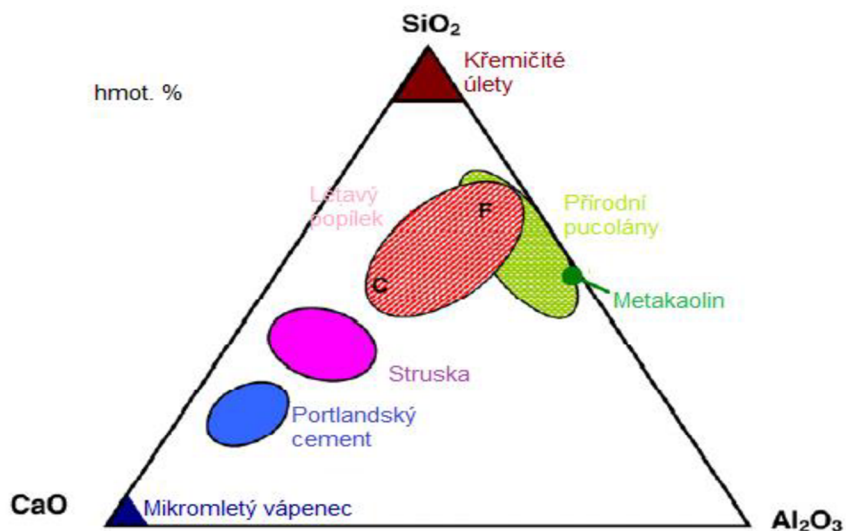
Pucolány jsou definovány jako křemičité nebo hlinito-křemičité materiály, které samy o sobě nemají téměř žádnou, nebo žádnou hydratační schopnost. Avšak jemně pomleté a za přítomnosti vody chemicky reagují s hydroxidem vápenatým ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) a vytvářejí sloučeniny, které vytváří produkty podobné hydrataci cementu [3].

Pucolánová aktivita je konvenčně popsána jako míra stupně reakce mezi pucolánem a vápenatými ionty nebo  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  za přítomnosti vody. Řídící silou pucolánové reakce je rozdíl v Gibbsově energii mezi reaktanty a produkty. Reakční rychlost je však dána jednotlivými elementárními kroky nebo procesy v reakci. Reakční krok s nejnižší rychlostí přeměny je proces řídicí rychlost a je to typický krok s nejvyšší bariérou aktivační energie. Obecně se uznává, že počáteční proces řízení rychlosti sestává z uvolňování, resp. rozpouštění oxidu křemičitého z pucolánu. [3].

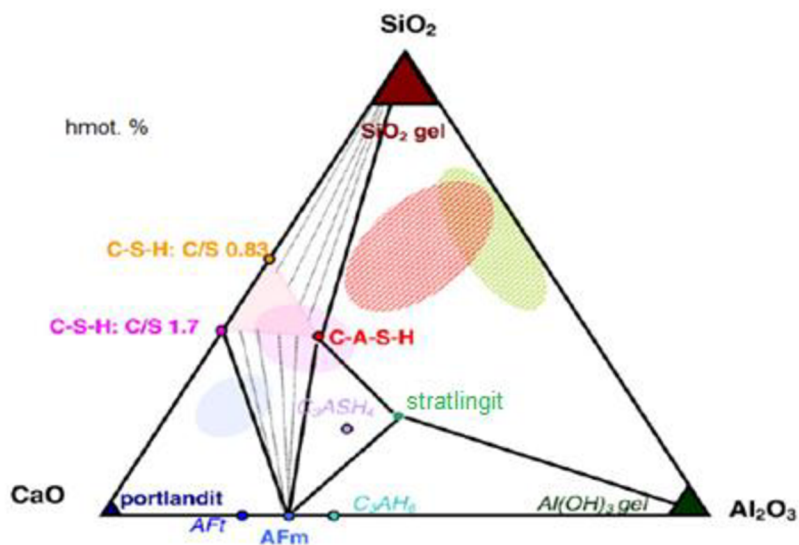
### 1.1.1. Dělení aktivních příměsí z chemického hlediska

1. Látky obsahující amorfni  $\text{SiO}_2$  ve vyšším množství než 47 %, které jsou rozpustné v kyselém i alkalickém prostředí vykazují pucolánové vlastnosti. Mezi tyto látky patří například diatomity, opál, křemičité úlety, a další uměle vyráběné křemičité látky [5].
2. Pálené hlíny, popílky a struska vykazují latentně hydraulické vlastnosti. Rozemletím jílových zemin vypálených na nízkou teplotu (600-800 °C) obsahujících amorfni metakaolinit vznikají reakcí s  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  C-S-H II a C-S-H I [5].

3. Látky obsahující sopečné sklo vzniklé rychlým ochlazením magmatu, Jedná se o pravé pucolány (podle městečka Pozzuoli na úpatí Vesuvu). Jedná se o tufy, trasy a sopečné sklo. Velmi reaktivní jsou také vulkanická skla a zeolity (krystalické nanoporézní materiály tvořené  $TO_4$  tetraedry (T=Si, Al, P atd.)) [5], [45].



Obrázek 2: Pozice aktivních přísad v trojném diagramu  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  [4]



Obrázek 3: Hydratační fáze aktivních přísad v trojném diagramu  $CaO-Al_2O_3-SiO_2$  [4]

## 1.2. Vliv aktivních přísad na ekologii

Beton je hned po vodě druhým nejpoužívanějším materiálem na světě a jeho produkce má za následek 5-8 % světových emisí  $CO_2$ . V roce 2014 činila produkce betonu 3,5 tuny na každého člověka na Zemi. Kvůli rozsáhlému použití tohoto materiálu je nezbytné správně posoudit jeho vliv na životní prostředí. V dnešní době se dopad materiálu na životní prostředí často posuzuje podle jeho emisí skleníkových plynů. Při výrobě cementu vznikají

kromě CO<sub>2</sub> další skleníkové plyny jako NO<sub>x</sub> a SO<sub>x</sub>. Ty však mají pouze lokální vliv. Vysoká produkce CO<sub>2</sub> při výrobě cementu je i tak zodpovědná za 3 % celkových světových emisí skleníkových plynů [6], [7], [8].

CO<sub>2</sub> emise z výroby cementu pocházejí z různých zdrojů. Mají původ v kalcinaci surového materiálu, dále CO<sub>2</sub> vyprodukované na energii potřebnou k chodu cementárny. V druhém případě lze tuto energii dělit na přímou a nepřímou. Nepřímé emise jsou vytvořeny při výrobě elektrické energie pro celou cementárnu a přímé emise jsou vyprodukované při spalování paliva pro chod cementářské pece. Následující tabulka obsahuje souhrn vyprodukovaného CO<sub>2</sub> při výrobě cementu z různých zdrojů [6].

Tabulka 1: Emise CO<sub>2</sub> vyprodukované při výrobě cementu [6]

Zdroj	CO <sub>2</sub> kalcinace [g/kg slínku]	CO <sub>2</sub> nepřímé energie [g/kg slínku]	CO <sub>2</sub> přímé energie [g/kg slínku]	Suma [g/kg slínku]
1	530	310-600		840-1150
2	405	405		810
3	472	48	296	800

Z ekologického hlediska je jasné, že používání druhotných surovin ve směsných cementech je žádoucí, protože používání druhotných surovin snižuje celkové emise skleníkových plynů do atmosféry než používání samotného portlandského cementu, který obsahuje 95-100 % portlandského slínku [6].

V [8] byl studován ekologický vliv aktivních přísad do betonu. V této studii byly navrženy čtyři receptury betonů a následně byl vypočítán jejich vliv na prachové látky, globální oteplování, množství neobnovitelné energie a acidifikace prostředí. Receptury betonů a přepočítání vlivu na životní prostředí je uvedeno v následujících tabulkách [8].

Tabulka 2: Použité receptury betonu [8]

Složka [kg/m <sup>3</sup> ]	1	2	3	4
Portlandský cement	455	333	238	315
Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska	0	142	237	0
Popílek	0	0	0	105
Mikrosilika	0	0	25	0
Hrubé kamenivo	905	935	935	1020
Drobné kamenivo	745	680	605	718
Voda	208	221	221	172
Přísada	1,69	1,81	2,1	1,8
Pevnost v tlaku po 28 dnech [MPa]	58,7	60,8	66,0	53,3



Tabulka 3: Přepočítané vlivy na životní prostředí [8]

Kategorie vlivu	Receptura betonu			
	1	2	3	4
Prachové látky [kg PM <sub>2,5</sub> ]	0,33	0,28	0,24	0,27
Globální oteplování [kg CO <sub>2</sub> ]	499	397	307	377
Neobnovitelná energie [MJ]	3578	3036	2549	2880
Okyselení [kg SO <sub>2</sub> ]	8,37	7,05	5,86	6,85

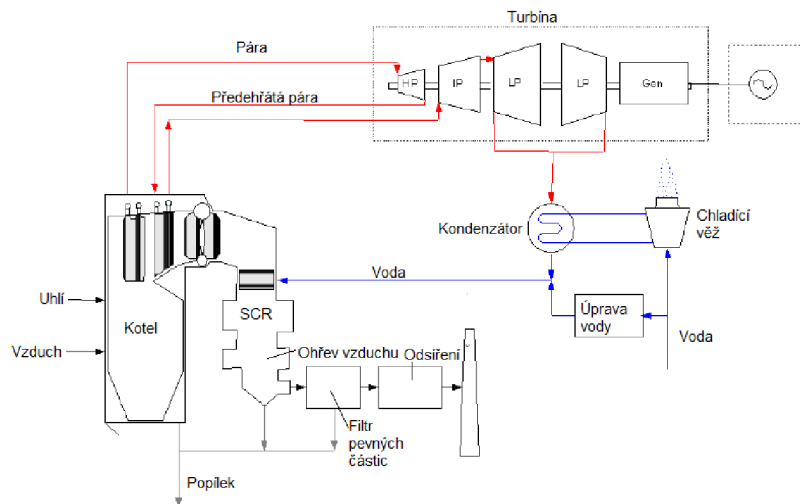
Z tabulky 3 je zjevné, že s použitím aktivních příměsí jako náhrady cementu se zmenšuje množství škodlivých látek uvolňovaných do ovzduší. Například množství uvolněného CO<sub>2</sub> se sníží o 20-28 % a okyselení se sníží o 15-28 % [8].

## 2. Popílek do betonu

Elektrárenský popílek je vedlejším energetickým produktem získávaný spalováním jemně mletého uhlí. Jako spalované uhlí se používá antracit (množství uhlíku vyšší než 80 %), černé uhlí (obsahuje uhlík a další těkavé látky ve stejném poměru), hnědé uhlí (složení podobné černému uhlí s vyšší vlhkostí) a lignit (podobné hnědému uhlí, ale s vysokým obsahem vlhkosti). Elektrárenský popílek je separován pomocí elektrostatických a mechanických separátorů v tepelných elektrárnách. Vzhledem k tomu že většina elektrické energie je získávána z tepelných elektráren tak vzniká velké množství „odpadního“ elektrárenského popílku [10], [17].

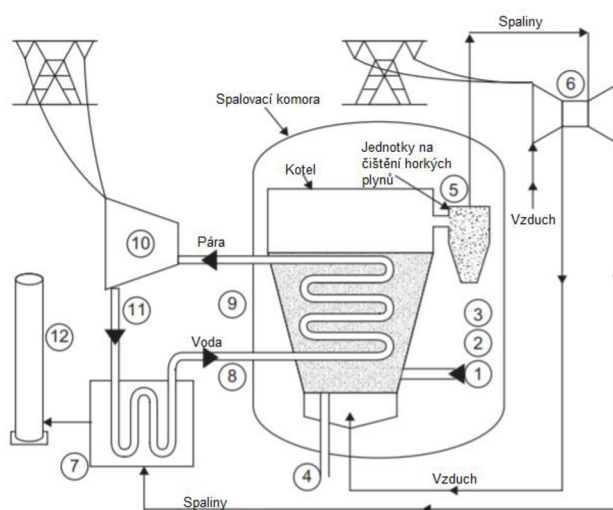
### 2.1. Vznik elektrárenského popílku

Vysokoteplotní popílek vzniká spalováním jemně mletého uhlí v tepelných elektrárnách. Při tomto procesu prochází uhlí spalovacím kotlem, ve kterém vyhoří uhlík a nestále části, zatímco nespalitelné části uhlí jako například jíla, břidlice, křemík, živce dolomit a vápno jsou dále unášeny kouřovými plyny. Většina popílkotvorných částic jsou ve spalovacím kotli taveny. Po tom, co tyto částice opustí spalovací kotel jsou částice budoucího popílku rychle ochlazen z teploty 1500 °C na 200 °C. Po ochlazení tuhnou a vytvářejí sklovité, sférické částice. Pouze malá část aglomerovaných částic zůstává v kotli jako ložový popílek. Z ekologických důvodů není možné aby, neaglomerované, sférické částice známé jako létavý popílek unikaly do ovzduší. Z toho důvodu jsou zachycovány z kouřových plynů pomocí elektrických separátorů, nebo mechanických filtrů [9].



Obrázek 4: Vysokoteplotní spalování uhlí [13]

Technologie fluidního spalování uhlí v tepelných elektrárnách používá vápno na odsíření rovnou v kotli. Méně kvalitní uhlí s vysokým obsahem síranů je v tomto případě spalováno efektivněji s dosažením nižších emisí  $\text{NO}_x$  a  $\text{SO}_2$ . Fluidní spalování umožňuje také použití širší škály kvality paliva při zachování nízkých emisí. Teplota spalování při fluidním spalování je pouhých 800-900 °C. To vede k redukci  $\text{NO}_x$  a částečně zvyšuje podíl  $\text{N}_2\text{O}$  ve spalinách oproti vysokoteplotnímu spalování. Získávaný popílek obsahuje vysoký podíl  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CaSO}_4$  a vysoký podíl krystalické fáze. Ovšem částice tohoto popílku jsou značně nepravidelné a tím pádem je jejich použití jako pucolánů značně omezené. Zvýšení reaktivity fluidních popílků je možné dosáhnout pomocí jejich mletí [11].



Obrázek 5: Spalování ve fluidním loži [12]

### Legenda k obrázku 8:

- 1) Dávkování drceného uhlí s vápencem a dolomitem,
- 2) Když dojde k určité rychlosti vzduchu v kotli, tak dochází ke spalování uhlí ve vzhledu,
- 3) Uhlí shoří a vápno, nebo dolomit absorbuje sloučeniny síry,
- 4) Odchod škváry,
- 5) Odchod částic popílku do cyklonu,
- 6) Turbína poháněná spalinami,
- 7) Předehřev pomocí spalin,
- 8) Návrat předehřáté vody do kotle,
- 9) Přeměna vody v páru,
- 10) Turbína poháněná vodní parou,
- 11) Kondenzace páry na vodu,
- 12) Odvod spalin komínem [12].

## 2.2. Vlastnosti elektrárenských popílků

Z fyzikálního hlediska u elektrárenských popílků sledujeme granulometrii popílku, jeho měrný povrch a měrnou hmotnost. Velikost částic elektrárenského popílku se pohybuje od 1  $\mu\text{m}$  do 300  $\mu\text{m}$ . Více než 70 % elektrárenských popílků může při prosévání projít sítím 45  $\mu\text{m}$  a část popílku může být i menší než 3  $\mu\text{m}$ . Nepálené části uhlí jsou většinou větší než 100  $\mu\text{m}$ . Velikost středního zrna elektrárenských popílků se pohybuje v rozmezí 15-20  $\mu\text{m}$  [3], [17], [18].

Tabulka 4: Příklad zrnitosti elektrárenského popílku [19]

Velikost [ $\mu\text{m}$ ]	Množství [% hmot.]
1-3	3,5
3-8	19,5
8-13	15,5
13-20	12,7
20-53	16,2
53-105	16,2
105-250	7,2
250-500	1,8
500-1000	2,6
> 1000	0,1

Měrný povrch elektrárenského popílku stanovený Blainovou permeabilní metodou se pohybuje mezi 300-400- $\text{m}^2/\text{kg}$ , měrný povrch se však u různých popílků může lišit a může dosahovat i hodnot nižších. Měrná hmotnost většiny popílků se pohybuje mezi 2,0-2,5  $\text{g}/\text{cm}^3$  [17], [18], [20].

Mineralogické a chemické složení elektrárenských popílků závisí zejména na charakteru a složení spalovaného uhlí. Díky rychlému chlazení se popílků skládají především ze skelné fáze (50-90 %). Díky nespálenému uhlí se až do 16 % hmotnosti stává součástí popílku

uhlík. Množství uhlíku, a tedy i nespáleného uhlí závisí na teplotě spalování, stupni mletí spalovaného uhlí, poměru palivo/vzduch, složení spalovaného uhlí atd. [14].

Popílek z chemického hlediska obsahuje zejména  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a občas  $\text{CaO}_2$ . Mezi další prvky obsažené v elektrárenských popílcích může patřit například  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  atd [3], [16].

Podle ČSN EN 197-1 ED. 2. Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití se popílky rozdělují podle chemického složení na křemičitý popílek (V) a popílek vápenatý (W). Podle americké normy ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw of Calcined Natural pozzolan for Use in Concrete je dělení popílku obdobné na typ F (křemičitý) a typ C (vápenatý). Křemičitý popílek podle ČSN EN 197-1 musí obsahovat maximálně 10,0 % hmotnostních aktivního  $\text{CaO}_2$ , obsah volného  $\text{CaO}_2$  stanoveného podle ČSN EN 451-1 Metoda zkoušení popílku – Část 1: Stanovení obsahu volného oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1 %. Dále obsah aktivního  $\text{SiO}_2$  nesmí být menší než 25,0 % hmotnosti. Americká ASTM má podobné požadavky na chemické složení pro křemičité popílky. Pro křemičitý popílek musí být součet oxidů  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  větší než 70 %. Vápenatý popílek podle ČSN EN 197-1 musí obsahovat 10,0-15,0 % hmotnosti aktivního oxidu vápenatého a méně než 25,0 % hmotnosti oxidu křemičitého. U popílku typu C podle ASTM musí být suma oxidu křemičitého, hlinitého a železitého větší než 50 % [3], [15].

Z mineralogického hlediska se popílek skládá hlavně ze skelné fáze, křemene, cristobalitu, mullitu, hematitu, magnetitu, vápna, vápenných a alkalických síranů. V popílcích s vysokým obsahem vápna se mohou vytvářet i kalcium silikáty nebo kalcium alumináty. Většina minerálů se nachází ve skelné fázi, zatímco alkalické sírany se nacházejí na povrchu částic popílku. Železo se většinou koncentruje v samostatných částicích. Zrníčka uhlíku z nespáleného uhlí často obsahují velké množství sférických děr, ve kterých se pravděpodobně dříve nacházely skelné částice. Podle některých studií se uvádí, že křemen je zbytek, který se dříve nacházel již v uhlí, zatímco další minerály vznikly až při procesu spalování, nebo chlazení. Vznik dalších minerálů závisí především na molárním poměru mezi prvky ve spalovaném uhlí a velikostí zrn spalovaného uhlí, protože malé částice obsahují pouze jednu substanci, zatímco větší částice jich obsahují více. Teplota spalování uhlí může také ovlivnit mineralogické složení. Jak je známo z technologie výroby cementu kalcium alumináty, kalcium silikáty a kalcium aluminosilikáty vznikají při relativně nízké teplotě (<1000 °C), zatímco mullit vzniká až při teplotách vyšších [14], [17].

### 2.3. Vliv popílku na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu

Přidáním elektrárenského popílku do betonu ovlivňuje zpracovatelnost čerstvého betonu. Elektrárenský popílek se může skládat ze sférických zrn, které mohou zvýšit konzistenci betonu. Popílek také může podporovat mít vliv i na ztrátu zpracovatelnosti čerstvého betonu, přičemž přidáním popílku do betonu je ztráta konzistence čerstvého betonu v čase nižší než v betonu, ve kterém není část cementu nahrazena popílkem [21], [22].

Elektrárenský popílek se začal používat, protože v počátečních stářích betonu uvolňuje menší množství tepla než beton, ve kterém popílek není. Tím pádem může být teplota v konstrukcích značně redukována, protože vývoj tepla se prodlouží do delšího časového úseku. Tomuto faktu je věnována pozornost v silničních stavbách a konstrukcích, které mají větší rozměry a jsou masivnější. Tím se snižuje riziko termálních trhlin [23].

Při náhradě části cementu elektrárenským popílkem, dosáhne beton ve stáří větším než 90 dní vyšší pevnosti v tlaku než beton bez popílku. Nicméně pevnost, o kterou se pevnost betonu zvýší závisí na vlastnostech popílku, cementu, poměru cement/popílek a ošetřování betonu. Obecně má popílkový beton nižší vývoj počátečních pevností oproti betonu bez popílku. Při použití vápenatého popílku je vývoj pevností v čase rozdílný od vývoje pevnosti betonu s křemičitým popílkem. Za předpokladu, že vápenatý popílek má hydraulické vlastnosti, dochází k hydrataci tohoto popílku ve stejné době, při které dochází k hydrataci cementu. Vápenatý popílek proto může způsobit vyšší počáteční pevnosti [23], [24].

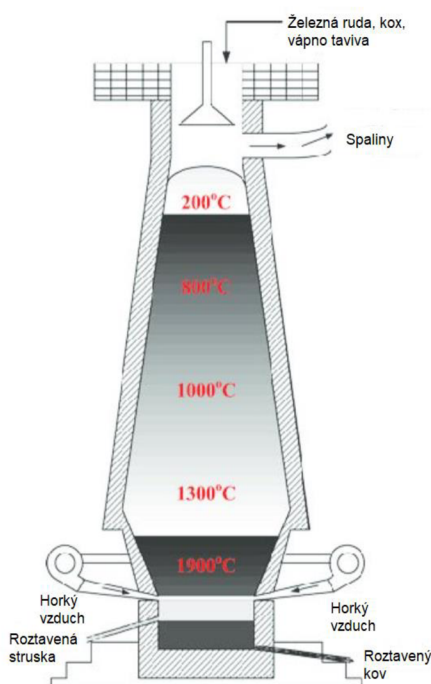
Z hlediska trvanlivosti má popílek vliv na mrazuvzdornost, vnikání agresivních kapalin do betonu, odolnost výztuže proti korozi a odolnost proti vnikání chloridů. Popílek může mít negativní vliv na mrazuvzdornost betonu. Použití elektrárenského popílku do betonu může mít totiž za následek vyšší pórovitost, než by měl beton bez popílku. Při pronikání agresivních látek a korozi ocelové výztuže má popílek vliv pozitivní. Ve vodě rozpustný hydroxid vápenatý je díky popílkem a jeho pucolánové reakci nahrazen nerozpustnými CSH fázemi a tím brání vyluhování hydroxidu vápenatého. Dalším důsledkem této reakce vyplnění kapilár a pórů a tím i snížení propustnosti betonu pro agresivní látky, které mohou mít za následek korozi výztuže. I když je díky snížení obsahu hydroxidu vápenatého v betonu snížena i jeho alkalita, tak je alkalita betonu nadále tak vysoká, aby nedocházelo ke korozi výztuže. Díky pucolánové reakci a snížení propustnosti má popílkový beton i vyšší odolnost proti průniku chloridů. Podle různých studií lze konstatovat, že se zvyšujícím se obsahem popílku se průnik chloridů do betonu snižuje a až do určitého množství náhrady je průnik chloridů menší pro křemičité popílky než pro popílky vápenaté [23], [25].

### 3. Vysokopecní struska

Vysokopecní struska je definována jako nekovový produkt skládající se z křemičitanů, hlinitokřemičitanů, vápna a dalších sloučenin, které vznikají v roztaveném stavu současně se železem ve vysoké peci [26].

#### 3.1. Vznik vysokopecní strusky

Železná ruda, kox a vápno se taví ve vysoké peci (Obrázek 6: Vysoká pec [27]) při teplotě okolo 1500 °C. Běžně se z jedné tuny vyprodukovaného kovu získá 200-400 kg strusky. Rztavené železo se v peci nachází ve spodní části, zatímco struska díky své nižší objemové hmotnosti se nachází nad ním. Struska se odpichuje z vysoké pece v podobě tekutiny připomínající lávu a díky tomu, že plave nad roztaveným železem, může být snadno separována. Struska, po opuštění pece, se může granulovat, chladit na vzduchu, a expandovat. Granulování se provádí pomocí rychlého ochlazení ve vodě. Granulaci vznikají amorfní částice o velikosti menší než 5 mm. Dále je tato struska sušena a mleta na jemný prášek. Granulovanou strusku je možné použít např. jako náhradu portlandského cementu. Pokud je struska chlazená v normálních atmosférických podmínkách vzniká struska s krystalickou strukturou podobnou kameni. Vzduchem chlazenou strusku lze použít jako podklad pro kolejová lože, kamenivo do betonu nebo kdekoliv kde je požadován těžký a pevný základ. Expandovaná struska se vyrábí pomocí pomalého chlazení vodou, při kterém vzniká lehký suchý materiál. Expandovaná struska se používá na výrobu lehkých stavebních bloků, tvárnic, jako tepelná izolace nebo jako kamenivo do lehkých betonů [26].



Obrázek 6: Vysoká pec [27]

### **3.1.1. Granulace vysokopecní strusky**

Granulační linka většinou sestává z granulátoru, odvodňovací a skladovací sekce. Tekutá struska se přivádí buď do nádoby na strusku nebo přímo do granulátoru. Při výtoku se proud kapalné strusky nalije do proudu vody s vysokou rychlostí a ochladí se až na teplotu 50 °C. Tímto způsobem vznikají zrna o velikosti 5 mm s velkým obsahem vody. Moderní způsoby využívají vysokotlaké vodní trysky do jejichž proudu naráží roztavená struska. Mezi další způsoby granulace patří například vzduchová granulace pomocí peletizátoru, nebo suchá granulace ve formách [26].

### **3.2. Vlastnosti jemně mleté, granulované vysokopecní strusky**

Stejně jako u popílku je u jemně mleté, granulované, vysokopecní strusky důležitý její měrný povrch a objemová hmotnost. Měrná hmotnost vysokopecní jemně mleté strusky je menší než měrná hmotnost cementu a pohybuje se okolo 2900 kg/m<sup>3</sup>. Měrný povrch bývá vyšší než u cementu a pohybuje se v intervalu 320-390 m<sup>2</sup>/kg. Barva strusky je od šedé až po bílou [28].

Jemně mletá struska se podobně jako portlandský cement skládá z oxidu křemičitého a hlinitého a CaO avšak v jiném poměru. Mezi další oxidy zastoupené ve strusce může patřit MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> atd. Podle ČSN EN 197-1 ed 2 musí být hmotnostní podíl (CaO+MgO)/SiO<sub>2</sub> větší než 1. Mineralogicky struska obsahuje velký podíl skelné fáze. Kromě skelné fáze se ve strusce nachází melilit, merwinit a monticelit, dále obsahuje menší podíl kalcium silikátu a pseudowollastonitu [26], [28], [29], [30].

### **3.3. Vliv jemně mleté, granulované vysokopecní strusky na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu**

Struska stejně jako popílek zlepšuje konzistenci čerstvé malty nebo betonu, dále může mít pozitivní vliv na kohezi a redukci krvácení betonu a segregace kameniva. Zlepšení konzistence čerstvého betonu nebo malty s vysokopecní struskou je zapříčiněna lepší disperzí částic a zvýšení tekutosti směsi, a to i pokud je použita plastifikační přísada. Ve srovnání s cementem jsou částice strusky hladší a jejich povrch je hutnější. Díky hladšímu a hustšímu povrchu po sobě částice lépe kloužou. Dalším důvodem zlepšení konzistence je nižší absorpce vody struskou [26].

Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska má latentně hydraulické vlastnosti. Nahrazením cementu jemně mletou, granulovanou vysokopecní struskou má za následek zvýšení pevností. Vývoj pevnosti betonu s vysokopecní struskou je ovlivněn vícero faktory např.: chemickým složením, jemností mletí, indexem účinnosti, ošetřováním atd. Ke zvýšení pevnosti dochází až po době delší než 28 dní. Mezi hlavní nevýhody patří zejména pomalejší vývoj počátečních pevností až do stáří 28 dní. Optimální dávka pro dosažení

nejvyšších pevností až do stáří 1 roku se pohybuje v intervalu 40-50 % náhrady cementu struskou [26], [32].

Jemně mletá vysokopecní granulovaná struska zlepšuje distribuci menších pórů a tím pádem zhutňuje strukturu betonu, nebo malty. To je způsobeno vyplněním pórů hydratačními produkty vznikajícími reakcí strusky a hydroxidu vápenatého. Díky tomu se snižuje propustnost betonu a snižuje se riziko koroze výztuže, alkalicko-křemičité reakce, pronikání síranů, chloridů atd. Přidání strusky do betonu zlepšuje také mrazuvzdornost betonu. Podle některých studií může při použití provzdušňovací přísady beton s obsahem vysokopecní strusky snížit její účinnost a je potřeba většího množství této přísady pro dosažení stejné mrazuvzdornosti. Zvýšení odolnosti proti síranům přidání vysokopecní strusky do betonu je zapříčiněno třemi faktory [26], [31]:

- Neobsahuje  $C_3A$  náchylný ke tvorbě ettringitu,
- reaguje s  $Ca(OH)_2$  potřebným ke vzniku ettringitu,
- snižuje propustnost betonu [26].

## 4. Jemně mletý vápenec

Mezi hlavní minerály, které vápenec obsahuje patří kalcit, aragonit a vaterit. Vápenec může obsahovat také amorfní uhličitan vápenatý. Vápenec se může skládat i z kosterních pozůstatků živých organismů. Jemně mletý vápenec vzniká mletím přírodního vápence. Vápenec může být tvořen ze schránek mořských organismů, nebo může vzniknout vysrážením kalcitu nebo aragonitu. Podle vzniku vápence se dělí na krystalický, klastický, zrnitý nebo masivní. Měrná hmotnost vápence je větší než  $2600 \text{ kg/m}^3$ . Vápenec lze do betonu použít jako filler, hrubé kamenivo, nebo jako součást směsných portlandských cementů. Portlandský směsný cement se v Evropě používá ve dvou třídách CEM II/A-L s obsahem vápence 6-20 % a CEM II/B-L s obsahem vápence 21-35 % [1], [15], [33], [34].

### 4.1. Mechanismy působení jemně mletého vápence v betonu

Pro popsání mechanismu působení jemně mletého vápence v betonu bylo uvedeno mnoho mechanismů. Nejčastěji se mechanismy vlivu vápence dělí na efekt filleru (obsahuje efekt filleru, nukleační efekt a efekt ředění) a na chemický vliv [33].

#### 4.1.1. Efekt filleru

Efekt filleru závisí na velikosti částic. Tento efekt lze jednoduše popsat pomocí objemové hmotnosti zhutněných cementových past s jemně mletým vápencem. Pokud jsou zrna vápence větší, tak se objemová hmotnost snižuje a pokud jsou menší, tak se snižuje. Pokud zrna vápence budou menší, než cement tak vápenec vyplní prostor mezi zrníčky cementu a zlepší distribuci částic ve směsi a zlepší objemovou hmotnost ve zhutněném stavu.



Výsledek efektu filleru je snížení množství záměsové vody a tím pádem zvýšení pevnosti v tlaku a trvanlivosti. I když zrna vápence vyplní prostor mezi zrny cementu, tak se sníží konzistence čerstvého betonu, kvůli vysokému měrnému povrchu vápence. Například u UHCP (ultravysoce pevnostní (hodnotný) beton s pevností nad 100 MPa, vysokou trvanlivostí atd.) se konzistence snížila o 27 % po přidavku 3 % velmi jemně mletého vápence [33].

#### **4.1.2. Nukleační efekt**

Mnoho studií potvrdilo, že jemně mletý vápenec tvoří nukleační zárodky pro srážení hydratačních produktů. Díky tomu se zrychlí hydratační reakce i stupeň hydratace cementu. Nukleační efekt je ovlivněn množstvím vápence, velikostí částic a členitostí povrchu. Se zmenšující se velikostí částic se zvětšuje jejich povrchová energie a absorpční kapacita. Hydratační produkty cementu mají tendence obklopovat povrch částic vápence s podobnými povrchovými strukturami, které se vztahují k atomům vápna a kyslíku ve vrstvách kalcitu a C-S-H fázích. Větší množství vápence ve směsi zajišťuje větší množství nukleačních zárodků, nicméně zatím není známo, který z těchto faktorů je dominantní. Podle [38] má vliv na nukleační efekt mineralogické složení. Například kalcit má vhodnější povrch pro vznik a růst hydratačních produktů a zrychluje počáteční hydrataci a zkracuje dobu tuhnutí, a zatímco aragonit nepodporuje vývoj počátečních pevností, ale podporuje reakci s hlinitany [33], [38].

#### **4.1.3. Efekt ředění**

Efekt ředění je nejvíce ovlivněn množstvím vápence v matrici. Nižší množství oxidu hlinitého v cementu má za následek to, že reakce se zúčastní pouze malé množství vápence. Pokud se vápenec použije jako náhrada cement, sníží se množství slínku a hydratačních produktů. Protože vápenec nemá pucolánové ani latentně hydraulické vlastnosti, tak nespotřebovává vodu na chemickou reakci a v matrici zůstane více volné vody, která může reagovat s částicemi cementu a tím zvyšuje jejich stupeň hydratace [33].

#### **4.1.4. Chemický vliv**

Chemický vliv mletého vápence je ovlivněn velikostí částic a množstvím oxidu hlinitého v  $C_3A$ ,  $C_4AF$  v cementu nebo v aktivních příměsích. S většími zrny vápence se zvětšuje jeho rozpustnost, a to má za následek zvýšení koncentrace uhličitanu vápenatého v roztoku. Díky zvýšené koncentraci se zvyšuje chemický vliv vápence ve směsi. Vápenec reaguje s monosulfátem  $((CaO)_3(Al_2O_3) \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O)$ , nebo s  $(CaO)_3(Al_2O_3) \cdot 6H_2O$  za vzniku monokarboaluminátu vápenatého  $(3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaCO_3 \cdot 11H_2O)$ . Přidání vápence mění morfologii C-S-H v kratší a tlustší vlákna C-S-H I [33], [35].

Je třeba poznamenat, že mnoho studií uvádí nekonzistentní výsledky chemických reakcí vápence. Na jednu stranu se uvádí, že vápenec reaguje s  $C_3A$  a alkalita směsi se snižuje, ale jiné výzkumy uvádí, že reakce vápence a  $C_3A$  neovlivňuje alkalitu čerstvého betonu. Dále se uvádí, že vápenec reaguje s kalcium sulfoaluminátem a alkalitu zvyšuje. V jiných výzkumech uvádějí, že reakce vápence s kalcium sulfoaluminátem alkalitu snižuje. Chemická reakce vápence může v matrici ovlivnit alkalitu, vlhkost a objemovou stálost [33].

Při hydrataci cementu vznikají během prvního dne C-S-H fáze, portlandit a ettringit. Po jednom dni reakce slínku pokračuje i po vyčerpání sádrovce a AFm a AFt fáze (AFt (ettringit) a AFm (monosulfát) fáze jsou běžné složky hydratovaných cementových past. AFt fáze vznikají reakcí slínekových minerálů (trikalcium aluminát, tetrakalcium aluminát ferrit) a sádrovce. AFm fáze vznikají reakcí AFt Fází s trikalcium aluminátem nebo kalcium aluminát-ferrity po vyčerpání volného sádrovce v systému) se začnou lišit pro matrici s cementem a cementem s vápencem. Bez vápence se ettringit rozkládá na monosulfát. V přítomnosti uhličitanu vápenatého je zabráněno rozkladu ettringitu na monosulfát, protože monosulfát je nestabilní a místo toho se tvoří mono- nebo hemikarboaluminát vápenatý. Změny v AFm fázích se projevují v koncentraci síry v roztoku. Přidáním vápence do betonu se tedy stabilizuje ettringit a toto může vést ke zvýšení pevností v tlaku [36], [60].

#### **4.2. Vlastnosti betonu s obsahem mletého vápence**

Vliv vápence na zpracovatelnost betonu není úplně jasný. Několik studií tvrdí, že přídavek jemně mletého vápence zlepšuje zpracovatelnost, další výzkumy uvádí, že vápenec snižuje tekutost čerstvého betonu. Vliv vápence na zpracovatelnost betonu nejvíce souvisí s jeho morfologií, efektem filleru a efektem ředění. Nukleační efekt a chemický vliv nemá na zpracovatelnost veliký vliv, protože tyto efekty se projevují až po několika hodinách hydratace. Vliv na zpracovatelnost čerstvého betonu má vliv množství nečistot ve vápenci. Například množství jílu, který zvyšuje množství záměsové vody [37].

Doba tuhnutí a tvrdnutí je ovlivněna především nukleačním a ředícím efektem. Chemický efekt nemá velký vliv na dobu tuhnutí a tvrdnutí, protože se projevuje až po ukončení tvrdnutí. Nepřímí vliv na dobu tuhnutí má i velikost částic. Částice menší, než cement podporují spíše efekt nukleace a ředění a částice větší nebo stejně veliké jako cement projevuje se spíše efekt ředění. Pokud se vápenec chová spíše jako nukleační zárodky tak se doba tuhnutí a tvrdnutí zkracuje. Při střední velikosti částic vápence 4-16  $\mu\text{m}$  tak nebylo pozorováno zkrácení doby tuhnutí a tvrdnutí [37].

Vliv vápence na pevnosti betonu závisí na množství a velikosti vápence nahrazujícího cement. Menší částice vyplňují prostor mezi zrníčky cementu a aktivních příměsí. Podle některých studií se se zmenšující se velikostí částic vápence zvyšuje pevnost v tlaku [37].

Větší množství vápence nahrazujícího cement má za následek zvýšení efektu ředění a snížení pevnosti v tlaku. Dále jsou výsledné pevnosti závislé na množství vápence, kterým se nahrazuje cement. S jeho zvyšující se dávkou se pevnosti betonu snižují [37].

Přidání vápence jako náhrady cementu dochází ke zhutnění pórové struktury betonu a snižuje propustnost betonu pro vodu a chloridy. Snížení propustnosti betonu je zapříčiněno zejména efektem filleru, který má za následek ucpání pórů a jejich zmenšení. V případě snížení propustnosti betonu má také vliv množství vápence nahrazujícího cement. Pro snížení propustnosti vody je optimální dávka do 10 % hmotnosti cementu a pro chloridy do 20 % hmotnosti cementu. Vápenec v betonu má za následek zvýšení hloubky karbonatace a zvýšení expanze v přítomnosti siřičitých iontů. Zvýšení hloubky karbonatace může být způsobeno efektem ředění a chemickým efektem vápence, který spotřebovává vápenné hydráty na reakci vápence s hlinitanovou fází. V porovnání s popílkem nebo vysokopeční struskou má náhrada vápence vyšší hloubku karbonatace. V případě napadení betonu siřičitými ionty dochází ke zhoršení vlastností betonu, kvůli tvorbě sádry, ettringitu a thaumasitu. Navíc přítomnost vápence zvyšuje efektivní vodní součinitel a snižuje nepropustnost a korozivní roztok může proniknout hlouběji do betonu. Vyšší množství  $C_3A$  reaguje se siřičitými ionty, které vyvolávají vznik ettringitu a thaumasitu a tím pádem expanzi betonu [37], [39].

## 5. Index účinnosti

Index účinnosti je definovaný jako poměr pevnosti v tlaku vzorku s aktivní příměsí ku pevnosti v tlaku vzorku bez příměsí, uvedený v procentech. Podle ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu: Část 1: Stanovení pevnosti se index účinnosti stanovuje na cementových maltách vyrobených ze 450 g cementu, 1350 g normalizovaného písku a 225 g destilované vody. Vyrobené tělesa následující den odformují a uloží se na dobu 27 dní do vody. Pro stanovení indexu účinnosti se vyrábějí dvě sady vzorků. Jedna standardní receptura pouze s cementem a druhá, ve které se část cementu nahradí aktivní příměsí. Po době zrání je na obou vzorcích zkoušena pevnost v tlaku. Podle ASTM C311/C311M - 18 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete (Standardní zkušební metody pro odběr vzorků a testování popílku nebo přírodních pucolánů pro použití v betonu) se vzorky vyrábí z 500 g cementu, 1375 standardizovaného písku a 242 g destilované vody. Podle ASTM C311/311M se vzorky ukládají při vyšší teplotě [40], [41], [46].

Index účinnosti nepřímo posuzuje pucolánovou aktivitu porovnáním pevností v tlaku. Mezi další možnosti nepřímého posouzení pucolánové aktivity lze porovnávat například uvolněné hydratačního tepla, nebo elektrickou vodivost. Další metody posouzení pucolanity

jsou přímé. Mezi tyto metody patří například pozorování přítomnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , které se v průběhu pucolánové reakce snižuje. Množství  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  se stanovuje pomocí analytických metod jako je rentgenová difrakční analýza, termogravimetrická analýza, nebo chemická analýza. Mezi nejběžnější přímé metody patří Frattiniho test. Frattiniho test používá chemickou analýzu pro zjištění koncentrace rozpuštěných  $\text{Ca}^{2+}$  a  $\text{OH}^-$  iontů v roztoku cementu CEM I a testovaného pucolánu. Další metoda je metoda nasyceného vápna. Tato metoda je zjednodušenou verzí Frattiniho testu. Při této metodě je pucolán míchán s nasyceným vápnem namísto cementu. Množství vápna spotřebovaného na pucolánovou reakci se stanovuje měřením zbytkového rozpuštěného vápníku. Jednou z nově prezentovaných metod stanovení pucolanity je metoda  $\text{R}^3$  (rapid, relevant, reliable, rychlé, relevantní a spolehlivé). Tato metoda používá laboratorní chemikálie jako portlandit,  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{KOH}$  a  $\text{CaCO}_3$  na aktivaci pucolánu pomocí vytvoření zásaditého prostředí podobnému prostředí vytvořenému portlandským cementem. Díky použití této metody lze pucolánovou aktivitu snadno kvantifikovat měřením hydratačního tepla, množství vázané vody, množství spotřebovaného portlanditu, nebo i pevnosti v tlaku [42], [43], [44].

## 6. Koncepce ekvivalentních vlastností betonu

Koncepce ekvivalentních vlastností betonu umožňuje upřesnění požadavků pro minimální obsah cementu a maximální vodní součinitel, pro kombinaci jedné nebo více aktivních příměsí a jednoho, nebo více cementů, u kterých jsou zdroje výroby a jejich charakteristiky jasně definovány a dokumentovány. Koncepci je možné používat pouze s cementy podle ČSN EN 197-1 ed. 2. Dále musí být prokázáno, že beton má ekvivalentní vlastnosti s referenčním betonem. Ekvivalentní vlastnosti se prokazují s ohledem na jeho chování při působení vnějšího prostředí a na jeho trvanlivosti. Podle ČSN EN 73 2404 Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda – Doplnující informace se však koncepce ekvivalentních vlastností betonu v České republice nepoužívá. V literatuře se uvádí dva postupy stanovení koncepce ekvivalentních vlastností betonu. Tato koncepce se používá v Belgii podle NBN B15-100 Concrete - Methodology for the assessment and the validation of the fitness for use of cements or additions for concrete (Beton – Metodika pro posuzování a ověřování vhodnosti použití cementů nebo přísad do betonu) a v Nizozemsku podle CUR-Recommendation 48 (CUR doporučení 48) [2], [47], [48], [49].

### 6.1. Nizozemská metoda

Podle Nizozemské metody se koncepce ekvivalentních vlastností používá zejména k posouzení trvanlivosti. Aby beton dosahoval ekvivalentních vlastností musí dosahovat stejné trvanlivosti pro danou třídu expozice jako beton referenční. Mezi posuzované vlastnosti patří [47]:

- Odolnost proti karbonataci,
- odolnost proti vnikání chloridů,
- odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám,
- odolnost proti mořské vodě,
- odolnost proti sulfataci [47].

Dále mezi posuzované vlastnosti patří pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech. Další mechanické vlastnosti jako pevnost v tahu ohybem, pevnost v tahu, modul pružnosti, smrštění a tvorba trhlin nemusejí být součástí posouzení porovnávaného betonu [47].

### **6.1.1. Proces posouzení**

Referenční beton by měl splňovat požadavky NEN 8005 (Nizozemský doplněk k EN 206+A2) pro použité třídy prostředí, dále musí být vyroben s cementem vhodným pro použití pro danou třídu prostředí. Pro posouzení různých expozičních tříd mohou být použity různé referenční cementy. [47].

Srovnávaný beton by měl obsahovat alespoň 20 % portlandského slínku, pokud se jedná o kombinaci s jemně mletou, granulovanou, vysokopecní struskou a minimálně 25 % slínku pro jiné kombinace. Maximální množství vápence jako příměsi je 35 % (množství slínku a vápence se počítá podle EN 197–1 ed.2). Minimální množství pojiva musí být stejné, nebo větší pro danou třídu prostředí jako je uvedené v NEN 8005, a vodní součinitel musí být nižší, nebo stejný jako maximální vodní součinitel uvedený v NEN 8005 [47].

### **Trvanlivost ve vztahu k třídám vlivu prostředí**

Pro dané třídy prostředí se používají pouze ty zkoušky, které jsou relevantní. Pro expoziční třídu XA (odolnost proti chemickému působení) se provádí pouze zkouška odolnosti proti síranům. Odolnost proti ostatním agresivním látkám je nad rámec doporučení. Pouze v případě, že jsou sírany obsažené v zemině, nebo vodě (XA2, nebo XA3), tak jsou zkoušky odolnosti proti síranům povinné. V ostatních případech lze pro prostředí XA použít kombinaci cementu a příměsi a provést pouze zkoušku pevnosti v tlaku. Pro expoziční třídy XF1 a XF3 (odolnost proti mrazu a rozmrazování s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich) se stanovuje pouze pevnost v tlaku. Podrobněji jsou zkoušky pro ostatní stupně vlivu prostředí uvedena v následující tabulce [47].

Tabulka 5: Zkoušky trvanlivosti pro dané stupně vlivu prostředí [47]

Stupeň vlivu prostředí	Karbonatace	Průnik Chloridů	CHRL *)	Odolnost proti mořské vodě	Odolnost proti síranům
XC	X				
XD		X			
XS		X		X	
XF2+XF4			X		
XA2+XA3					X

\*) odolnost proti chemickým rozmrazovacím látkám

### Hodnotící parametry

Posouzení trvanlivosti je založeno na porovnání  $n$  betonů (s cementem a příměsí) a testovaných vzorků, které jsou vyrobeny z těchto betonů. Potvrzení nebo vyvrácení ekvivalentních vlastností se posuzuje na rozdíl výsledků zkoušek trvanlivosti mezi testovaným a referenčním betonem. Pro posouzení každého aspektu trvanlivosti je definovaný relativní rozdíl  $d$  [%] (testovaný beton mínus referenční beton). V CEN/TR 16639 Use of  $k$ -value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept (použití koncepce  $k$ -hodnoty, koncepce ekvivalentních vlastností a koncepce ekvivalentních kombinací) jsou uvedeny hodnoty  $d$ , které jsou již nepřijatelné [47]:

Tabulka 6: Limitní hodnoty  $d$  [47]

Aspekt trvanlivosti	Relativní rozdíl $d$ [%], který vede k odmítnutí s pravděpodobností 90 %
Karbonatace	+30
Průnik Chloridů	+30
CHRL	+40
Odolnost proti mořské vodě	+40
Odolnost proti síranům	-30

Pro každou zkoušku trvanlivosti  $j$  je hodnocení založeno na parametru  $T_j$ . Parametr  $T_j$  je závislý na průměrném výsledku  $n$ -tého vzorku referenčního a zkoušeného betonu, odchylce od průměrného výsledku referenčního a zkoušeného betonu, počtu vzorků a tabulkové limitní hodnotě pro jednotlivé zkoušky trvanlivosti. Aby bylo možné schválit výslednou hodnotu  $T_j$  tak  $T_j$  musí být větší než limitní hodnoty uvedené v tabulce níže [47].

Tabulka 7: Limitní hodnoty  $T_j$  [47]

Počet vzorků n	Limitní hodnota $T_j$
3	1,533
4	1,440
5	1,397
6	1,372
7	1356
8	1,345
9	1,337
10	1,330
11	1,325
12	1,321

## 6.2. Belgická metoda

Belgická metoda je stejně jako Nizozemská založena na zkoušení referenčního betonu (pouze s cementem) a betonu testovaného (s cementem a příměsí). V Belgii se koncepce ekvivalentních vlastností používá pro atestaci vhodnosti kombinace cementu a aktivní příměsi, kombinace různých cementů, nenormalizovaných cementů atd. Aby bylo možné stanovit ekvivalentní vlastnosti musí mít všechny použité materiály CE štítek [50].

V rámci postupu hodnocení vhodnosti lze hodnotit několik kritérií [50]:

- Pevnost v tlaku (Nepovinná část),
- Trvanlivost (povinná část) – posouzení pro jednotlivou recepturu (1. úroveň), nebo posouzení pro danou expoziční třídu (2. úroveň),
- Vlastnosti spojené s ukládáním čerstvého betonu (zpracovatelnost, doba tuhnutí a tvrdnutí, objemová hmotnost množství vzduchu, vývoj pevností) [50].

Pro úroveň 1 je zkoušen pouze jeden beton pro danou expoziční třídu. V případě úrovně 2. mohou být zkušeny všechny expoziční třídy uvedené v EN 206+A2 [50].

V NBN B15-100 jsou uvedené požadavky na referenční beton a maltu pro obě úrovně stanovování vhodnosti betonu. (například použité kamenivo, použití plastifikačních přísad atd.). Dále jsou v této normě uvedené vhodné a nevhodné podmínky zrání zkoušených vzorků. Nakonec jsou zde uvedené jednotlivé postupy zkoušek trvanlivosti, nebo normy podle, kterých se trvanlivost zkouší. Mezi zkoušené parametry patří například [50]:

- Odolnost proti karbonataci,
- Odolnost proti mrazu,
- Průnik chloridů,
- Odolnost proti síranům [50].

Hodnocení ekvivalentních vlastností podle NBN B15-100 je velmi podobné jako hodnocení ekvivalentních vlastností betonu Nizozemskou metodou. Hodnocení ekvivalentních vlastností je založeno na rozdílu trvanlivosti jednotlivých betonů, které nesmí mít vyšší rozdíl, než je požadováno. Například pro karbonataci je hodnotící kritérium [50]:

$$d_{new} \leq 1,20 \cdot d_{ref}$$

Kde:

$d_{new}$  ... hloubka karbonatace nové kombinace

$d_{ref}$  ... hloubka karbonatace referenčního betonu

## 7. Koncepce ekvivalentních kombinací

Koncepce ekvivalentních kombinací umožňuje započítání kombinace cementu podle EN 197-1 ed. 2 a aktivní příměsi započítání do maximálního vodního součinitele a minimálního množství cementu, které jsou požadovány pro betony pro jednotlivé expoziční třídy. V Evropě se používají tři metody: Britská, Irská a Portugalská. Všechny tyto metody byly vyvinuty nezávisle na sobě a značně se liší v požadavcích na zkoušené kombinace cementu a příměsi. Podle české normy ČSN 73 2404 se koncepce ekvivalentních kombinací v České republice nepoužívá [47], [48].

### 7.1. Britská metoda

Britská metoda umožňuje použití kombinace cementu CEM I pevnostní třídy 42,5 a vyšší splňující požadavky EN 197-1 ed. 2 a jedné z následujících příměsí [51]:

- Popílek splňující požadavky EN 450-1 Popílek do betonu: Část 1. Definice, specifikace a kritéria shody,
- Jemně mletá granulovaná vysokopecní struska podle EN 15167-1 Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty,
- Mletý vápenec podle BS 7979 Specification for limestone fines for use with Portland cement (Specifikace jemného vápence pro použití s portlandským cementem) [51].

Kombinace cementu a příměsi musí být testovány na pevnost v tlaku v souladu s metodou zkoušení uvedenou v EN 196-1. Výsledky pevností v tlaku se hodnotí podle požadavků pro jednu z pevnostních tříd v tabulce níže [51]:



Tabulka 8: Požadavky na pevnost v tlaku pro kombinace [51]

Pevnostní třída kombinace	Krátkodobé pevnosti		Standardní pevnosti	
	2 dny [MPa]	7 dní [MPa]	28 dní [MPa]	
22,5	-	≥ 12,0	≥ 22,5	≤ 42,5
32,5L	-	≥ 12,0	≥ 32,5	≤ 52,5
32,5N	-	≥ 16,0		
32,5R	≥ 10,0	-	≥ 42,5	≤ 62,5
42,5L	-	≥ 20,0		
42,5N	≥ 10,0	-		
42,5R	≥ 20,0	-	≥ 52,5	-
52,5L	≥ 10,0	-		
52,5R	≥ 20,0	-		

Dlouhodobé průměrné hodnoty krátkodobých a standardních pevností se vypočítají jako průměrné hodnoty z výsledků zkoušek získaných za období nejméně 6 měsíců a nejvíce 12 měsíců. Pro nové kombinace musí být dlouhodobých průměrů započítány všechny dostupné výsledky [51].

Poměr cementu a příměsi se považuje za „schválený poměr“ pouze tehdy, pokud naměřené nebo extrapolované dlouhodobé průměry počátečních a standardních pevností splňují následující podmínky [51]:

- Jsou vyšší než dolní hodnoty uvedené v tabulce 8,
- Nepřekračují horní limit z tabulky 8 [51].

Rezerva k dolním limitním hodnotám uvedených v tabulce 8 musí být [51]:

- Vyšší o 5 MPa pro standardní pevnosti a o 3 MPa pro krátkodobé pevnosti,
- celkového procento výsledků menší, než požadovaná spodní hranice nepřesahuje 5 % [51].

Bez ohledu na získané výsledky nesmí kombinace cementu a jemně mleté strusky přesáhnout 85 % množství strusky, kombinace s popílkem nesmí přesáhnout 55 % popílku a kombinace s jemně mletým vápencem 20 % [51].

## 7.2. Irská metoda

V Irsku se ekvivalentní kombinace stanovuje pomocí pevností jednotlivých kombinací. Pevnosti se stanovují na cementových maltách a jsou porovnávány s pevnostními požadavky na cementy uvedených v EN 197-1 ed. 2. pomocí Irské metody lze posuzovat pouze jemně mletou, granulovanou, vysokopecní strusku. Tato metoda umožňuje stanovení ekvivalentní kombinace jemně mleté, granulované, vysokopecní strusky a

cementu CEM II/A a CEM I až do náhrady 70 % cementu struskou. Metoda je založena na tom, zda kombinace 50 % a 70 % strusky s cementem vyhovuje či nevyhovuje pevnostním požadavkům. Pro náhradu 70 % jsou požadavky na pevnost ve stáří 56 dní a pro 50 % strusky ve stáří 28 dní. Tyto požadavky jsou uvedené v následující tabulce [47].

Tabulka 9: Požadavky na pevnost kombinace cementu a jemně mleté strusky [47]

Kombinace	Nejnižší pevnostní limit	
	Krátkodobá pevnost ( $\geq 20$ MPa)	Dlouhodobá pevnost ( $\geq 42,5$ MPa)
50 % Strusky	7 dní	28 dní
70 % Strusky	7 dní	56 dní

Aby bylo možno používat ekvivalentní kombinaci musí být každý měsíc zhotoveny vzorky z použitého cementu a vysokopecní strusky. Vzorky se dále zkoušejí ve stáří 7, 28 a 56 dní. Tyto vzorky se nazývají jako „měsíční průměr“. Měsíční průměrné hodnoty se v rámci 6-12 měsíců porovnávají s požadavky na pevnost uvedenými v tabulce 8. Tyto hodnoty se nesmí dosahovat nižších pevností po 7 dnech o více než 3 MPa a po 28 nebo 56 dnech o více než 5 MPa oproti referenčnímu betonu. Pokud jsou tyto limity splněny je kombinace považována za „povolený poměr“. Pokud je tato kombinace stanovena jako „povolený poměr“ lze tuto kombinaci, nebo kombinaci s nižším množstvím strusky započítat do maximálního vodního součinitele a minimálního množství cementu [47].

### 7.3. Portugalská metoda

Beton musí pro danou expoziční třídu splňovat požadavky na minimální pevnost v tlaku. Pokud daná kombinace nemá dostatečnou pevnost, nebo není dostatečně reaktivní, lze dosáhnout vyšší pevnosti nebo reaktivity zvýšením množství pojiva. Díky tomu bude zajištěna požadovaná trvanlivost. V tomto případě se ekvivalentní kombinace nezjišťuje pomocí pevnosti v tlaku zjišťované na cementových maltách, ale na pevnosti v tlaku betonu. Dále zde nejsou žádné limitace ohledně zdroje cementu, nebo příměsí. Pro stanovení koncepce ekvivalentních kombinací lze použít cement CEM I a jednu, nebo více příměsí, pokud daná kombinace odpovídá sloužení některému z cementů z EN 197-1 ed.2. Dále lze místo cementu CEM I použít i cement CEM II/A pevnostní třídy 42,5 nebo vyšší [47].

Koncepci ekvivalentních kombinací lze stanovovat pouze za splnění následujících podmínek [47]:

- Minimální pevnost v tlaku betonu je nezbytný požadavek pro danou expoziční třídu,
- Použitý cement musí být CEM I nebo CEM II/A pevnostní třídy 42,5 nebo vyšší,
- Použita může být i příměs I. druhu splňující podmínky LNEC specification E 464 – Limestone fillers for hydraulic binders (Vápenné fillery pro hydraulická pojiva)

- Složení kombinace musí vyhovovat limitům stanoveným v EN 197-1 ed.2 pro složení jednoho z cementů povolených v tabulkách 6 až 9 uvedených v LNEC Specification E 464: Concrete. Prescriptive methodology for a design working life of 50 and of 100 years under the environmental exposure (Beton. Předpisová metodika pro životnost konstrukce 50 a 100 let při vystavení vnějším vlivům) a také musí vyhovovat požadavku na pucolanitu,
- Množství mikrosiliky vztažené k množství slínku musí být maximálně 11 %
- Předepsané požadavky pro danou kombinaci jsou stejné, jako pro odpovídající cement [47].

### 7.3.1. Postup kvantifikace složení kombinace

Uvažujme, že hmotnost kombinace  $D_0$  se skládá z několika cementů a příměsí. Abychom určili množství pojiva  $D_L$  (pojivo zde označuje množství kombinace odpovídajícímu, které se rovná odpovídajícímu cementu, který by měl být použit pro ověření předepsaných požadavků) a jeho složení, tak se používá následující postup [47].

Množství  $CS_i$  (Množství složky v kombinaci) a jejich předběžné procentuální zastoupení v kombinaci o hmotnosti  $D_0$  je předepsané. V použitých cementech by měly být jednotlivé složky počítané zvlášť podle minimálního množství slínku uvedeného v EN 197-1 ed. 2, nebo minimálního množství slínku uvedeného výrobcem [47].

Cement, pro který bude stanovována ekvivalence, musí být zvolen z tabulky 1 v EN 197-1 ed.2 tak, aby jeho složení co nejvíce odpovídalo zkoušené kombinaci. Pokud má zvolený cement nejasné složení (např. CEM II/A-M), počítají se množství příměsí jako jedna složka. Pokud složení jednotlivých složek kombinace odpovídá složení srovnávaného cementu, tak hodnota  $D_0$  je uvažovaná jako množství pojiva  $D_L$ . Díky tomu lze kombinaci uvažovat jako ekvivalentní ke zvolenému cementu. Pokud množství složek v kombinaci neodpovídá zvolenému cementu tak se použije následující postup [47].

Pro každou složku  $i$  kombinace včetně hlavních složek použitého zvoleného (srovnávaného) cementu zvoleného v předchozím kroku, je maximální a minimální množství pojiva  $D_{\max_i}$  a  $D_{\min_i}$  popsáno pomocí horního a dolní limitu  $lim_{upp_i}$  a  $lim_{low_i}$  pro každou složku zvoleného cementu podle EN 197-1 ed.2. Proto množství složky v kombinaci  $CS_i$  se stanovuje z intervalu  $[D_{\min_i}, D_{\max_i}]$  [47].

$$D_{\min_i} = \frac{CS_i}{lim_{upp_i}} \quad (1)$$

$$D_{\max_i} = \frac{CS_i}{lim_{low_i}} \quad (2)$$

Předběžné množství složek pojiva  $DL_P$  je menším z  $D_{\max_i}$  podle rovnice (1). Pokud je pro každou složku  $D_{\max_i}$  větší než  $D_0$ , tak je potřeba uvážit menší množství  $CS_{i\text{alt}}$ .  $CS_{i\text{alt}}$  je závislé na horním limitu přípustného množství složky  $i$  v ekvivalentním pojivu, na součtu zbývajících složek v kombinaci  $CS_i$ , a na množství vedlejších složek kombinace. Pokud je množství složek pojiva  $DL_P$  menší než  $D_{\min_i}$ , tak je uvažované menší množství složky  $CS_{i\text{alt}}$  závislé na předběžném množství složek  $DL_P$  a horní limitní hodnotě přípustného množství složky  $i$  [47].

Po stanovení upraveného množství složky v kombinaci  $CS_{i\text{alt}}$  a množství vedlejších složek v kombinaci  $CM_{\text{mixt}}$ , lze stanovit množství pojiva  $DL$  podle následujícího vzorce [47]:

$$D_L = \left( \sum_i^{n-1} \text{zbylé } CS_i \right) + CS_{i\text{-alt}} + CM_{\text{mixt}}$$

## 8. Koncepce $k$ -hodnoty

Koncepce  $k$ -hodnoty je předepsaný postup. Je založena na porovnání trvanlivosti, nebo pevností v tlaku betonu s referenčním cementem a betonu, ve kterém je část cementu nahrazena aktivní příměsí. Koncepce  $k$ -hodnoty povoluje použití aktivních příměsí pokud [47]:

- Vodní součinitel voda/cement se nahradí voda/(cement+ $k$ ×příměs),
- Množství cement+ $k$ ×příměs je větší než minimální množství cementu pro danou expoziční třídu [47].

Po nahrazení části cementu aktivní příměsí jsou za limitní hodnoty považovány ty hodnoty, které odpovídají původnímu cementu, bez použití aktivní příměsí [47].

### 8.1. Princip koncepce $k$ -hodnoty

Vliv aktivních příměsí na vlastnosti betonu závisí na charakteru jednotlivých materiálů, stáří betonu, vnějších podmínkách atd. Abychom vzali v úvahu všechny tyto vlivy už při návrhu betonu, koncepce  $k$ -hodnoty používá vztah mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku. Pokud je splněna podmínka stejné pevnosti v tlaku tak platí následující vztah [47]:

$$w_0 = \frac{v}{c+k \cdot p} \quad (3)$$

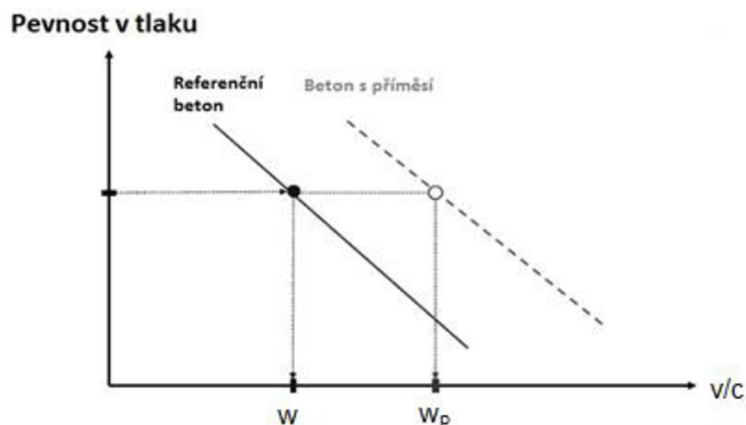
Kde:

$w_0$ ... vodní součinitel betonu bez příměsí

$v$ ... obsah vody použité pro beton s příměsí [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$c$ ... obsah cementu pro beton s příměsí [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$p$ ... obsah příměsi [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]



Obrázek 7: Princip koncepce  $k$ -hodnoty [52]

Pokud jsou parametry stanovené na stejnou pevnost v tlaku, tak lze  $k$ -hodnotu vyjádřit pomocí následujícího vzorce[47]:

$$k = \frac{\frac{v}{w_0} - c}{p} \quad (4)$$

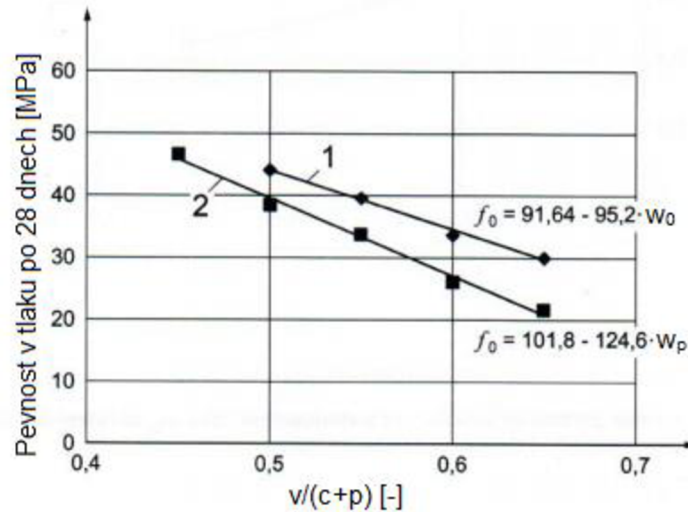
Při navrhování betonu za použití  $k$ -hodnoty tato hodnota  $k$  určuje maximální hodnoty, které by měly být použity pro vodní součinitel ( $v/(c+k \cdot p)$ ) betonu, který se dále porovnává s maximálním vodním součinitelem pro danou expoziční třídu. Pokud hodnotíme výsledky z více výsledků zkoušek betonů mohou nám díky různým vnějším vlivům (vlastnosti příměsi, množství příměsi typ cementu, stáří, vodní součinitel atd.) vyjít různé  $k$ -hodnoty [47].

## 8.2. Metoda stanovení $k$ -hodnoty

Následující metoda výpočtu je založena na Smithově metodě vyvinuté pro popílek v roce 1967. Tato metoda stanovení  $k$ -hodnoty je založena na porovnání vodního součinitele a pevnosti v tlaku betonů se stejným množstvím příměsi. Pro stanovení se používá aritmetický popis vztahu vodního součinitele a pevnosti v tahu za použití různých empirických vztahů. Nejčastěji se používá lineární závislost, ale může být použita i nelineární závislost například Abramsův zákon.  $K$ -hodnoty stanovené pomocí lineární a nelineární závislosti se mohou lišit, ale úroveň výsledků je stejná. Vyšší odchylky ve stanovení nastávají při zjišťování pevnosti v tlaku. Pro lineární závislost vodního součinitele a pevnosti v tlaku můžeme použít následující vztah [47]:

$$f_0 = A_0 - B_0 \cdot w_0 \quad (5)$$

Příklad stanovení empirických koeficientů je na následujícím obrázku. Křivka 1 označuje referenční beton a křivka 2 označuje beton s náhradou 20 % cementu elektrárenským popílkem [47].



Obrázek 8: Příklad stanovení empirických koeficientů ze závislosti pevnosti v tlaku na vodním součiniteli [47]

Pro stanovení poměr cementu a příměsí ( $c/p$ ) je uvažovaná lineární aproximace následující [47]:

$$f_p = A_p - B_p \cdot (v_p / (c_p + p)) = A_p - B_p \cdot w_p$$

Při experimentálním stanovení funkčního vztahu mezi vodním součinitelem a pevností v tlaku tak lze uvažovat, že jejich pevnosti se rovnají.

$$f_{c(\text{referenční})} = f_{c(\text{s příměsí})} \quad (6)$$

$$f_0 = f_p \rightarrow A_0 - B_0 \cdot w_0 = A_p - B_p \cdot \frac{v_p}{c_p + p} \quad (7)$$

$$w_0 = \frac{v_p}{c_p + k \cdot p} \rightarrow v_p = w_0 \cdot (c_p + k \cdot p) \quad (8)$$

Substitucí rovnice (8) do rovnice (7) dostaneme následující vztah [47]:

$$A_0 - B_0 \cdot w_0 = A_p - B_p \cdot w_0 \cdot \frac{c_p + k \cdot p}{c_p + p} \quad (9)$$

Nebo:

$$A_0 - B_0 \cdot w_0 = A_p - B_p \cdot w_0 \cdot \frac{1 + k \cdot \frac{p}{c_p}}{1 + \frac{p}{c_p}} \quad (10)$$

Pokud rovnici (10) vhodně upravíme, tak bude výpočet  $k$ -hodnoty vypadat podle vztahu (11). Ovšem z tohoto vztahu nebude  $k$ -hodnota jedinou číslíci ale parametrem funkce závislé na vodním součiniteli [47].

$$k = \frac{(A_p - A_0) \cdot (1 + p/c_p)}{B_p \cdot p/c_p} \cdot \frac{1}{w_0} + \left[ \frac{B_0 \cdot (1 + p/c_p)}{B_p} - 1 \right] \cdot \frac{1}{p/c_p} \quad (11)$$

Použité zkratky:

$c$ ... množství cementu v betonu bez příměsi [ $\text{kg/m}^3$ ]

$c_p$ ... množství cementu v betonu s příměsí [ $\text{kg/m}^3$ ]

$p$ ... množství příměsi [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v$ ... množství vody v betonu bez příměsi [ $\text{kg/m}^3$ ]

$v_p$ ... množství vody v betonu s příměsí [ $\text{kg/m}^3$ ]

$w_0$ ... vodní součinitel betonu bez příměsi [-]

$w_p$ ... vodní součinitel betonu s příměsí [-]

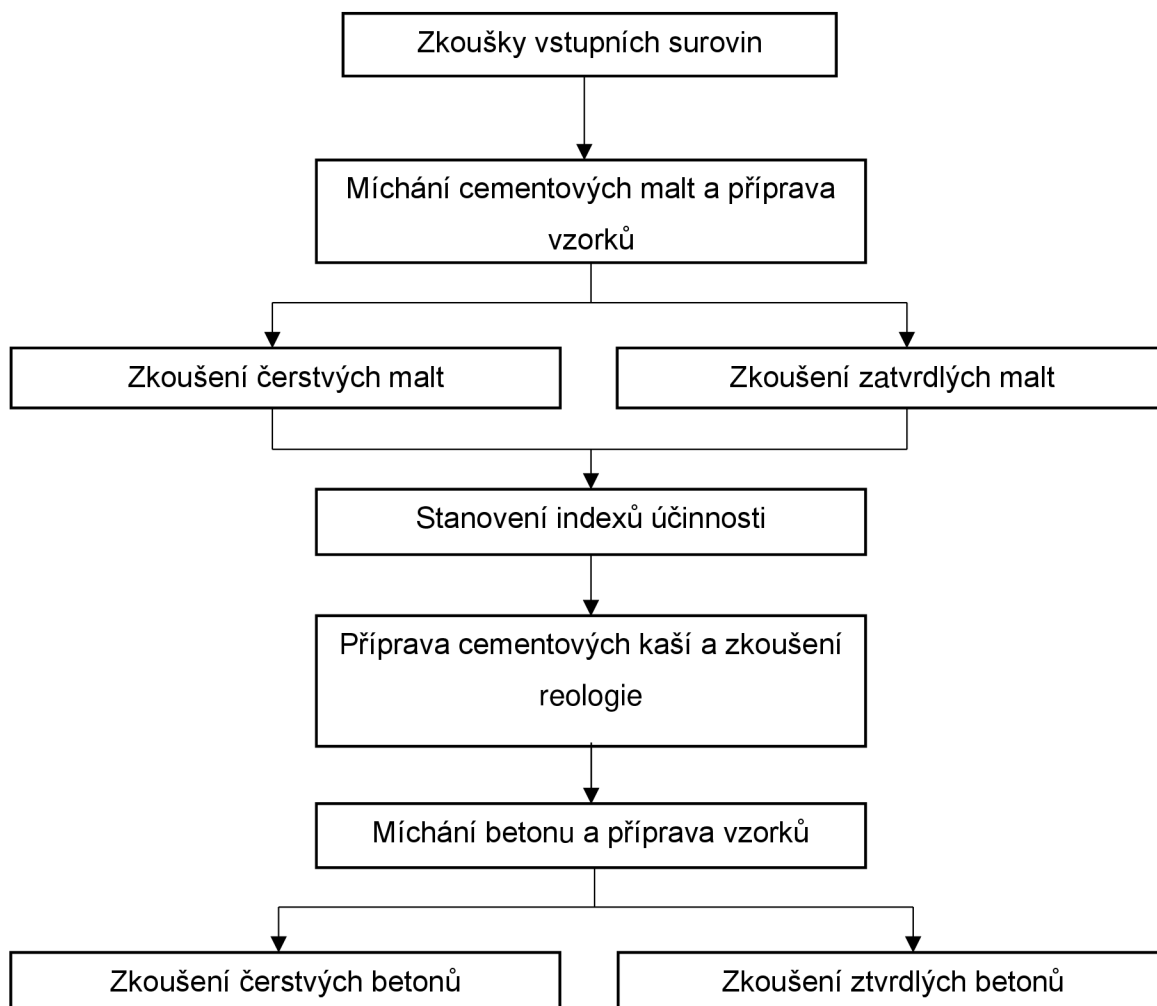
$f_0$ ... pevnost v tlaku betone bez příměsi [MPa]

$f_p$ ... pevnost v tlaku betonu s příměsí [MPa]

$A_0, B_0, A_p, B_p$ ... empirické koeficienty lineární závislosti pevnosti v tlaku na vodním součiniteli

## Experimentální část

### 9. Metodika experimentální části práce a prováděné zkoušky



Obrázek 9: Schéma metodiky experimentální části práce



## 9.1. Zkoušky vstupních surovin

### Cement a příměsi

- Stanovení měrné hmotnosti cementu/příměsi dle ČSN 72 2113+Z1: Stanovení měrné hmotnosti cementu
- Stanovení jemnosti mletí cementu/příměsi permeabilní metodou (Blain) dle ČSN EN 196-6: Metody zkoušení cementu – část 6: Stanovení jemnosti mletí
- Stanovení granulometrie cementu/příměsi pomocí laserového granulometru Mastersizer

### Kamenivo

- Stanovení zrnitosti kameniva dle ČSN EN 933-1: Zkoušení geometrických vlastností kameniva část 1: Stanovení zrnitosti – Síťový rozbor
- Stanovení objemové hmotnosti kameniva dle ČSN EN 1097-6: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti zrn a nasákavosti
- Stanovení sypané hmotnosti kameniva dle ČSN EN 1097-3: Zkoušení mechanických a fyzikálních vlastností kameniva – Část 3: Stanovení sypané hmotnosti a mezerovitosti volně sypaného kameniva

## 9.2. Postup výroby a zkoušení malt

Zkušební tělesa o rozměrech 40×40×160 mm byla vyrobena podle ČSN EN 196-1

1. Příprava vstupních surovin
2. Míchání cementových malt podle ČSN EN 196-1
3. Zkoušení konzistence čerstvých malt s použitím střešacího stolku podle ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)
4. Zkoušení objemové hmotnosti čerstvých malt podle ČSN EN 1015-6+A1: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty
5. Výroba zkušebních vzorků o rozměrech 40×40×160 mm
6. Po 24 hodinách zrání ve formě se vzorky odformují a uloží do vody
7. Zkoušení vlastností zatvrdlých malt
  - Zkoušení objemové hmotnosti ztvrdlých malt
  - Zkoušení pevnosti v tlaku ve stáří 7, 28, 56 a 90 dní

### **9.3. Postup výroby a zkoušení reologie cementových kaší**

1. Příprava vstupních surovin
2. Výroba cementových kaší
  - a. Vložení surovin do míchačky
  - b. Míchání pomalou rychlostí 30 s
  - c. Zastavení míchačky po dobu 30 s a setření kaše ze stěn nádoby
  - d. Míchání rychlou rychlostí po dobu 60 s
3. Vložení kaše do zkušební nádoby (válec)
4. Zapnutí měření na dobu 60 min s konstantní teplotou 20 °C a 60 otáčkami za minutu

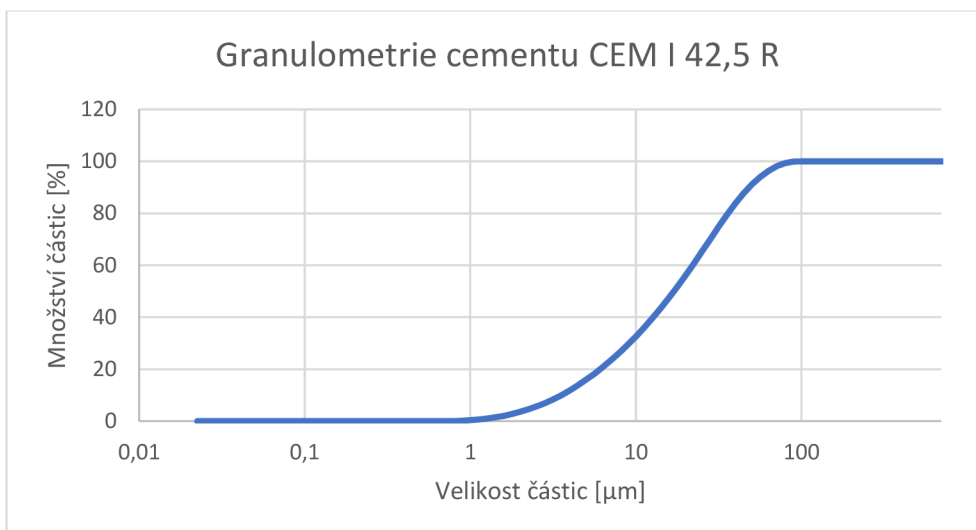
### **9.4. Postup výroby a zkoušení betonů**

1. Příprava vstupních surovin
2. Míchání betonu v horizontální míchačce s nuceným oběhem
3. Zkoušení konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – část 2: Zkouška sednutím
4. Zkoušení objemové hmotnosti čerstvého betonu podle ČSN EN 12350-6: Zkoušení čerstvého betonu – část 6: Objemová hmotnost
5. Výroba zkušebních těles ve tvaru krychle o rozměrech 100×100×100 mm
6. Po 24 hodinách zrání ve formě se vzorky odformují a uloží do vody
7. Zkoušení ztvrdlého betonu
  - Zkoušení objemové hmotnosti ztvrdlého betonu podle ČSN EN 12390-7: Zkoušení ztvrdlého betonu – část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu
  - Zkoušení pevnosti betonu v tlaku ve stáří 7, 28, 56 a 90 dní podle ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles

## **10. Popis a vlastnosti vstupních surovin**

### **10.1. Cement**

Pro výrobu cementových malt, betonů a cementových kaší na zkoušení reologie byl použit cement CEM I 42,5 R Mokrý.



Graf 1: Granulometrie cementu CEM I 42,5 R Mokrá

Tabulka 10: Fyzikální vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrá

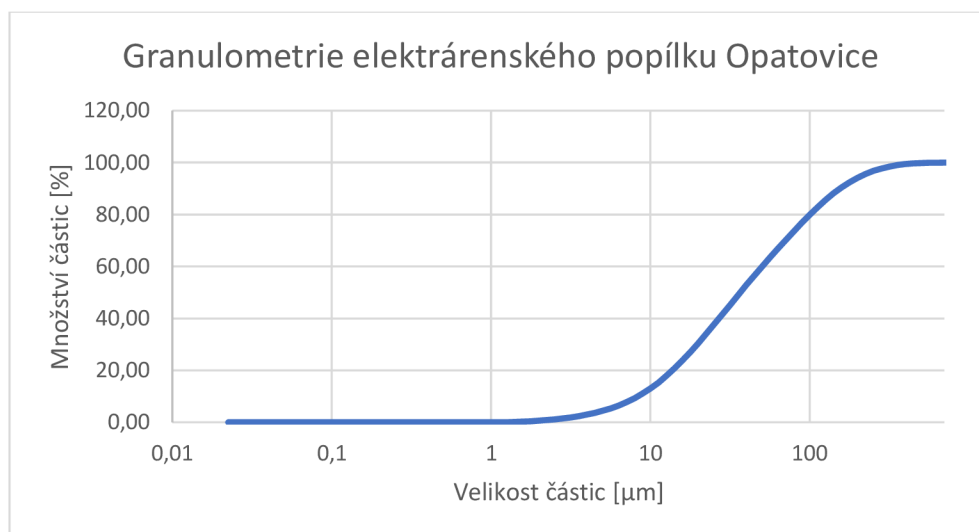
<b>Měrná hmotnost [<math>\text{kg}/\text{m}^3</math>]</b>	3100
<b>Měrný povrch [<math>\text{cm}^2/\text{g}</math>]</b>	3960

## 10.2. Příměsi

Pro výrobu malt, betonů a cementových kaší byly použity následující příměsi:

### 1. Elektrárenský popílek

Jako jedna z aktivních příměsí byl použit elektrárenský popílek z elektrárny Opatovice. Tento popílek je ze spalování hnědého uhlí.



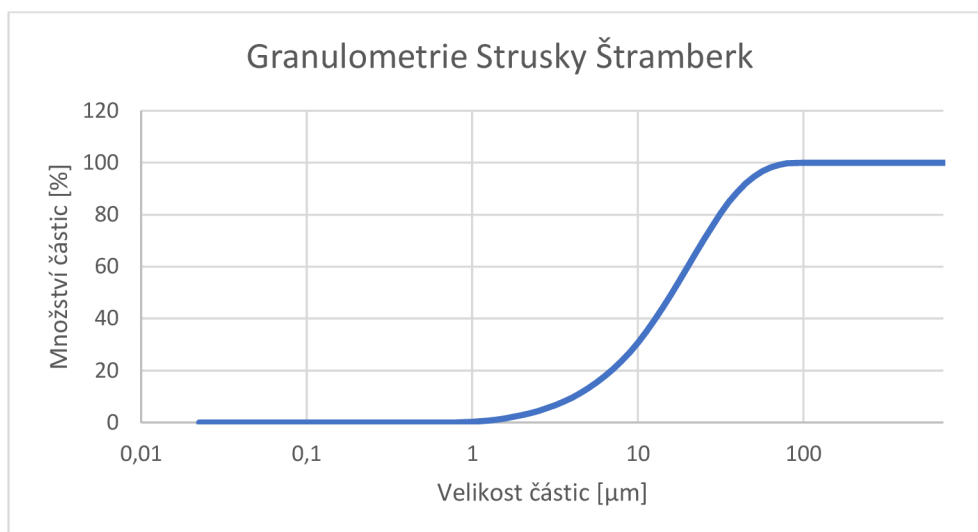
Graf 2: Granulometrie elektrárenského popílku Opatovice

Tabulka 11: Fyzikální vlastnosti popílku Opatovice

Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2150
Měrný povrch [cm <sup>2</sup> /g]	3100

## 2. Struska

Pro přípravu matl, betonů a cementových kaší byla použita jemně mletá granulovaná vysokopecní struska Kotouč Štramberk SMŠ 400.



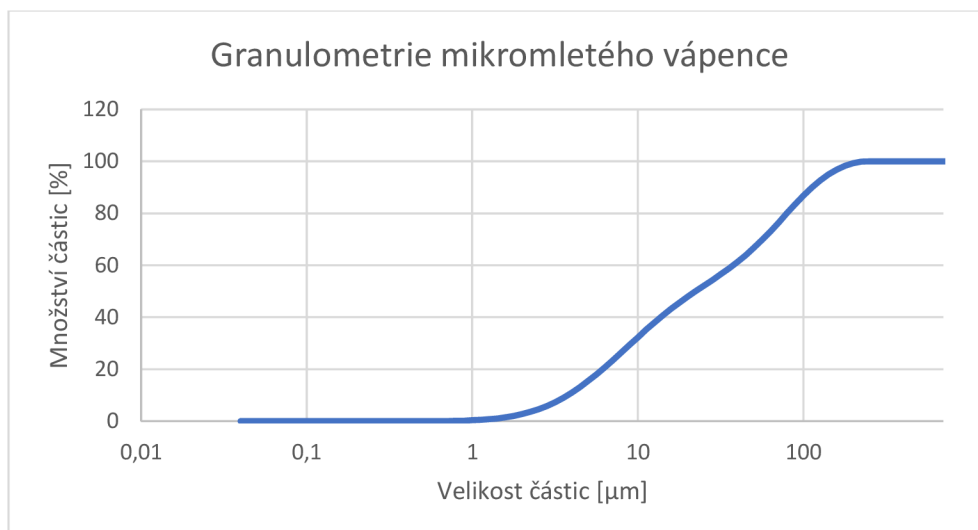
Graf 3: Granulometrie Strusky Štramberk SMŠ 400

Tabulka 12: Fyzikální vlastnosti strusky Štramberk SMŠ 400

Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2870
Měrný povrch [cm <sup>2</sup> /g]	4200

## 3. Mikromletý vápenec

Pro účely této diplomové práce byl použit komerčně produkováný mikromletý vápenec PremiaCal ze závodu Carmeuse Mokrý.



Graf 4: Granulometrie mikromletého vápence Carmeuse Mokrá

Tabulka 13: fyzikální vlastnosti mikromletého vápence Carmeuse Mokrá

Měrná hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	2710
Měrný povrch [cm <sup>2</sup> /g]	4170

### 10.3. Kamenivo

Pro výrobu cementových malt byl použit normalizovaný písek CEN o velikosti zrn 0-2 mm.

#### 1. DTK 0-4 mm, Žabčice

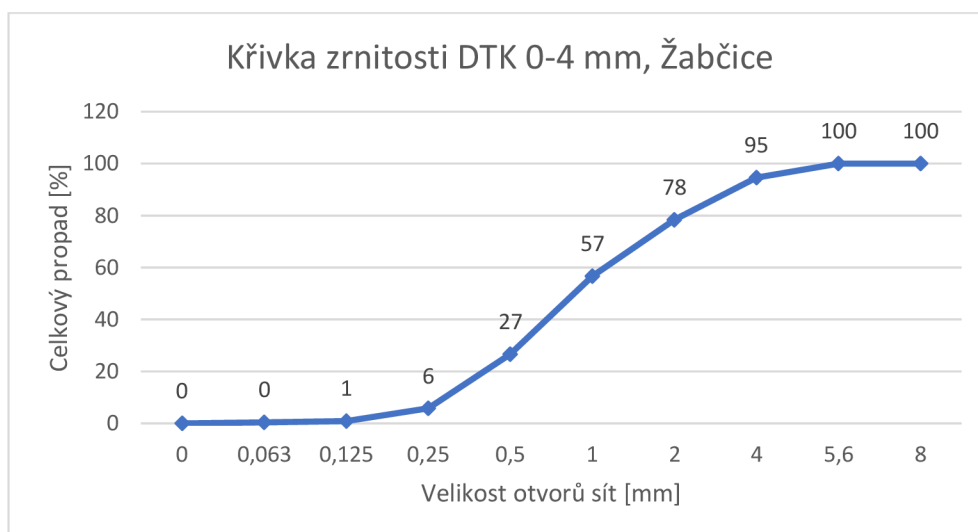
Jedná se písek žluté barvy praný ve vodě.

Tabulka 14: Stanovení procenta jemných částic

Hmotnost vysušené navážky [g]	623,22
Hmotnost vysušeného zůstatku na síť 63 μm [g]	622,89
Hmotnost propadu jemných částic [g]	0,3
Procento jemných částic [%]	0,05

Tabulka 15: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva

Velikost ok [mm]	Propad sítem [g]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
31,5	0	0	100
22,4	0	0	100
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	0	0	100
5,6	0	0	100
4	33,6	5	95
2	101,9	16	78
1	135,5	22	57
0,5	188,1	30	27
0,25	130,6	21	6
0,125	30,5	5	1
0,063	2,8	0	0
Dno	0,05	0	0



Graf 5: Křivka zrnitosti DTK 0-4 mm, Žabčice

Tabulka 16: Fyzikální vlastnosti DTK 0-4 mm, Žabčice

Objemová hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	1490
Objemová hmotnost kameniva [kg/m <sup>3</sup> ]	2660

## 2. HTK 4-8 mm, Žabčice

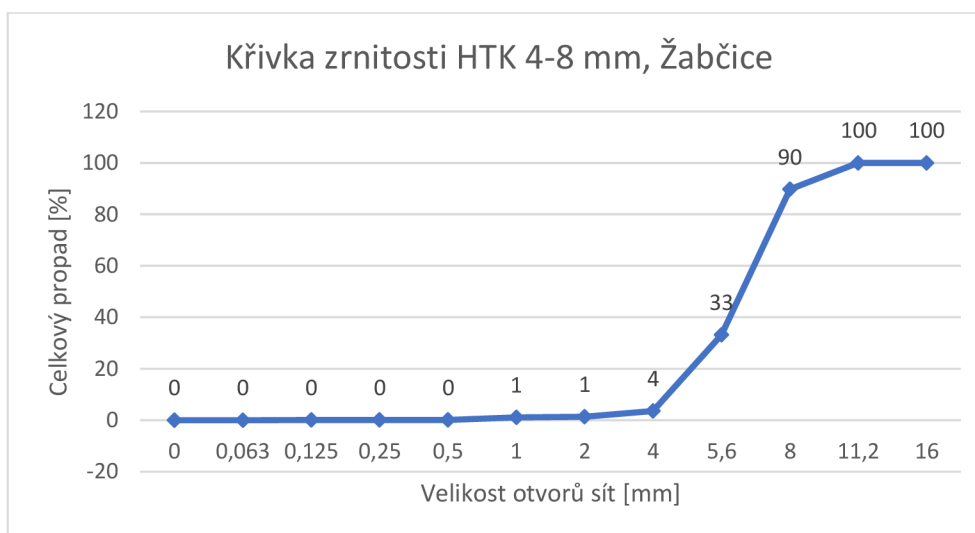
Jedná se o prané, hrubé, těžené kamenivo frakce 4-8 mm.

Tabulka 17: Stanovení procenta jemných částic

Hmotnost vysušené navážky [g]	1378,30
Hmotnost vysušeného zůstatku na síti 63 $\mu\text{m}$ [g]	1378,16
Hmotnost propadu jemných částic [g]	0,1
Procento jemných částic [%]	0,01

Tabulka 18: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva

Velikost ok [mm]	Propad sítím [g]	Celkový zbytek [%]	Celkový propad [%]
31,5	0	0	100
22,4	0	0	100
16	0	0	100
11,2	0	0	100
8	143	10	90
5,6	787,4	57	33
4	410,5	30	4
2	31,5	2	1
1	2,7	0	1
0,5	14	1	0
0,25	0,8	0	0
0,125	0,6	0	0
0,063	0,3	0	0
Dno	0,01	0	0



Graf 6: Křivka zrnitosti HTK 4-8 mm, Žabčice

Tabulka 19: Fyzikální vlastnosti HTK 4-8 mm, Žabčice

<b>Objemová hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1320
<b>Objemová hmotnost kameniva [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2620

### 3. HDK 8-16 mm, Olbramovice

Jedná se o drcené kamenivo frakce 8-16 mm.

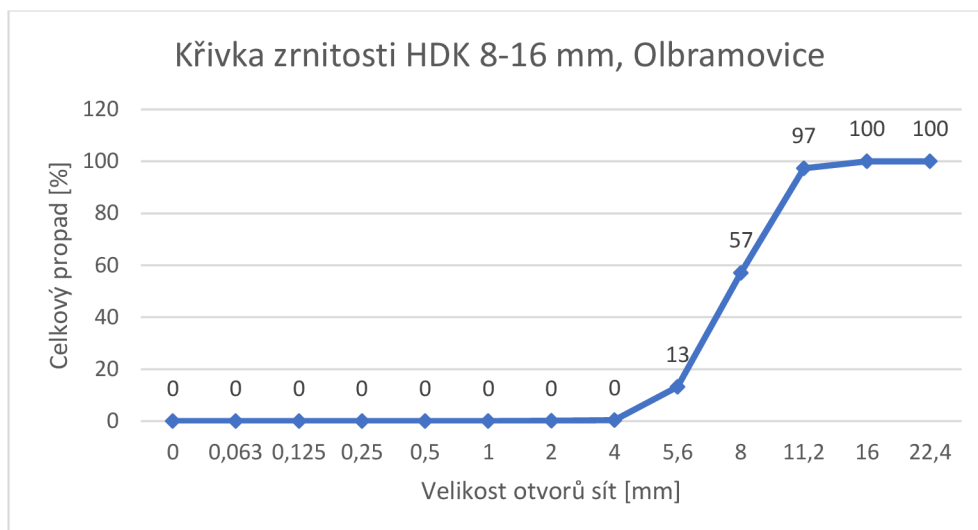
Tabulka 20: Stanovení procenta jemných částic

<b>Hmotnost vysušené navážky [g]</b>	1682,90
<b>Hmotnost vysušeného zůstatku na síti 63 μm [g]</b>	1668,00
<b>Hmotnost propadu jemných částic [g]</b>	14,9
<b>Procento jemných částic [%]</b>	0,89

Tabulka 21: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva

<b>Velikost ok [mm]</b>	<b>Propad sítím [g]</b>	<b>Celkový zbytek [%]</b>	<b>Celkový propad [%]</b>
31,5	0	0	100
22,4	0	0	100
16	44	3	97
11,2	678,09	40	57
8	739,4	44	13
5,6	214,74	13	0
4	5,16	0	0
2	0,49	0	0
1	0,06	0	0
0,5	0,09	0	0
0,25	0,13	0	0
0,125	0,19	0	0
0,063	0,34	0	0
Dno	1,0	0	0





Graf 7: Křivka zrnitosti HDK 8-16 mm, Olbramovice

Tabulka 22: Fyzikální vlastnosti HDK 8-16 mm, Olbramovice

<b>Objemová hmotnost volně sypaného kameniva [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1320
<b>Objemová hmotnost kameniva [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2620

## 10.4. Voda

Pro výrobu malt, betonů i cementových kaší byla použita voda z vodovodního řadu.

## 10.5. Plastifikační přísada

Jako plastifikační přísada byl použit Sikament 100 od firmy Sika. Jedná se o vodný roztok modifikovaných naftalenformaldehydů.

# 11. Postupy provedených zkoušek

## 11.1. Zkoušky provedené na čerstvých maltách

### 11.1.1. Konzistence čerstvých malt

Konzistence čerstvých malt byla provedena pomocí střešacího stolku podle ČSN EN 1015-3.

Hodnota konzistence se stanovuje z rozlití zkušební čerstvé malty ve dvou na sebe kolmých směrech po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešacího stolku zvedá a pak volně padá z výšky [53].

Na ovlhčený střešací stůl se doprostřed položí komolý kužel o výšce 60 mm a vnitřních průměrech 100/70 mm. Na komolý kužel se postaví nástavec. Kužel se plní ve dvou vrstvách čerstvou maltou a každá z vrstev se rozprostře deseti lehkými údery dusadla o

průměru 40 mm. Po naplnění kužele se odstraní nástavec a zbylá malta se seřízne špachtlí. Po 15 s se kovový kužel opatrně zvedne a poté se malta rozlije pomocí 15 rovnoměrných zdvihů stolku po dobu 15 s. Průměr vzniklého koláče se měří ve dvou na sebe kolmých směrech s přesností 1 mm [53].

### **11.1.2. Objemová hmotnost čerstvých malt**

Objemová hmotnost čerstvých malt byla zkoušena podle ČSN EN 1015-6+A1.

Objemová hmotnost čerstvé malty se stanoví jako poměr její hmotnosti a objemu [54].

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

D... objemová hmotnost čerstvé malty [kg/m<sup>3</sup>]

m... hmotnost malty [kg]

V... objem malty [m<sup>3</sup>]

Objemová hmotnost čerstvé malty se stanovuje ve válci o vnitřním průměru 125 mm a objemu přibližně 1 l. Válec se po navlhčení naplní zkoušenou maltou, dokud malta nepřesáhne okraj. Nádoba se poté vloží na vibrační stůl s frekvencí (50±1) Hz a vibruje se tak dlouho až nedochází k dalšímu sesedání malty. Během vibrování se přidává další malta tak, aby přesahovala nádobu. Po ukončení vibrování se nadbytečná malta seřízne pomocí špachtle, urovná se s horním okrajem nádoby a nádoba se otře vlhkou tkaninou. Dále se změří hmotnost malty s přesností 1 g. Výsledná objemová hmotnost se zaokrouhluje na 10 kg/m<sup>3</sup> [54].

## **11.2. Zkoušky provedené na zatvrdlých maltách**

### **11.2.1. Objemová hmotnost zatvrdlé malty**

Zkouška byla provedena podle ČSN EN 1015-10.

Objemová hmotnost zatvrdlých malt je závislost hmotnosti tělesa ku jeho objemu [55].

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

D... objemová hmotnost maltových trámečků [kg/m<sup>3</sup>]

m... hmotnost trámečků [kg]

V... objem trámečků [m<sup>3</sup>]

Změří se rozměry tělesa pomocí posuvného měřítka a následně se těleso zváží na laboratorních vahách. Objemová hmotnost se zaokrouhluje na 10 kg/m<sup>3</sup> [55].

### 11.2.2. Pevnost v tlaku zatvrdlých malt

Zkouška byla provedena podle ČSN EN 196-1.

Pevnost v tlaku cementové malty se zjišťuje na dvou částech trámečků po zkoušce pevnosti v tahu ohybem [41].

Poloviny trámečků se vloží bočními stranami (kolmo na směr hutnění) mezi ocelové destičky o rozměru 40×40 mm, které přesně vymezují velikost tlačné plochy nepravidelného zlomku. Vzájemná poloha horní a dolní musí být během zkoušky stálá, výslednice zatížení musí procházet středem zkušebního tělesa. Růst zatížení je (2400±200) N/s [41].

Výsledek je aritmetický průměr ze šesti hodnot pevnosti v tlaku zaokrouhlený na 0,1 MPa. Odlišuje-li se jeden výsledek ze šesti o víc než ±10 % od jejich průměrné hodnoty, vyřadí se a aritmetický průměr se spočítá ze zbývajících pěti výsledků. Pokud se odlišuje jeden z pěti zbývajících výsledků od průměru o víc než ±10 % od jejich aritmetického průměru celá zkoušená sada trámečků se vyřadí a zkouška se opakuje [41].

$$R_c = \frac{F_c}{A} [MPa]$$

$R_c$ ...pevnost v tlaku [MPa]

$F_c$ ...nejvyšší zatížení vynaložené při porušení [N]

$A$ ... 1600 – plocha pomocných destiček 40×40 mm [mm<sup>2</sup>]

### 11.3. Zkoušení reologických vlastností cementových kaší

Reologické vlastnosti byly zkoušeny na Viskomatu NT Schleibinger Geräte.

Reologické vlastnosti jsou popisovány pomocí změny torzního momentu lopatky, která je umístěna v nádobě s cementovou kaší a tato nádoba se otáčí konstantní rychlostí. Jako měřicí soustava byl použit válec a lopatka.

Nejprve se v softwaru viskomatu nastaví čas zkoušky a otáčky za minutu. Poté se namíchá zkoušená kaše a vloží se do zkušebního válce. Zapne se měření a po stanovenou dobu se měří torzní moment.



Obrázek 10: Měřicí soustava pro stanovení reologických vlastností

## 11.4. Zkoušky provedené na čerstvém betonu

### 11.4.1. Objemová hmotnost čerstvého betonu

Objemová hmotnost čerstvého betonu byla stanovena podle ČSN EN 12350-6.

Objemová hmotnost čerstvé malty se stanoví jako poměr její hmotnosti a objemu [56].

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

D... objemová hmotnost čerstvého betonu [kg/m<sup>3</sup>]

m... hmotnost betonu [kg]

V... objem betonu [m<sup>3</sup>]

Objemová hmotnost čerstvého betonu se stanovuje v nádobě s minimálním objemem 5 l. Nádoba se po navlhčení naplní zkoušenou maltou, dokud beton nepřesáhne okraj. Nádoba se poté vloží na vibrační stůl a vibruje se co nejkratší potřebnou dobu, aby došlo k úplnému zhutnění. Nádoba se ke stolu může připevnit, nebo se k němu má přitlačovat. Po ukončení vibrování se nadbytečná malta seřízne pomocí špachtle, urovná se s horním okrajem nádoby a nádoba se otře vlhkou tkaninou. Dále se změří hmotnost betonu s přesností 0,01 kg. Výsledná objemová hmotnost se zaokrouhluje na 10 kg/m<sup>3</sup> [56].

### 11.4.2. Konzistence čerstvého betonu

Zkouška byla prováděna pomocí sednutí kužele podle ČSN EN 12350-2.

Zkouška čerstvého betonu, která ukazuje konzistenci a schopnost čerstvého betonu samovolně sedat [57]

Zkušební zařízení je dutý, komolý kužel vysoký (300±2) mm s průměrem dolní základny (200±2) mm, průměrem horní základny (100±2) mm a tloušťkou stěn 1,5 mm. Dále

propichovací tyč o kruhovém průřezu ( $16\pm 1$ ) mm o délce ( $600\pm 5$ ) mm se zaoblenými konci [57].

Kužel se zafixuje na podkladní desce a neplní se čerstvým betonem ve třech vrstvách. Každá ze tří vrstev se zhutňuje 25 vpichy propichovací tyče tak, aby tyč pronikla i do nižší vrstvy. Po naplnění kužele se sejme násypka a horní okraj je zarovnan. Po uvolnění kužele od podkladní desky je kužel rovnoměrně zvedán svisle vzhůru po dobu 2 až 5 sekund. Po zvednutí kužele a ustálení čerstvého betonu je změřena výška od vrchního okraje kužele po nejvyšší bod čerstvého betonu. Výsledná hodnota je zaokrouhlena na nejbližších 10 mm. Zkouška musí být provedena do 150 sekund [57].

Tabulka 23: Stupně sednutí kužele dle ČSN EN 12350-6 [57]

Stupeň sednutí	Sednutí [mm]
S1	10 až 40
S2	50 až 90
S3	100 až 150
S4	160 až 210
S5	více jak 220

## 11.5. Zkoušky provedené na ztvrdlém betonu

### 11.5.1. Objemová hmotnost ztvrdlého betonu

Zkouška byla provedena podle ČSN EN 12390-7, Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu.

Objemová hmotnost ztvrdlých betonu je závislost hmotnosti tělesa ku jeho objemu a vypočte se podle vzorce [58]:

$$D = \frac{m}{V} [kg/m^3]$$

D... objemová hmotnost [ $kg/m^3$ ]

m... hmotnost zkušební tělesa [kg]

V... objem zkušební tělesa [ $m^3$ ]

Změří se rozměry tělesa pomocí posuvného měřítka s přesností 0,5 % a následně se těleso zváží na laboratorních vahách s přesností 0,1 % hmotnosti. Objemová hmotnost se zaokrouhluje na  $10 kg/m^3$  [58].

### 11.5.2. Pevnost betonu v tlaku

Zkouška byla provedena dle ČSN EN 12390-3: Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

Pevnost v tlaku je závislost vnější síly působící na zkušební těleso ku ploše působení na zkušební těleso až do meze porušení [59].

Před zkouškou pevnosti v tlaku je potřeba očistit dotykové plochy od zbytků písku a materiálu. Poté je těleso uloženo na střed spodní tlačné plochy s přesností 1 % velikosti krychle. Těleso je rovnoměrně zatěžováno rychlostí  $(0,6 \pm 0,2)$  MPa/s až do meze porušení. Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 MPa vypočte se podle vzorce [59]:

$$f_c = \frac{F}{A} [MPa]$$

Kde:

$f_c$ ...pevnost v tlaku [MPa]

$F_c$ ...nejvyšší zatížení vynaložené při porušení [N]

$A$ ...tlačná ploch zkušebního tělesa [mm<sup>2</sup>]

## 12. Složení receptur malt a betonů

Pro všechny receptury malt bylo použito normová cementová malta, ve kterých byla nahrazena část cementu aktivní příměsí. Cement byl nahrazen aktivní příměsí v množství 10, 30, 50 a 70 %. Ve všech recepturách bylo použito konstantní množství vody. Pro malty je zvoleno označení vzorků jako počáteční písmeno příměsi (P=popílek, S=struska...). Číslo za počátečním písmenem označuje procentuální množství příměsi, které nahrazuje portlandský cement. Pro cementové kaše pro měření reologie a betony je označení pomocí tří písmen. Pro popílek je označení POP, pro strusku STR a pro mikromletý vápenec MMV. Následuje opět číslo, které udává procentuální množství příměsi v pojivu a pokud je označení vzorku doplněno o  $P$  tak byla pro danou recepturu použita plastifikační přísada.

Tabulka 24: Receptury malt

Receptura [g]	Cement	Voda	CEN písek	Popílek Opatovice	Struska Štramberk	Mikromletý vápenec
REF	450	225	1350	-	-	-
P10	405	225	1350	45	-	-
P30	315	225	1350	135	-	-
P50	225	225	1350	225	-	-
P70	135	225	1350	315	-	-
S10	405	225	1350	-	45	-
S30	315	225	1350	-	135	-
S50	225	225	1350	-	225	-
S70	135	225	1350	-	315	-
V10	405	225	1350	-	-	45
V30	315	225	1350	-	-	135
V50	225	225	1350	-	-	225
V70	135	225	1350	-	-	315

Pro stanovení reologických vlastností cementových kaší s náhradou části cementu aktivní příměsí byly použity následující receptury:

Tabulka 25: Receptury cementových kaší

Receptura	Cement [g]	Voda [g]	Popílek [g]	Struska [g]	Vápenec [g]
REF	800	280	-	-	-
POP10	720	280	80	-	-
POP30	560	280	240	-	-
POP50	400	280	400	-	-
POP70	240	280	560	-	-
STR10	720	280	-	80	-
STR30	560	280	-	240	-
STR50	400	280	-	400	-
STR70	240	280	-	560	-
MMV10	720	280	-	-	80
MMV30	560	280	-	-	240
MMV50	400	280	-	-	400
MMV70	240	280	-	-	560

Reologie cementových kaší byla u vybraných variant množství příměsí zkoušena i pro variantu s plastifikační přísadou. Ovšem z důvodu přílišného ztekucení vzorků, které zapříčinilo to, že hodnoty torzního momentu měřené při zkoušce byly téměř neměřitelné, bylo pro tyto receptury sníženo množství vody. Vodopojivový součinitel ( $voda/(cement+příměs)$ ) se snížil z 0,35 na 0,28.

Tabulka 26: Receptury cementových kaší s plastifikační přísadou

Receptura	Cement [g]	Voda [g]	Popílek [g]	Struska [g]	Vápenec [g]	Sikament 100 (0,5 % z m <sub>p</sub> *) [g]
REF-P	800	260	-	-	-	4
POP30-P	560	260	240	-	-	4
POP50-P	400	260	400	-	-	4
STR30-P	560	260	-	240	-	4
STR50-P	400	260	-	400	-	4
MMV30-P	560	260	-	-	240	4
MMV50-P	400	260	-	-	400	4

\*) množství pojiva

Pro beton byla navržena jedna receptura, ve které byla část cementu nahrazena aktivní příměsí. Množství náhrady příměsí bylo stejně jako u cementových malt 10, 30, 50 a 70 %. Množství vody bylo upraveno tak aby pro referenční recepturu byla konzistence (sednutí kužele) (150±10) mm. Pro receptury, ve kterých byla část cementu nahrazena aktivní příměsí bylo použito stejné množství vody.

Tabulka 27: Receptury betonů

Receptura [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM I 42,5 R	Popílek	Struska	MMV	Voda	DTK Žabčice 0-4	HTK Žabčice 4-8	HDK Olbramovice 8-16
REF	350	-	-	-	219	872	246	662
POP10	315	35	-	-	219	872	246	662
POP30	245	105	-	-	219	872	246	662
POP50	175	175	-	-	219	872	246	662
POP70	105	245	-	-	219	872	246	662
STR10	315	-	35	-	219	872	246	662
STR30	245	-	105	-	219	872	246	662
STR50	175	-	175	-	219	872	246	662
STR70	105	-	245	-	219	872	246	662
MMV10	315	-	-	35	219	872	246	662
MMV30	245	-	-	105	219	872	246	662
MMV50	175	-	-	175	219	872	246	662
MMV70	105	-	-	245	219	872	246	662

V další fázi byly namíchány betony s plastifikační přísadou. Pro betony s plastifikační přísadou byla zvolena náhrada cementu 30 a 50 %. Pro betony s plastifikační přísadou bylo množství záměsové vody pro všechny betony optimalizováno tak, aby sednutí kužele těchto betonů bylo (150±10) mm.



Tabulka 28: Receptury betonů s plastifikační přísadou

Použité suroviny [kg/m <sup>3</sup> ]	REF-P	POP30-P	POP50-P	STR30-P	STR50-P	MMV 30-P	MMV 50-P
CEM I 42,5 R	350	245	175	245	175	245	175
Popílek Opatovice	-	105	175	-	-	105	175
Struska Štramberk	-	-	-	105	175	-	-
Mikromletý vápenec	-	-	-	-	-	105	175
Voda	203	192	185	202	192	190	193
DTK Žabčice 0-4	872	872	872	872	872	872	872
HTK Žabčice 4-8	246	246	246	246	246	246	246
HDK Olbramovice 8-16	662	662	662	662	662	662	662
Sikament 100 (0,9 % z m <sub>p</sub> *)	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15	3,15

\*) množství pojiva

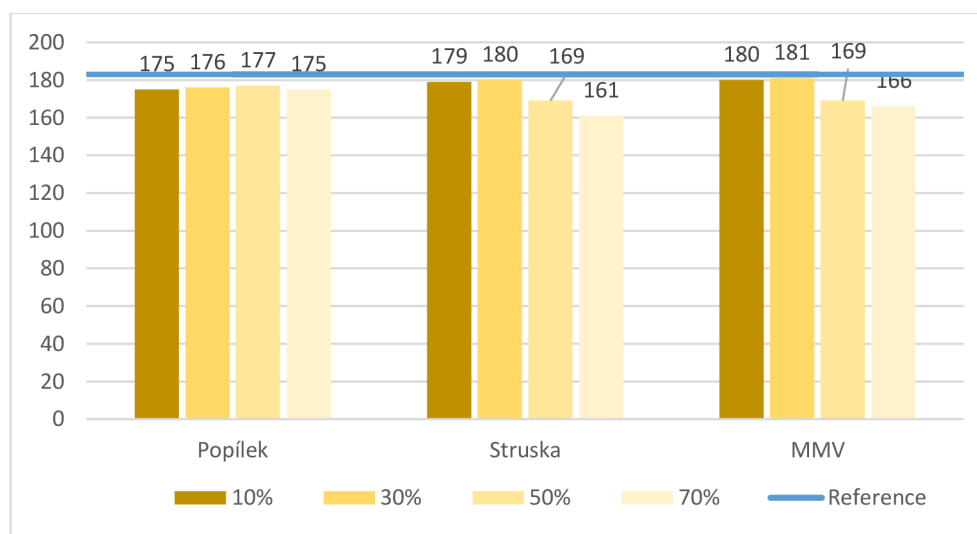
## 13. Výsledky a vyhodnocení zkoušek

### 13.1. Výsledky zkoušek čerstvých a zatvrdlých malt

#### 13.1.1. Konzistence čerstvých malt

Tabulka 29: Konzistence čerstvých malt

Náhrada cementu [% z m <sub>c</sub> ]	Popílek [mm]	Struska [mm]	MMV [mm]	Reference [mm]
0	-	-	-	183
10	175	179	180	-
30	176	180	181	-
50	177	169	169	-
70	175	161	166	-



Graf 8: Konzistence čerstvých malt

V případě elektrárenského popílku z elektrárny Opatovice došlo ve všech náhradách prakticky k totožnému snížení konzistence. Konzistence se průměrně u všech náhrad cementu elektrárenským popílkem snížila o 8 mm (o 5 %). Z toho lze usoudit, že popílek nemá výrazný vliv na konzistenci čerstvých malt. To je pravděpodobně způsobeno kulovitými zrny popílku.

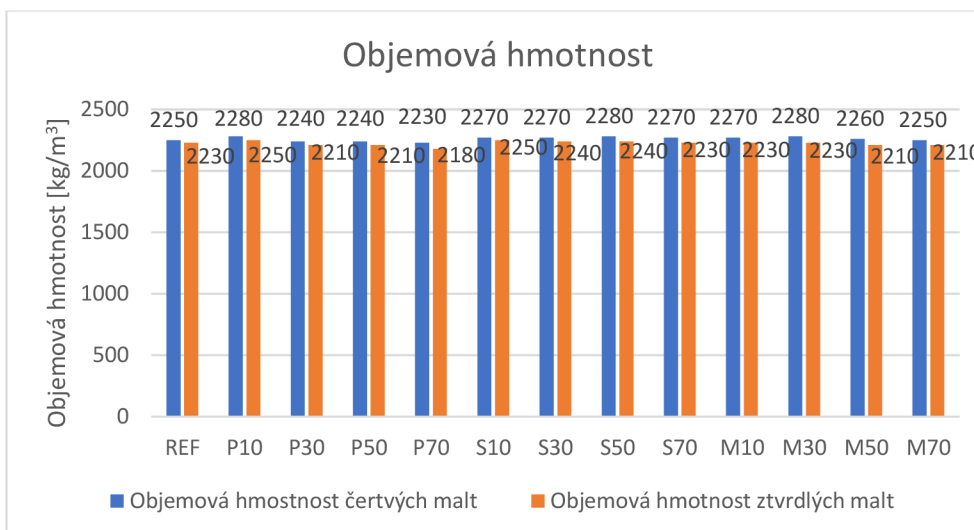
V případě jemně mleté granulované, vysokopecní strusky nedošlo až do náhrady 30 % k téměř žádnému snížení konzistence. Při náhradě 50 % cementu struskou došlo ke snížení konzistence o 8 % a v náhradě cementu 70 % strusky došlo ke snížení o 12 %. Z toho lze usoudit, že struska až do náhrady 30 % nemá vliv na konzistenci betonu, ale při vyšších dávkách už konzistenci snižuje. To může být pravděpodobně způsobeno tím, že struska je jemně mletá, proto má nepravidelnější tvar.

Mikromletý vápenec má velmi podobný průběh konzistencí jako struska. Až do náhrady 30 % se konzistence nemění a s vyšší náhradou klesá velmi podobně jako u strusky.

### 13.1.2 Objemová hmotnost

Tabulka 30: Objemová hmotnost čerstvých a zatvrdlých malt

Receptura	Objemová hmotnost čerstvé malty [kg/m <sup>3</sup> ]	Objemová hmotnost zatvrdlé malty [kg/m <sup>3</sup> ]
REF	2250	2230
P10	2280	2250
P30	2240	2210
P50	2240	2210
P70	2230	2180
S10	2270	2250
S30	2270	2240
S50	2280	2240
S70	2270	2230
M10	2270	2230
M30	2280	2230
M50	2260	2210
M70	2250	2210



Graf 9: Objemová hmotnost čerstvých a zatvrdlých malt

U všech receptur došlo podle očekávání ke snížení objemové hmotnosti po zatvrdnutí vzorků. Toto snížení objemové hmotnosti je způsobeno odchodem nadbytečné (technologické) vody potřebné pro zpracovatelnost malt. Snížení objemové hmotnosti bylo od 20 do 50 kg/m<sup>3</sup>. Objemové hmotnosti po přidání elektrárenského popílku se při náhradě 10 % cementu mírně zvýšily, pravděpodobně díky chybě v měření, způsobené malým počtem vzorků. Dále se zvyšujícím se množstvím popílku v pojivu se objemové hmotnosti snižovaly. Pro maximální náhradu cementu (70 %) popílkem se objemová hmotnost snížila oproti referenční o 20 kg/m<sup>3</sup> pro čerstvou maltu a o 50 kg pro zatvrdlou maltu.

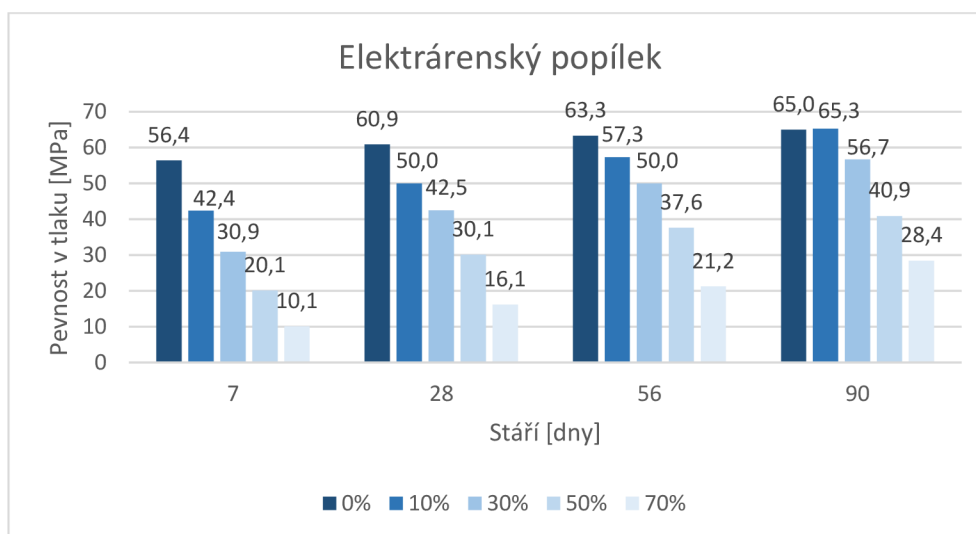
Při náhradě cementu struskou Štramberk nedošlo k výrazné změně objemové hmotnosti ve všech náhradách cementu jak v čerstvém, tak i v zatvrdlém stavu.

U mikromletého vápence nedošlo až do náhrady 30 % cementu k žádné změně objemové hmotnosti v čerstvém stavu. V čerstvém stavu došlo naopak k mírnému zvýšení objemových hmotností, a to o 20-30 kg/m<sup>3</sup>. Při vyšších dávkách už se objemová hmotnost snižovala. Celkově se objemové hmotnosti u všech příměsí příliš neměnily, proto lze usoudit, že náhrada cementu různými příměsemi nemá výrazný vliv na objemové hmotnosti.

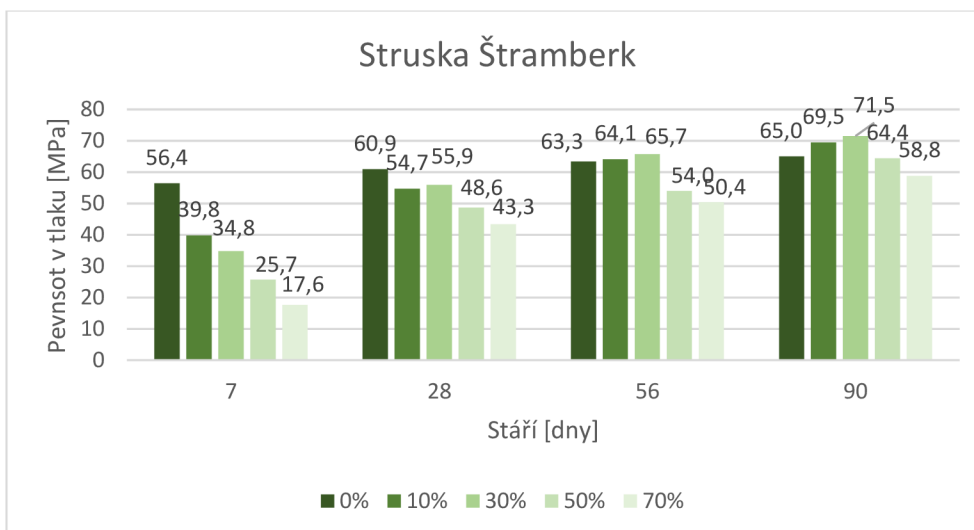
### 13.1.3. Pevnost v tlaku

Tabulka 31: Pevnost v tlaku cementových malt

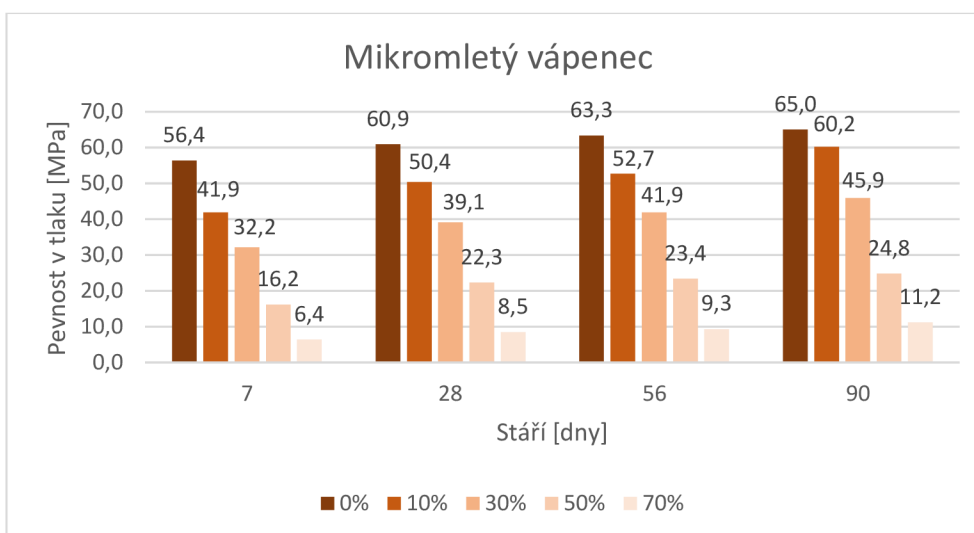
Pevnost v tlaku [MPa]					
Příměs	Náhrada [%]	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
Referenční	0	<b>56,4</b>	<b>60,9</b>	<b>63,3</b>	<b>65,0</b>
Popílek	10	<b>42,4</b>	50,0	57,3	65,3
	30	30,9	42,5	50,0	56,7
	50	20,1	30,1	37,6	40,9
	70	10,1	16,1	21,2	28,4
Struska	10	39,8	54,7	64,1	69,5
	30	34,8	<b>55,9</b>	<b>65,7</b>	<b>71,5</b>
	50	25,7	48,6	54,0	64,4
	70	17,6	43,3	50,4	58,8
Vápenec	10	41,9	50,4	52,7	60,2
	30	32,2	39,1	41,9	45,9
	50	16,2	22,3	23,4	24,8
	70	<b>6,4</b>	<b>8,5</b>	<b>9,3</b>	<b>11,2</b>



Graf 10: Pevnost v tlaku pro malty s elektrárenským popílkem



Graf 11: Pevnost v tlaku pro malty se Struskou Štramberk



Graf 12: pevnost v tlaku pro malty s mikromletým vápencem

Referenční receptura dosahovala nejvyšší nárůst pevností ve stáří 7 dní. Po dalším zrání až do 90 dní se pevnost v tlaku zvyšovala pouze o několik MPa. V případě popílku z tepelné elektrárny Opatovice docházelo ve stáří 7 dní se zvyšující se náhradou cementu ke snižování pevností. V případě 70% náhrady cementu došlo až k poklesu na 18 % pevnosti referenčního betonu. Tento trend se projevoval až do stáří 56 dní. Ve stáří 90 dní dosahoval popílek téměř stejné pevnosti v tlaku jako referenční receptura. Pro tuto náhradu (10 %) došlo ve stáří 56 dní k menšímu snížení pevnosti než u vyšších náhrad. Pro náhradu 30 % došlo po 56 a 90 dnech zrání také k nižšímu poklesu pevností.

Pro jemně mletou granulovanou vysokopecní strusku byl průběh pevností po 7 dnech stejný jako u elektrárenského popílku, ale s tím rozdílem, že pokles počátečních pevností byl větší. Ve stáří 28 dní se však průběh pevností zcela změnil. Nejvyšší pevnosti dosahovala malta s 30% náhradou cementu struskou. Tato hodnota byla stále nižší než hodnota referenční

malty, ale pouze o 8 %. Po 56denním zrání malty dosáhla struska v náhradě 10 a 30 % již vyšších pevností než referenční receptura. Vyšší náhrady měly pevnosti stále nižší než referenční malta, a to o 15 % pro náhradu 50 % a o 20 % pro náhradu 70 % cementu. Ve stáří 90 dní opět pevnosti v tlaku malty s 10 a 30 % náhrady cementu dosáhly vyšších pevností než reference. V případě náhrady 50 % cementu se pevnost v tlaku téměř nelišila od referenční hodnoty a 70% náhrada měla nižší pevnost pouze o 9 % než referenční hodnota.

Při nahrazení cementu mikromletým vápencem se pevnosti ve všech stářích snižovaly společně se zvyšující se náhradou cementu. K nejnižšímu poklesu došlo v případě 10 a 30% náhrady cementu, ale ve vyšších náhradách nedosahovaly pevnosti ani polovičních hodnot referenční receptury.

#### 13.1.4. Stanovení indexu účinnosti

Index účinnosti byl stanoven podle vzorce:

$$I_u = \frac{f_{c,p}}{f_{c,ref}} \cdot 100$$

Kde:

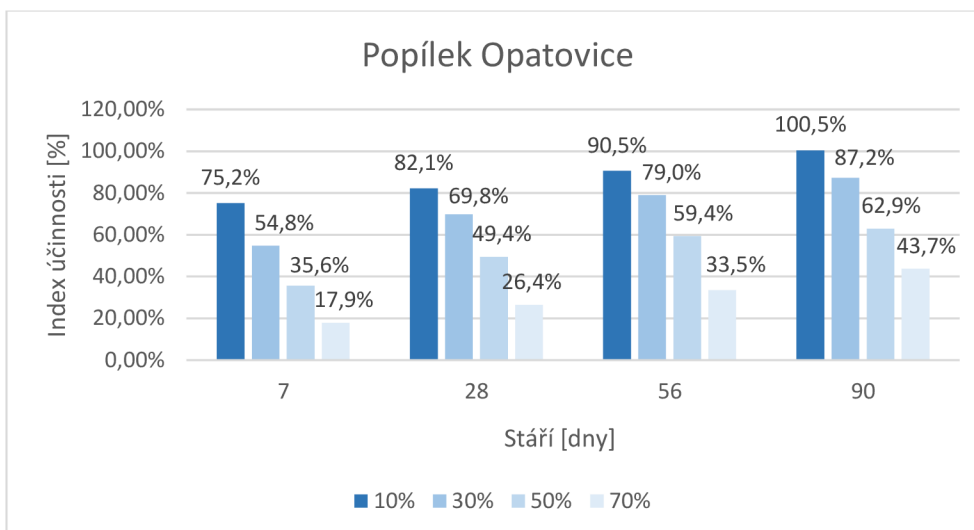
$I_u$ ... Index účinnosti [%]

$f_{c,p}$ ... pevnost v tlaku malty s příměsí [MPa]

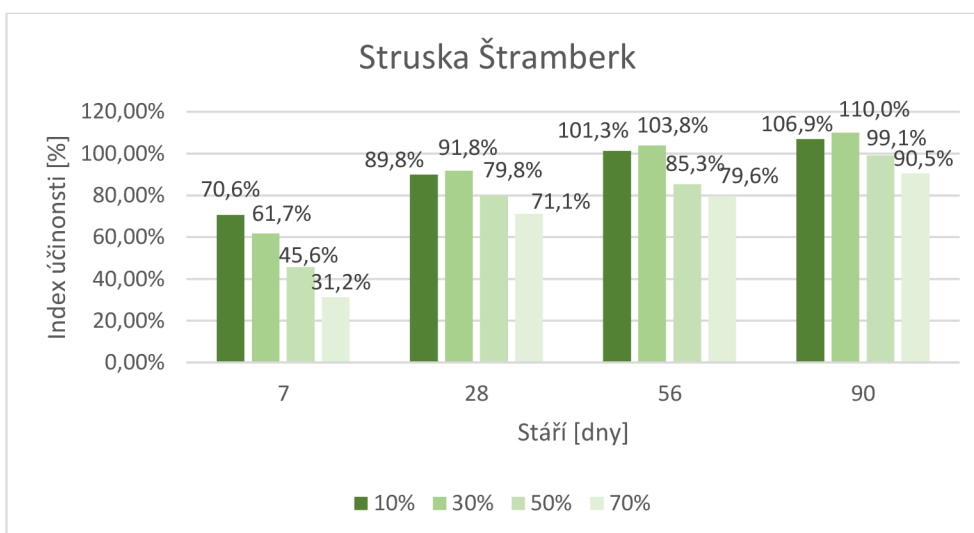
$f_{c,ref}$ ... Pevnost v tlaku referenční malty [MPa]

Tabulka 32: Indexy účinnosti pro dané příměsi

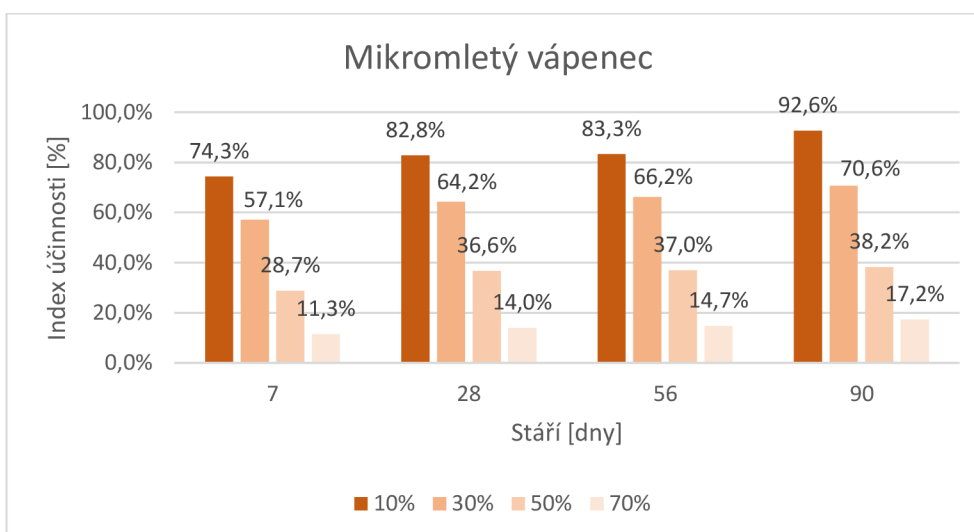
Index účinnosti [%]					
Příměs	Náhrada [%]	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
Popílek	10	<b>75,18</b>	82,10	90,52	100,46
	30	54,79	69,79	78,99	87,23
	50	35,64	49,43	59,40	62,92
	70	17,91	26,44	33,49	43,69
Struska	10	70,57	89,82	101,26	106,92
	30	61,70	<b>91,79</b>	<b>103,79</b>	<b>110,00</b>
	50	45,57	79,80	85,31	99,08
	70	31,21	71,10	79,62	90,46
Vápenec	10	74,29	82,76	83,25	92,62
	30	57,09	64,20	66,19	70,62
	50	28,72	36,62	36,97	38,15
	70	<b>11,35</b>	<b>13,96</b>	<b>14,69</b>	<b>17,23</b>



Graf 13: Index účinnosti pro popílek Opatovice



Graf 14: Index účinnosti pro strusku Štramberk



Graf 15: Index účinnosti pro mikromletý vápenec

Pro popílek Opatovice dosahoval index účinnosti nejvyšších hodnot pro náhradu 10 %. S navyšující se náhradou cementu elektrárenským popílkem se index účinnosti snižoval. V 7 dnech dosahoval index účinnosti v náhradě 10 % cementu 75,18 %. Pro náhradu 70 % cementu byl index účinnosti pouze 17,91 %. S dalším zráním malt se jednotlivé indexy zvyšovaly. Ve stáří 90 dní dosáhl index účinnosti pro maltu s náhradou 10 % cementu popílkem indexu účinnosti 100,46 % a pro náhradu 30 % byl index účinnosti 87,23 %. Z toho lze usoudit, že optimální dávka popílku do cementových malt je do 30 % náhrady cementu pro dlouhodobé zrání malt, protože pokles pevností není tak zásadní. Při použití vyššího množství popílku, než je 50 % pak nedosahují indexy účinnosti až do stáří 90 dní ani 50 %.

V případě strusky Štramberk jsou hodnoty indexu účinnosti ve stáří 7 dní větší než indexy účinnosti popílku v náhradách 30-50 %. Po 28 dnech zrání se trend indexů účinnosti velmi liší od průběhu elektrárenské popílku. Indexy účinnosti strusky jsou větší než u popílku a jejich nevyšší hodnota je při náhradě 30 % cementu, nikoliv 10 % jak je to v případě popílku. S dalším zráním se indexy účinnosti strusky Štramberk dále zvyšují a ve stáří 56 dní přesahují až do náhrady 30 % hranici 100 %. Vyšší dávky strusky také výrazněji přispívají k vyšším pevnostem cementových malt a v náhradě 70 % cementu struskou je index účinnosti téměř 80 %. Ve stáří 90 dní je trend podobný, ale i malta s 50 % strusky v pojivu dosahuje téměř 100 % a náhrada 70 % dosahuje indexu účinnosti 90 %. Z těchto hodnot lze usoudit že struska je daleko aktivnější než popílek a pro běžné stáří (28 dní) je nejvhodnější použití 30 % náhrady cementu. Z dosažených výsledků také můžeme konstatovat, že neaktivnější je kombinace 70 % cementu a 30 % strusky, protože tato kombinace dosahuje ve stáří 28-90 dní nejvyšších indexů účinnosti.

Mikromletý vápenec dosahuje, stejně jako elektrárenský popílek, nejvyšších indexů účinnosti při 10% náhradě cementu vápencem. Pro další náhrady nedosahovaly indexy účinnosti pro tuto příměs ani 70 %. Na indexech účinnosti se neprojevil ani očekávaný nárůst počátečních pevností. Podle těchto výsledků lze usoudit, že vhodné množství mikromletého vápence obsažené v pojivu je 10 % nebo mírně vyšší.

#### **13.1.5. Stanovení funkce pevnosti**

Na základě dosažených výsledků pevností v tlaku lze pomocí regresní analýzy stanovit empirické závislosti pevnosti v tlaku, stáří a množství příměsi. V tomto případě jsou tyto závislosti vytvořeny pomocí software Matlab a jeho funkce Curve Fitting. Pro stanovení této závislosti byl sestaven předpis funkce pevnosti v tlaku závislý na stáří vzorků a množství příměsi [64]:



$$f_c = a + b \cdot p + c \cdot p^2 + d \cdot \ln(\tau) + e \cdot p \cdot \tau + f \cdot p^2 \cdot \tau + g \cdot p \cdot \tau^2$$

Kde:

$f_c$ ... pevnost v tlaku [MPa]

a, b, c, d, e, f, g... empiricky stanovené koeficienty [-]

p... množství příměsi [-]

$\tau$  = stáří zatvrdlé malty [dny]

V našem případě je množství příměsi upraveno podle následujícího vzorce:

$$p = \frac{m_p}{m_c + m_p}$$

Kde:

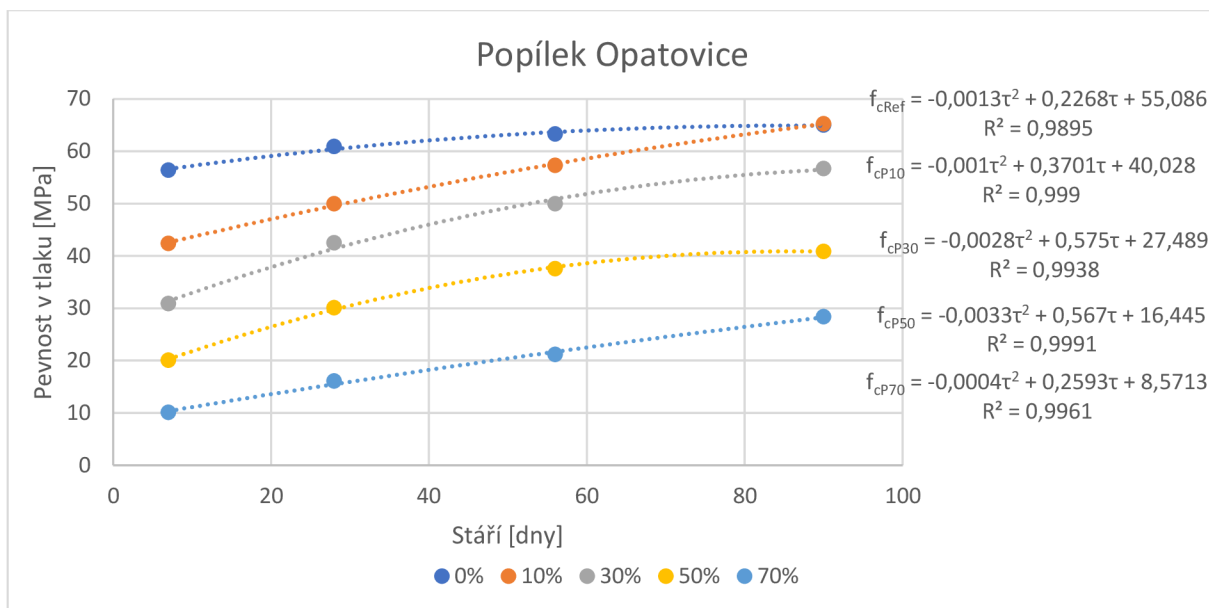
p... Množství příměsi [-]

$m_p$ ... množství příměsi ve zkoušené maltě [g]

$m_c$ ... množství cementu ve zkoušené maltě [g]

Tato funkce nám umožní po dosazení neznámých hodnot např. požadované pevnosti a stáří, dopočítat třetí neznámou v tomto případě množství příměsi potřebné pro kombinaci cementu CEM I 42,5 R a dané příměsi, které bude mít daném stáří požadovanou pevnost v tlaku. Protože byly výsledky stanovovány experimentálně a s nízkým množstvím vzorků vchází do rovnic určitá odchylka, která je popisována v našem případě koeficientem determinace ( $R^2$ ), který popisuje míru kvality regresního modelu. Dosahuje hodnot 0-1 (1=dokonalá predikce, 0=model je zcela neúčinný). Možnosti využití této funkce jsou v našem případě omezené maximální hodnotou použitého množství příměsi (0,7) a maximálním stářím (90 dní). Pokud bychom zadali vyšší hodnoty než výše uvedené, budou výsledky velmi nepřesné, protože se nejedná o experimentálně ověřené hodnoty [61].

### 13.1.4.1. Funkce pevnosti pro popílek Opatovice



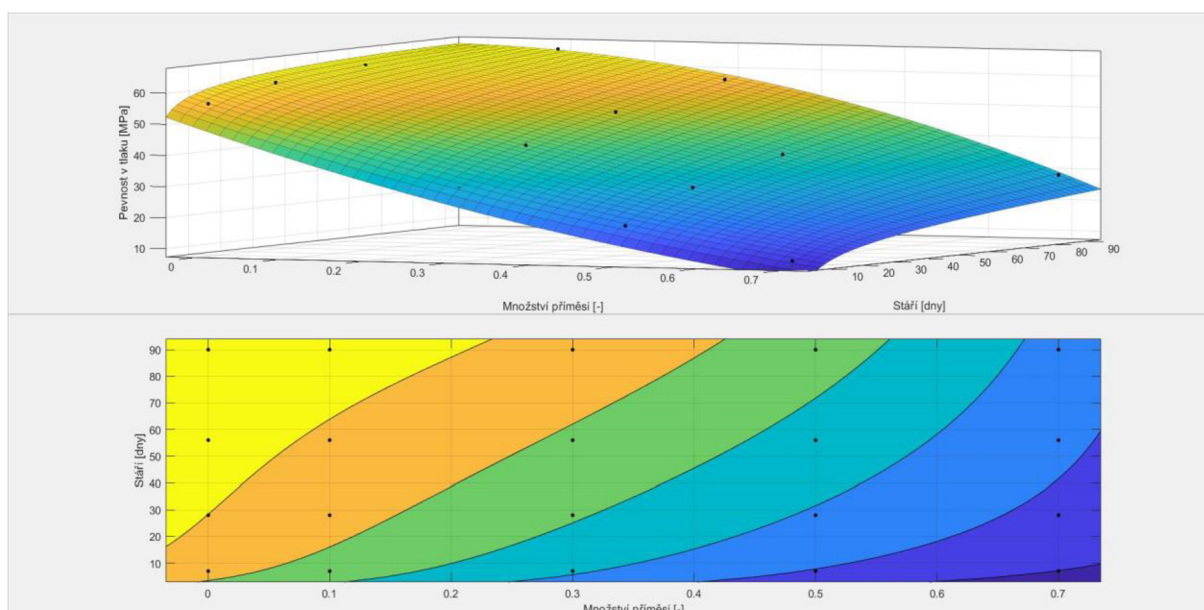
Graf 16: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro popílek Opatovice

Pro popílek Opatovice má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 44,34 - 86,63 \cdot p + 37,08 \cdot p^2 + 4,683 \cdot \ln(\tau) + 0,8299 \cdot p \cdot \tau - 1,097 \cdot p^2 \cdot \tau - (2,286 \cdot 10^{-4}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9896$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečně naměřené hodnoty.



Obrázek 11: Grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Opatovice

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro popílek Opatovice jsou uvedeny v tabulce 33. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 34.

Tabulka 33: Pevnosti vypočtené z funkce pro popílek Opatovice

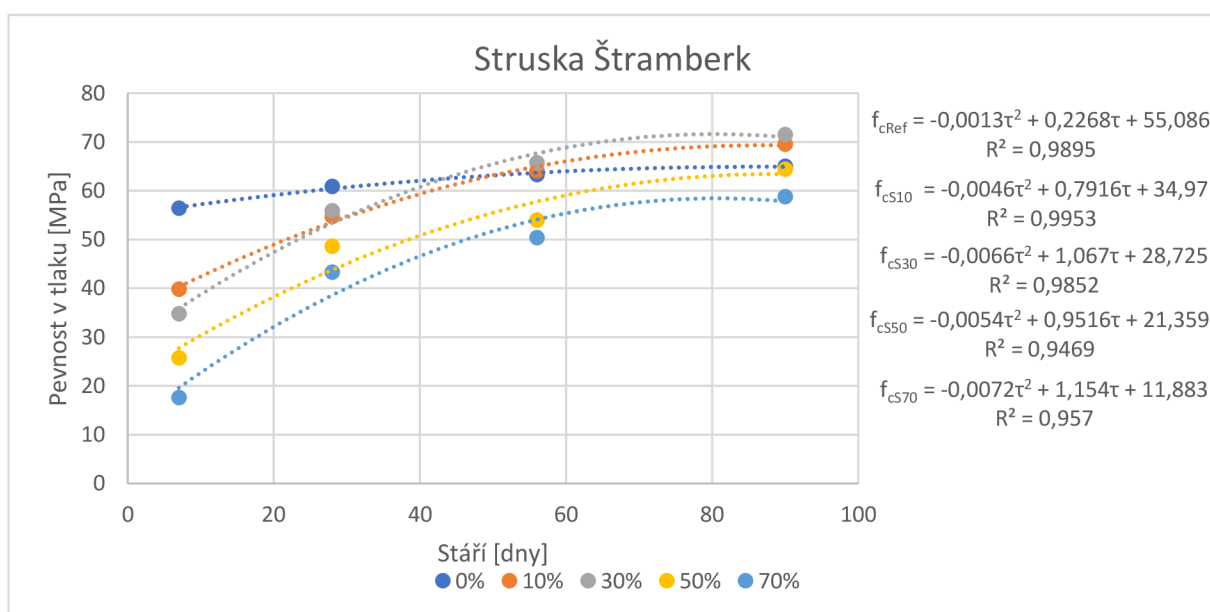
Pevnost v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	53,5	59,9	63,2	65,4
0,1	45,7	53,7	58,9	63,4
0,3	31,8	41,4	48,7	55,7
0,5	20,4	29,7	36,7	43,1
0,7	11,3	18,6	22,6	25,6

Tabulka 34: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	-2,9	-1,0	-0,1	0,4
0,1	3,3	3,7	1,6	-1,9
0,3	0,9	-1,1	-1,3	4,4
0,5	0,3	-0,4	-0,9	2,2
0,7	1,2	2,5	1,4	-2,8

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 2,0 MPa.

### 13.1.4.2. Funkce pevnosti pro strusku Štramberk



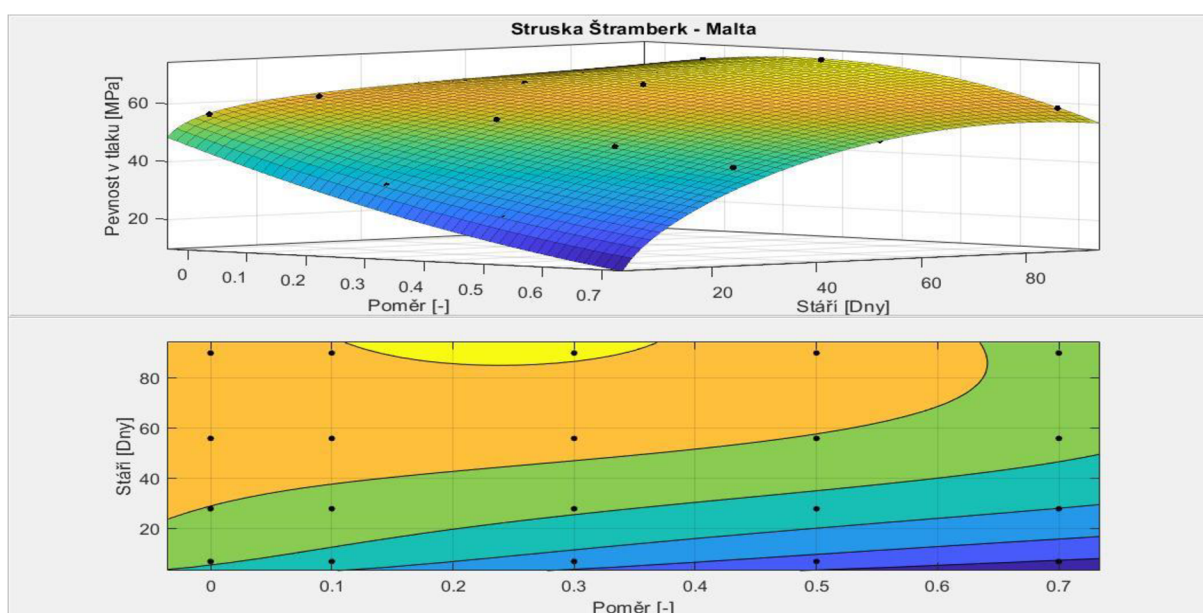
Graf 17: Závislost pevnosti v tlaku na stáří pro strusku Štramberk

Pro strusku Štramberg má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 39,68 - 73,53 \cdot p + 29,18 \cdot p^2 + 6,029 \cdot \ln(\tau) + 1,836 \cdot p \cdot \tau - 1,07 \cdot p^2 \cdot \tau + (7,334 \cdot 10^{-3}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9586$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečné naměřené hodnoty.



Obrázek 12: Grafické znázornění funkce pevnosti pro strusku Štramberg

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro strusku Štramberg jsou uvedeny v tabulce 35. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 36.

Tabulka 35: Pevnosti vypočtené z funkce pro strusku Štramberg

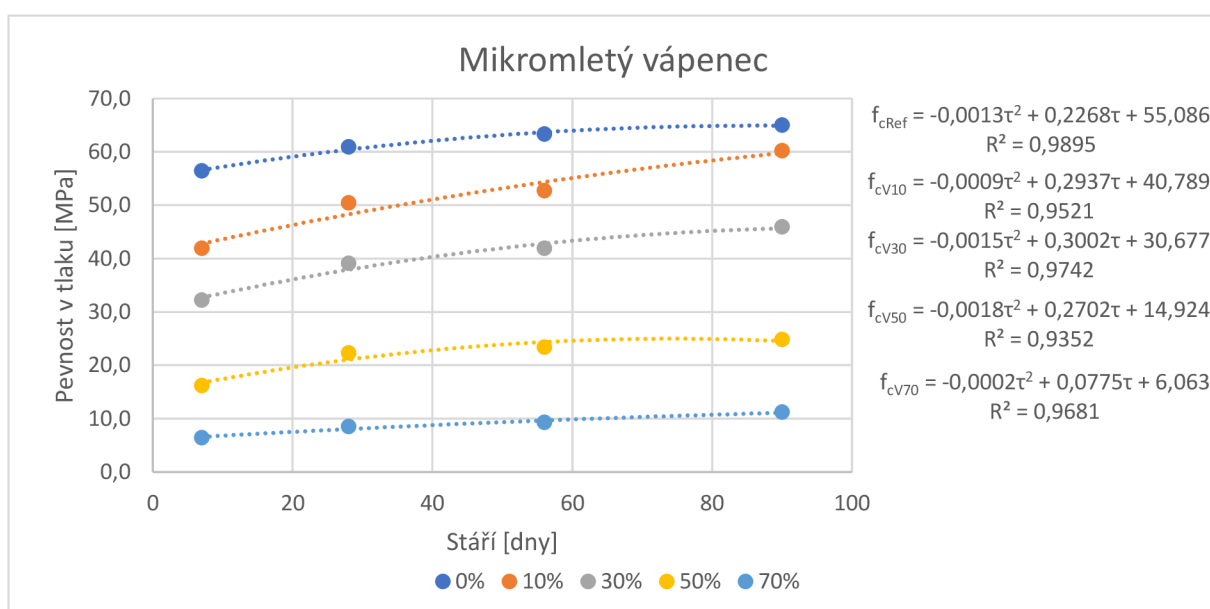
Množství příměsi p [-]	Pevnost v tlaku [MPa]			
	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	51,4	59,8	63,9	66,8
0,1	45,5	57,0	64,3	69,4
0,3	35,1	51,3	63,1	70,5
0,5	26,3	45,6	59,4	66,2
0,7	19,3	39,9	53,3	56,5

Tabulka 36: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří τ [dny]			
	7	28	56	90
0	-5,0	-1,1	0,6	1,8
0,1	5,7	2,3	0,2	-0,1
0,3	0,3	-4,6	-2,6	-1,0
0,5	0,6	-3,0	5,4	1,8
0,7	1,7	-3,4	2,9	-2,3

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 2,9 MPa.

### 13.1.4.2. Funkce pevnosti pro mikromletý vápenec



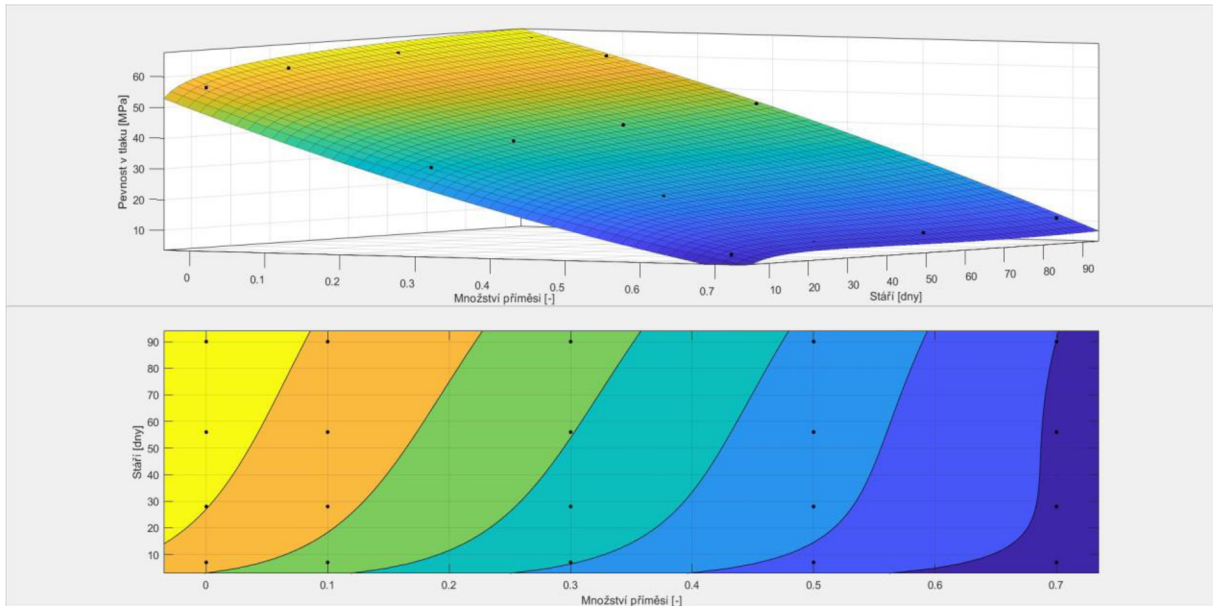
Graf 18: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro mikromletý vápenec

Pro mikromletý vápenec má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 45,14 - 86,41 \cdot p + 28,62 \cdot p^2 + 4,506 \cdot \ln(\tau) + 0,08987 \cdot p \cdot \tau - 0,5417 \cdot p^2 \cdot \tau + (1,627 \cdot 10^{-3}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9918$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečné naměřené hodnoty.



Obrázek 13: Grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro mikromletý vápenec, jsou uvedeny v tabulce 37. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 38.

Tabulka 37: Pevnosti vypočtené z funkce pro mikromletý vápenec

Pevnost v tlaku [MPa]				
Množství příměsí p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	53,9	60,2	63,3	65,4
0,1	45,6	52,0	55,6	58,7
0,3	30,4	36,6	40,2	44,1
0,5	17,3	22,2	24,7	27,8
0,7	6,1	8,9	9,0	10,0

Tabulka 38: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsí p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	-2,5	-0,7	0,0	0,4
0,1	3,7	1,6	2,9	-1,5
0,3	-1,8	-2,5	-1,7	-1,8
0,5	1,1	-0,1	1,3	3,0
0,7	-0,3	0,4	-0,3	-1,2

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 1,8 MPa.

Funkce pevnosti pro jednotlivé příměsi se liší pouze v koeficientech stanovených pomocí regresní analýzy a v jejich koeficientech determinace. Funkce pro popílek Opatovice má koeficient determinace 0,9896. Z toho lze usoudit, že funkce je vysoce přesná. K nejvyšším odchylkám dochází zejména pro náhrady 10 % cementu popílkem, a to ve stáří 7 a 28 dní. Dále je nejvyšší odchylka pro náhradu 30 % cementu popílek ve stáří 90 dní. Směrodatná odchylka z rozdílů skutečných a vypočtených hodnot je 2,0 MPa.

Funkce stanovená pro strusku Štramberk je nejméně přesná ze všech stanovovaných funkcí. Její koeficient determinace je 0,9586. I v tomto případě dochází k nejvyšším odchylkám v počátečních stářích a to pro 10 % náhrady cementu struskou tak i pro vypočítanou 0% náhradu. Směrodatná odchylka rozdílů hodnot pevností od vypočtených hodnot je 2,9 MPa.

Pro mikromletý vápenec je funkce nejpřesnější a její koeficient determinace dosahuje hodnoty 0,9918. Stejně jako v předchozích případech dochází k největší odchylce pro ranné stáří a nízké náhrady cementu vápence. Směrodatná odchylka skutečných hodnot pevností od vypočtených je v tomto případě pouze 1,8 MPa.

#### **13.1.4.3. Možnosti stanovení indexu účinnosti z funkcí pevností**

Ze stanovených funkcí pevností v závislosti na čase a množství příměsi ( $f_{c(\tau,p)}$ ) lze pomocí softwaru Matlab sestavit podobným způsobem grafy, které zobrazují místo pevnosti indexy účinnosti v závislosti na čase a množství příměsi ( $I_{u(\tau,p)}$ ). Hodnoty pevností se převedou na hodnoty 0-1 případně vyšší, pokud jsou pevnosti malt s příměsí vyšší než pevnosti referenční malty. V tomto případě všechny převedené hodnoty rovné jedné odpovídají pevnostem referenční malty ( $p=0$ ) a zbylé hodnoty ukazují index účinnosti, který je vydělený 100. Protože se opět jedná o regresní analýzu, tak lze její přesnost opět stanovit pomocí koeficientu determinace, který je v tomto případě stejný jako koeficient determinace funkcí pevností pro dané příměsi. Matematicky by se tento postup dal zapsat následovně:

$$I_u = \frac{f_{c(\tau,p)}}{f_{c(\tau,0)}}$$

Kde:

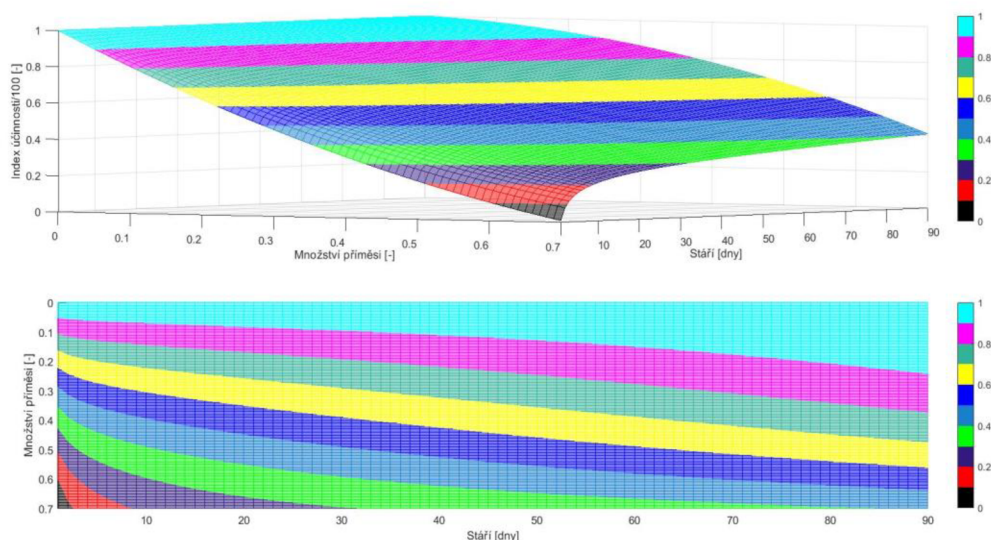
$I_u$ ... je index účinnosti/100 [-]

$f_{c(\tau,p)}$ ... funkce pevnosti v tlaku závislá na čase a množství příměsi [-]

$f_{c(\tau,0)}$ ... funkce pevnosti v tlaku závislá na čase [-]

Následně lze upravit graf tak, aby se barevně oddělili hodnoty indexu účinnosti vyděleného 100 po hodnotě 0,1. Dále lze toto grafické zobrazení doplnit o kód, který nám dopočítá hodnoty indexu účinnosti pro stanovené stáří a množství příměsi.

### Popílek Opatovice



Obrázek 14: Grafické znázornění indexu účinnosti pro popílek Opatovice

Hodnoty indexů účinnosti, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro popílek Opatovice jsou uvedeny v tabulce 39. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 40.

Tabulka 39: Indexy účinnosti pro popílek Opatovice

Index účinnosti [%]				
Množství příměsi $p$ [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	85,06	89,23	93,06	97,21
0,3	58,47	68,32	76,86	85,97
0,5	36,29	48,25	57,57	67,19
0,7	18,50	29,04	35,20	40,87

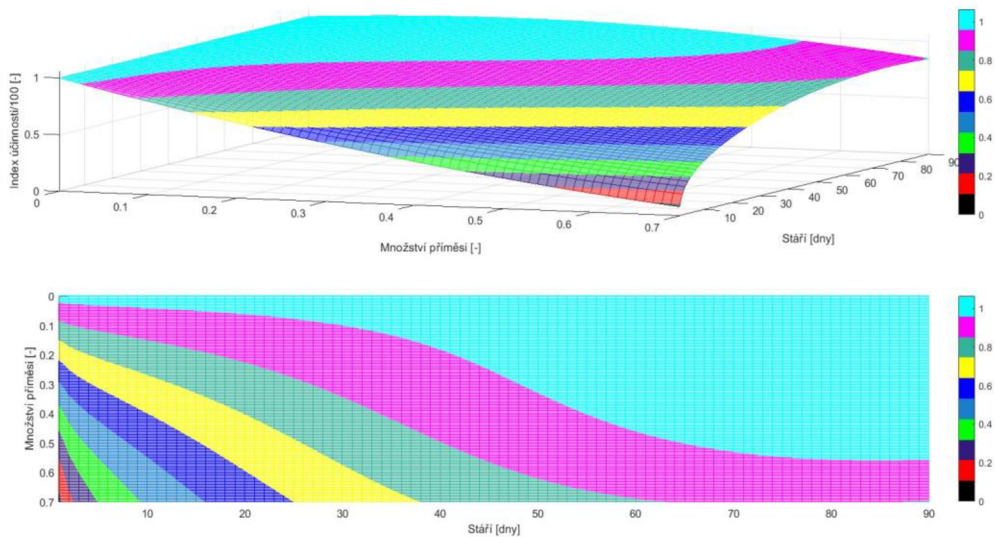


Tabulka 40: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot

Rozdíl indexů účinnosti [%]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	9,88	7,13	2,54	-3,25
0,3	3,68	-1,47	-2,13	-1,26
0,5	0,65	-1,18	-1,83	4,27
0,7	0,59	2,60	1,71	-2,82

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů indexů účinnosti vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 3,59 %.

### Struska Štramberk



Obrázek 15: Grafické znázornění indexu účinnosti pro strusku Štramberk

Hodnoty indexů účinnosti, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro strusku Štramberk jsou uvedeny v tabulce 41. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 42.

Tabulka 41: Indexy účinnosti pro strusku Štramberk

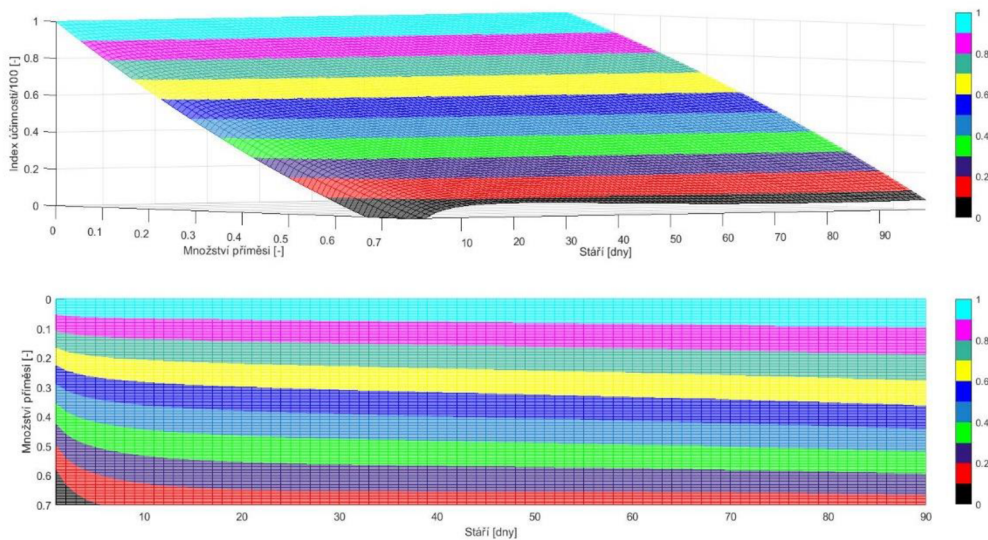
Index účinnosti [%]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	88,55	95,32	100,50	103,83
0,3	68,18	85,89	98,61	105,45
0,5	51,18	76,35	92,88	99,04
0,7	37,56	66,70	83,31	84,59

Tabulka 42: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot

Rozdíl indexů účinnosti [%]				
Množství příměsí p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	17,98	5,50	-0,76	-3,09
0,3	6,48	-5,90	-5,18	-4,55
0,5	5,61	-3,45	7,57	-0,04
0,7	6,35	-4,40	3,69	-5,87

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů indexů účinnosti vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 6,48 %.

### Mikromletý vápenec



Obrázek 16: Grafické znázornění indexu účinnosti pro mikromletý vápenec

Hodnoty indexů účinnosti, které jsou vypočtené podle funkce pevnosti pro mikromletý vápenec jsou uvedeny v tabulce 43. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 44.

Tabulka 43: Indexy účinnosti pro mikromletý vápenec

Index účinnosti [%]				
Množství příměsí p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	84,56	86,49	87,92	89,73
0,3	56,46	60,81	63,59	67,35
0,5	32,03	36,92	39,05	42,51
0,7	11,28	14,82	14,29	15,21

Tabulka 44: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot

Rozdíl indexů účinnosti [%]				
Množství příměsí p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0,1	10,27	3,73	4,67	-2,89
0,3	-0,63	-3,39	-2,60	-3,27
0,5	3,31	0,30	2,08	4,36
0,7	-0,07	0,86	-0,40	-2,02

Směrodatná odchylna vypočítaná z rozdílů indexů účinnosti vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 3,58 %.

Díky tomu, že výše uvedené stanovení indexů účinnosti vychází z funkcí pevnosti jsou jejich koeficienty stejné. Z toho vyplývá i to, že k největším odchylkám od skutečných hodnot dochází ve stejných náhradách daných příměsí i ve stejných stářích. I směrodatné odchylny rozdílů hodnot skutečných i vypočtených mají stejný průběh. Nevětší odchylny jsou pro strusku Štramberská a nejmenší pro mikromletý vápenec.

### 13.2. Reologické vlastnosti

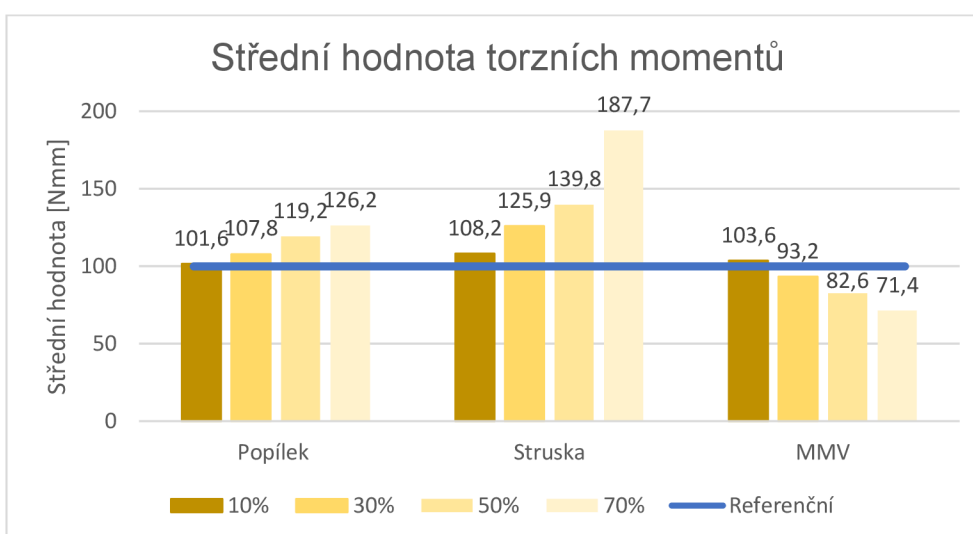
U reologických vlastností byla sledovaná střední hodnota torzního momentu i průběh torzního momentu v čase.

Tabulka 45: Střední hodnoty torzního momentu

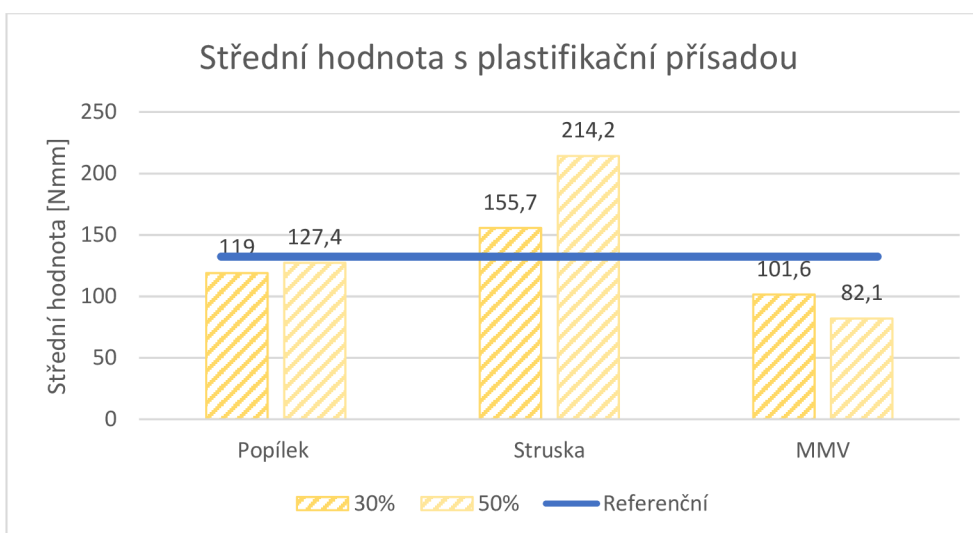
Receptura	Střední hodnota torzního momentu [Nmm]
Referenční	99,9
POP10	101,6
POP30	107,8
POP50	119,2
POP70	126,2
STR10	108,2
STR30	125,9
STR50	139,8
STR70	187,7
MMV10	103,6
MMV30	93,2
MMV50	82,6
MMV70	71,4

Tabulka 46: Střední hodnota torzního momentu cementových kaší s plastifikační přísadou

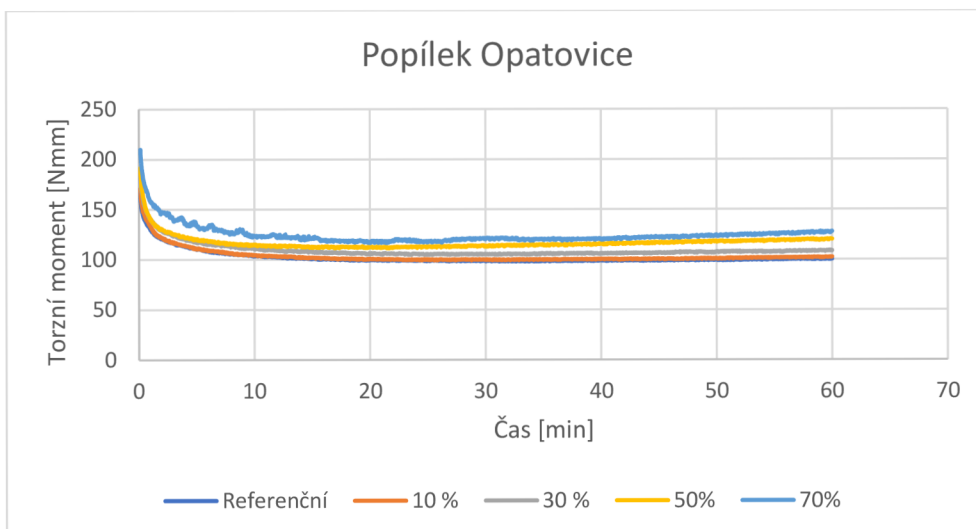
Receptura	Střední hodnota torzního momentu [Nmm]
REF-P	132,3
POP30-P	119
POP50-P	127,4
STR30-P	155,7
STR50-P	214,2
MMV30-P	101,6
MMV50-P	82,1



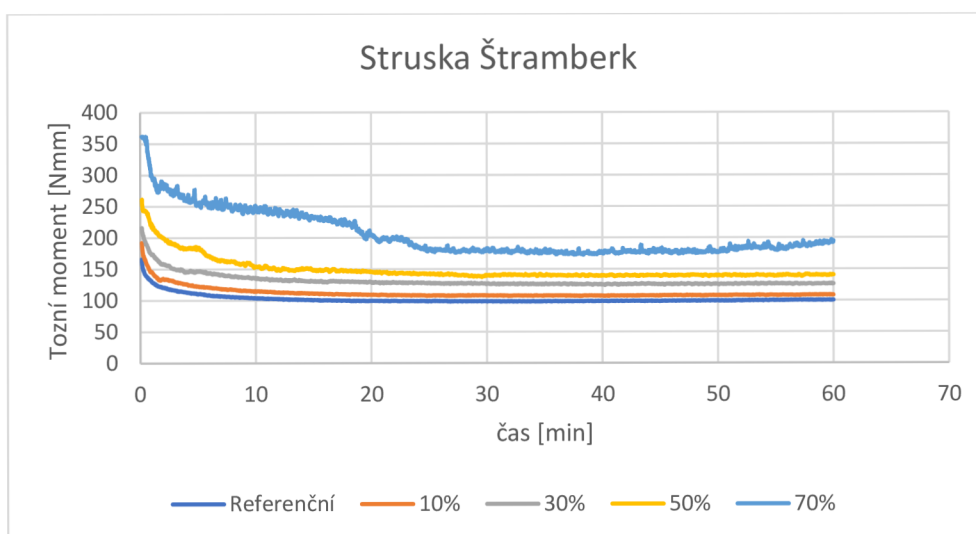
Graf 19: Střední hodnoty torzních momentů



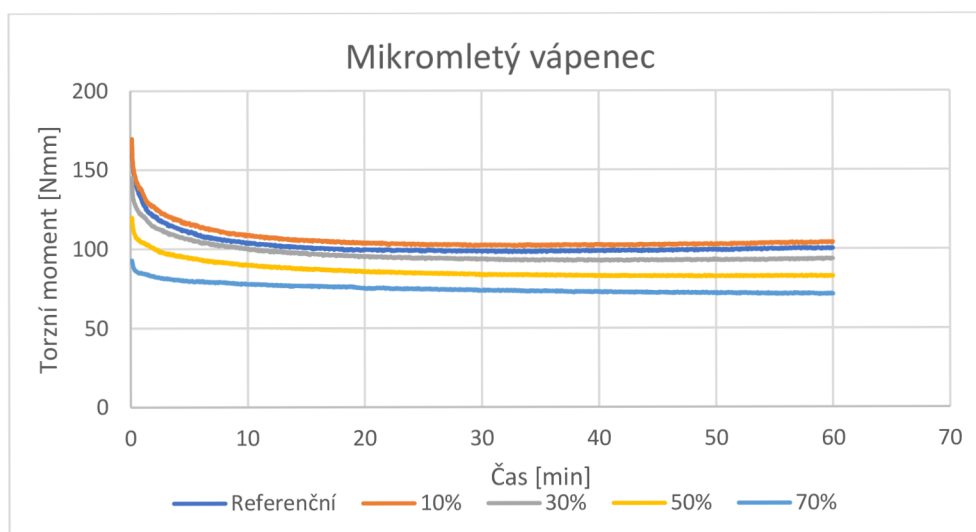
Graf 20: Střední hodnoty kaší s plastifikační přísadou



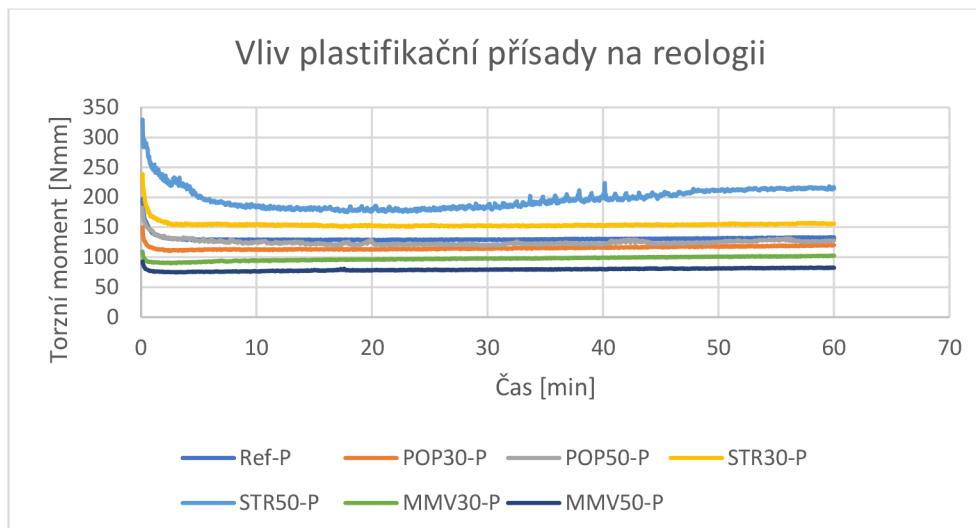
*Graf 21: Průběh torzního momentu popílku Opatovice v čase*



*Graf 22: Grafické znázornění torzního momentu strusky Štramberk v čase*



*Graf 23: Grafické znázornění torzního momentu mikromletého vápence v čase*



Graf 24: Vliv plastifikační přísady na reologii cementových past s příměsí

U cementových kaší s náhradou cementu elektrárenským popílkem se reologické vlastnosti kaše zhoršovaly s rostoucím množstvím elektrárenského popílku ve směsi. Při náhradě 10 % nedošlo k téměř žádné změně reologických vlastností, ale při náhradě 70 % se torzní moment zvyšoval z toho důvodu, že se zvyšoval odpor lopatky proti otáčení směsi. Po delší době míchání (cca 30 min) se postupně u jednotlivých směsí s popílkem začal torzní moment zvyšovat a k nejvyššímu zvýšení odporu směsi došlo u náhrad 50 a 70 % cementu.

V případě strusky Štramberk bylo zvýšené torzních momentů nejvyšší. To je pravděpodobně způsobeno tím, že zrna strusky jsou ostrohranná, zrna po sobě hůře kloužou a odpor proti otáčení je vyšší. To že jsou zrna strusky ostrohranné lze vidět na při náhradě 70 % cementu touto struskou. Průběh torzních momentů není hladký jako například v případě elektrárenského popílku, protože hranatější zrníčka strusky se do sebe různě zasekávají a tvoří shluky, které je potřeba rozmíchat. Dále je v tomto případě vidět, že na rozdíl od popílku se po delším čase míchání reologické vlastnosti strusky nezhoršují.

U kaší s mikromletým vápencem bylo očekáváno, že se torzní momenty budou zhoršovat podobně jako u vysokopecní strusky, protože se jedná o mleté materiály. Ovšem v tomto případě došlo jako u jediné příměsi ke snížení torzního momentu. Torzní moment se snižoval se zvyšující se náhradou cementu mikromletým vápencem. V tomto případě také nedochází se zvyšující se náhradou cementu vápencem ke zhoršení reologických vlastností v čase, ale dochází k mírnému zlepšení.

Při použití plastifikační přísady byl očekávaný projev zhoršení reologických vlastností v čase. Tento jev se projevil téměř na všech zkoušených recepturách. Nejvíce se však projevil u 50% náhrady cementu struskou, kde nárůst torzních momentů začal nejdříve. Naopak u 30% náhrady cementu struskou nedošlo k téměř žádné změně. Zvýšení torzních

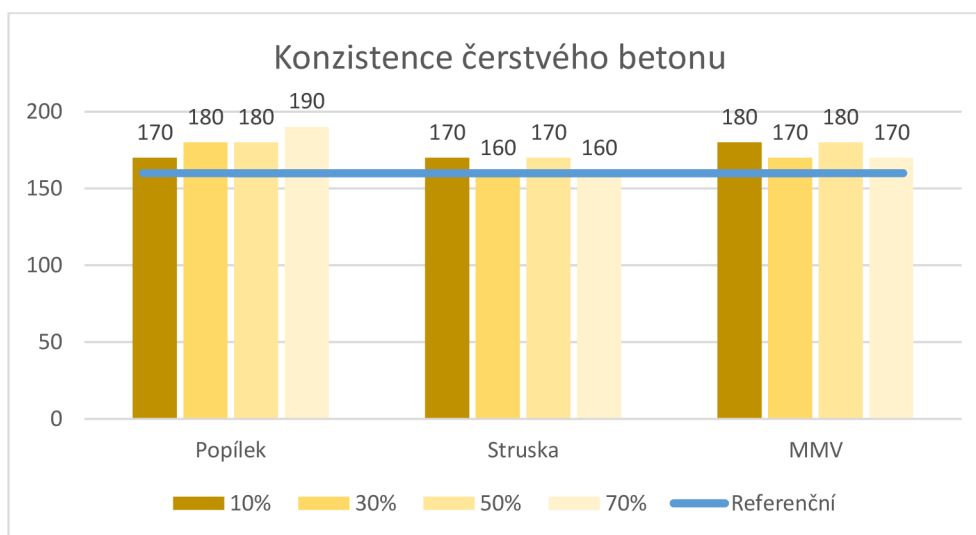
momentů se objevilo i u kaší s mikromletým vápencem, kde se zhoršovaly torzní momenty i při náhradě 50 % cementu, která se bez použití plastifikační přísady spíše v čase zlepšovala.

### 13.3. Výsledky zkoušek čerstvých a ztvrdlých betonů

#### 13.3.1. Konzistence čerstvých betonů

Tabulka 47: Konzistence čerstvých betonů

Receptura	Sednutí kužele [mm]
Referenční	160
POP10	170
POP30	180
POP50	180
POP70	190
STR10	170
STR30	160
STR50	170
STR70	160
MMV10	180
MMV30	170
MMV50	180
MMV70	170

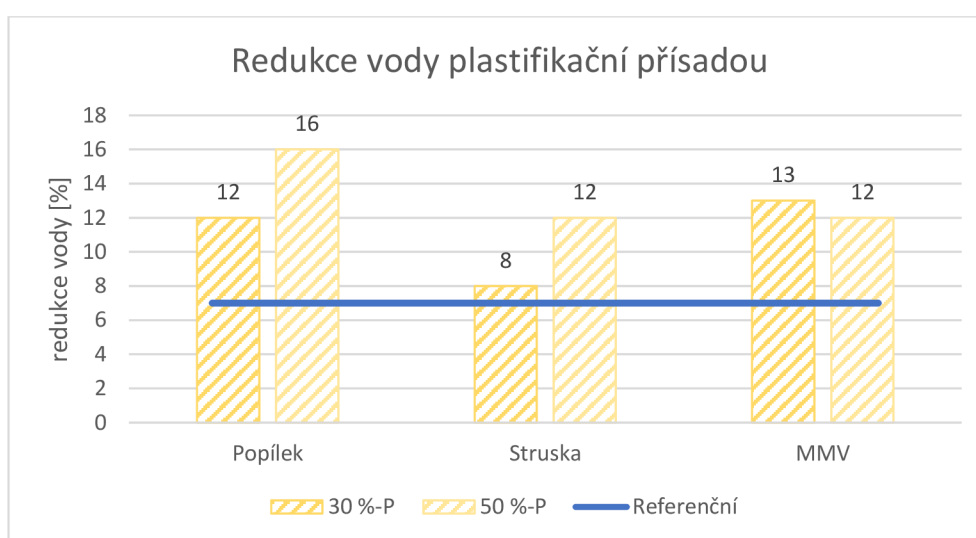


Graf 25: Konzistence čerstvého betonu

Betony, ve kterých byla použita plastifikační přísada, byly míchány na stejné sednutí kužele (150±10) mm, Proto zde byla posuzována redukce vody pomocí plastifikační přísady.

Tabulka 48: Redukce vody plastifikační přísadou

Receptura	Množství vody [kg/m <sup>3</sup> ]	Redukce vody [%]
Referenční	219	0
REF-P	203	7
POP30-P	192	12
POP50-P	185	16
STR30-P	202	8
STR50-P	192	12
MMV30-P	190	13
MMV50-P	193	12



Graf 26: Redukce vody plastifikační přísadou

U elektrárenského popílku se sednutí kužele betonu oproti referenčnímu betonu mírně zvyšovalo. Se zvyšujícím se množstvím náhrady cementu elektrárenským popílkem se sednutí kužele zvýšilo až na hodnotu 190 mm (o 30 mm větší sednutí) pro náhradu 70 % cementu. Tomu odpovídá i redukce vody plastifikační přísadou. Pro náhradu cementu 30 % elektrárenského popílku byla redukce vody plastifikační přísadou vyšší o 5 % než redukce vody u referenčního betonu a pro náhradu 50 % cementu byla redukce vody vyšší o 9 % při zachování stejné konzistence. Pokud tyto hodnoty porovnáme s cementovými maltami, tak zjistíme, že průběh konzistencí není zcela stejný. U cementových malt došlo k mírnému snížení rozlití malty, které bylo téměř stejné pro všechny náhrady.

U betonů s vysokopecní struskou byl opět průběh konzistencí jiný než u cementových malt. U betonů nedošlo k téměř žádné změně konzistence (hodnoty se pohybovaly od 160 do 170 mm sednutí kužele), zatímco u cementových malt došlo u náhrady 50 a 70 % cementu vysokopecní struskou ke snížení rozlití malty na střešacím stolku. Redukce vody



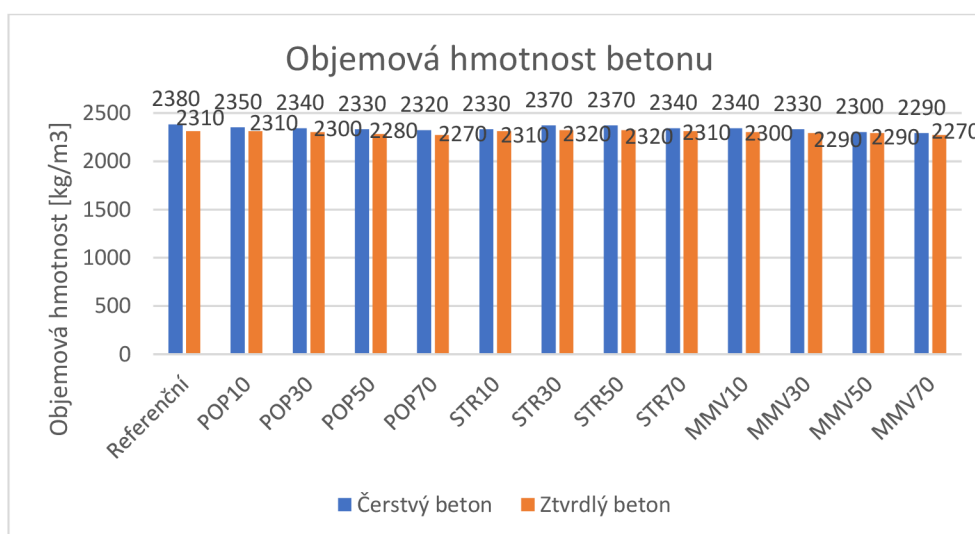
plastifikační přísadou byla pro náhradu 30 % cementu vysokopecní struskou téměř stejná jako u referenčního betonu, ale u náhrady 50 % cementu se redukce vody zvýšila o 4 % oproti betonu s 30% náhradou cementu.

U betonu s mikromletým vápencem byl trend sednutí kužele stejný jako u vysokopecní strusky, až na ten rozdíl, že sednutí kužele bylo o 10 mm větší (hodnoty sednutí od 170 do 180 mm). Tomu odpovídá i redukce vody, která byla pro mikromletý vápenec o 5-6 % vyšší než v případě referenčního betonu. V případě cementových malt byl také průběh konzistencí stejný u mikromletého vápence a vysokopecní strusky.

### 13.3.2. Objemová hmotnost

Tabulka 49: Objemová hmotnost čerstvých a ztvrdlých betonů

Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]		
Receptura	Čerstvý beton	Ztvrdlý beton
Referenční	2380	2310
POP10	2350	2310
POP30	2340	2300
POP50	2330	2280
POP70	2320	2270
STR10	2330	2310
STR30	2370	2320
STR50	2370	2320
STR70	2340	2310
MMV10	2340	2300
MMV30	2330	2290
MMV50	2300	2290
MMV70	2290	2270



Graf 27: Objemová hmotnost čerstvého a ztvrdlého betonu

U betonů s elektrárenským popínkem se s vyšším množstvím popínku v pojivu objemová hmotnost snižovala oproti referenčnímu betonu. A to jak v čerstvém, tak i ztvrdlém stavu. Nejnižší objemové hmotnosti dosahoval beton se 70% náhradou cementu elektrárenským popínkem. Tento průběh byl pozorován i u cementových malt.

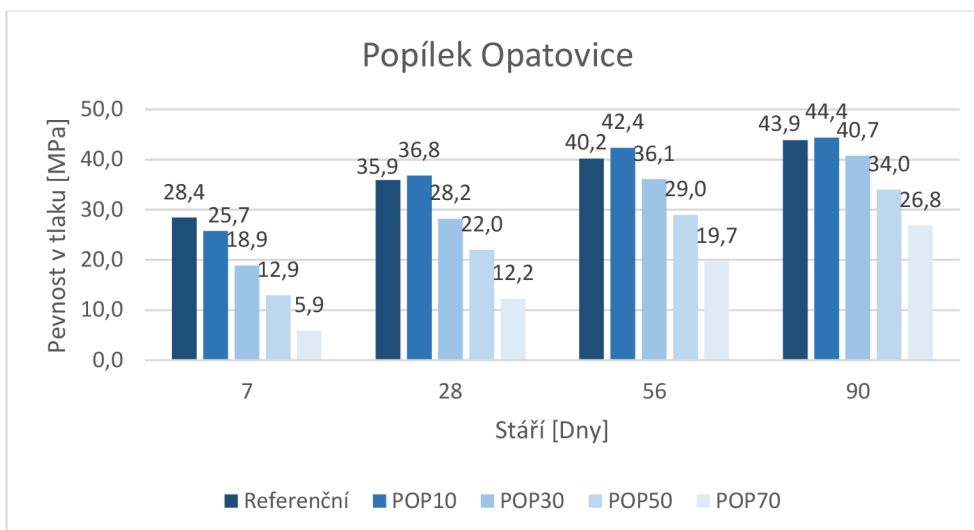
Objemová hmotnost betonu betonů se struskou Štramberk se stejně jako u cementových malt výrazně nelišila od objemové hmotnosti referenčního betonu. V tomto případě došlo pouze ke snížení objemové hmotnosti v čerstvém stavu oproti referenční hodnotě.

Betony, ve kterých se nahrazoval cement mikromletým vápencem měly také sestupný trend objemové hmotnosti se zvyšujícím se množstvím mikromletého vápence v pojivu. Oproti referenčnímu betonu se objemová hmotnost snížila o 40 kg/m<sup>3</sup> ve ztvrdlém stavu pro náhradu 70 % cementu.

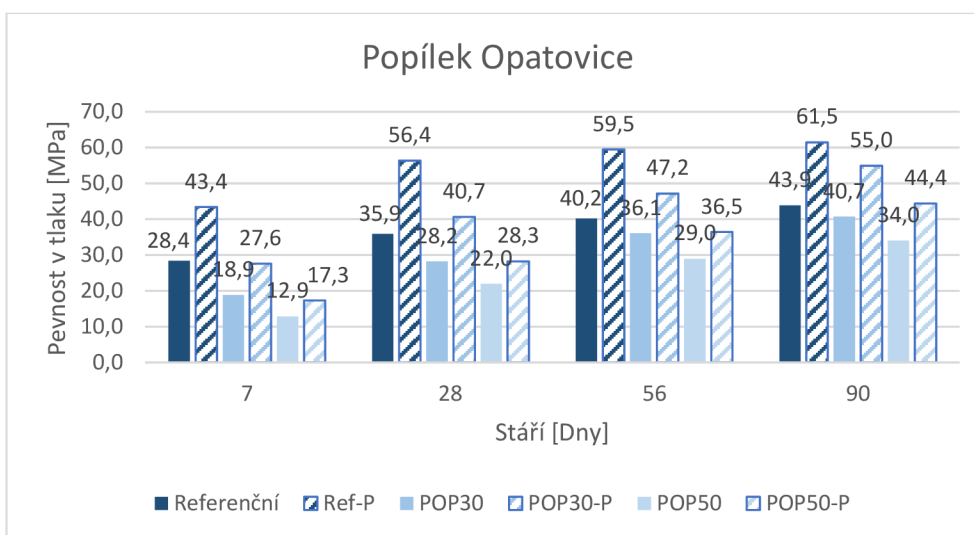
### 13.3.3. Pevnost v tlaku

Tabulka 50: Pevnost v tlaku betonů

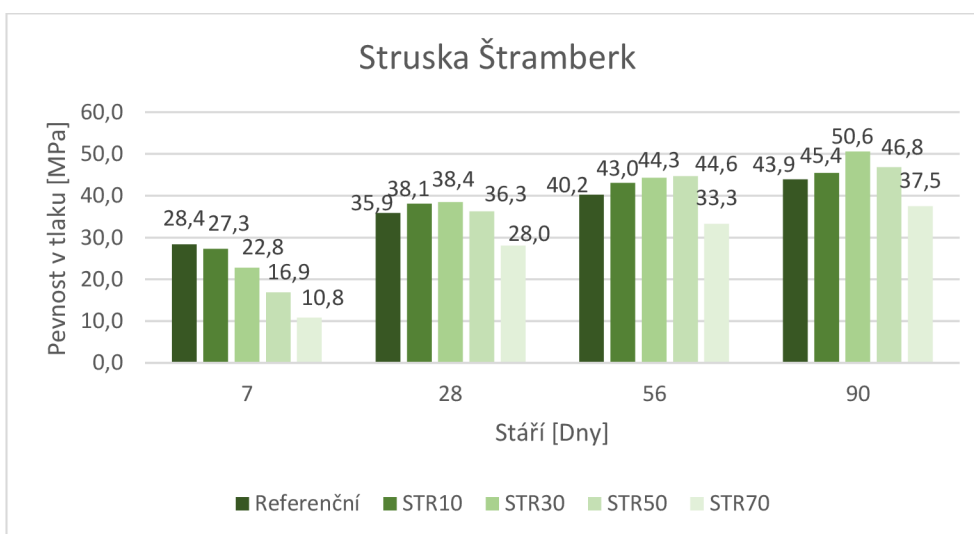
Pevnost v tlaku [MPa]				
Receptura	7 dní	28 dní	56 dní	90 dní
Referenční	28,4	35,9	40,2	43,9
REF-P	43,4	56,4	59,5	61,5
POP10	25,7	36,8	42,4	44,4
POP30	18,9	28,2	36,1	40,7
POP50	12,9	22,0	29,0	34,0
POP70	5,9	12,2	19,7	26,8
POP30-P	27,6	40,7	47,2	55,0
POP50-P	17,3	28,3	36,5	44,4
STR10	27,3	38,1	43,0	45,4
STR30	22,8	<b>38,4</b>	44,3	<b>50,6</b>
STR50	16,9	36,3	<b>44,6</b>	46,8
STR70	10,8	28,0	33,3	37,5
STR30-P	27,5	46,1	53,6	59,4
STR50-P	20,7	43,3	49,3	53,9
MMV10	26,2	33,9	41,9	42,3
MMV30	19,4	25,3	29,4	29,1
MMV50	10,1	14,0	15,2	15,7
MMV70	<b>4,0</b>	<b>5,2</b>	<b>6,7</b>	<b>7,2</b>
MMV30-P	29,8	38,1	42,3	43,0
MMV50-P	17,2	22,2	24,0	26,0



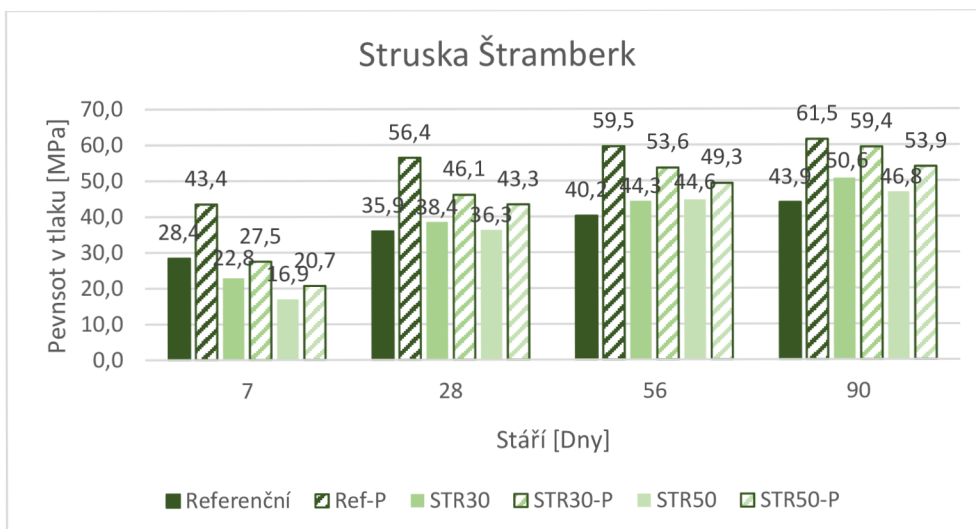
Graf 28: Pevnost v tlaku pro popílek Opatovice



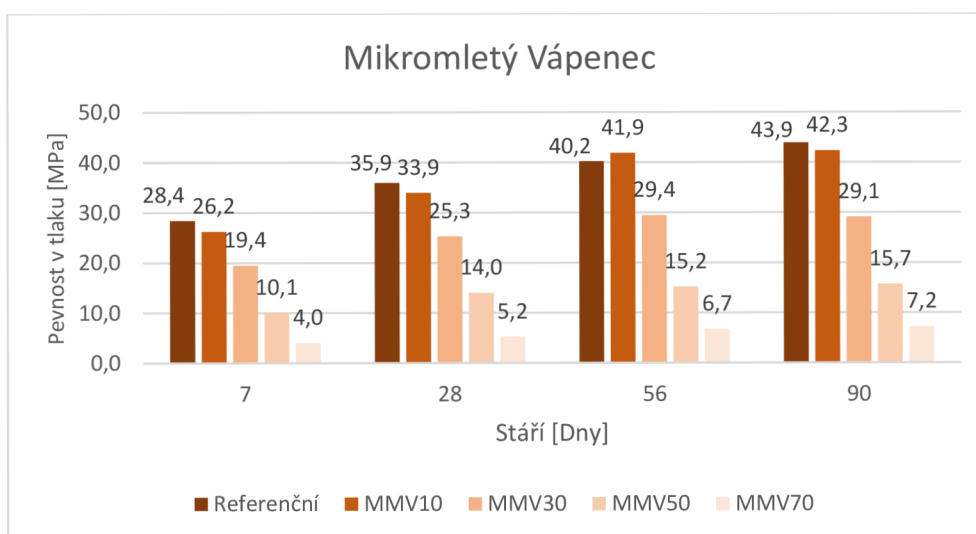
Graf 29: Vliv plastifikační přísady na pevnost v tlaku betonu s popílkem Opatovice



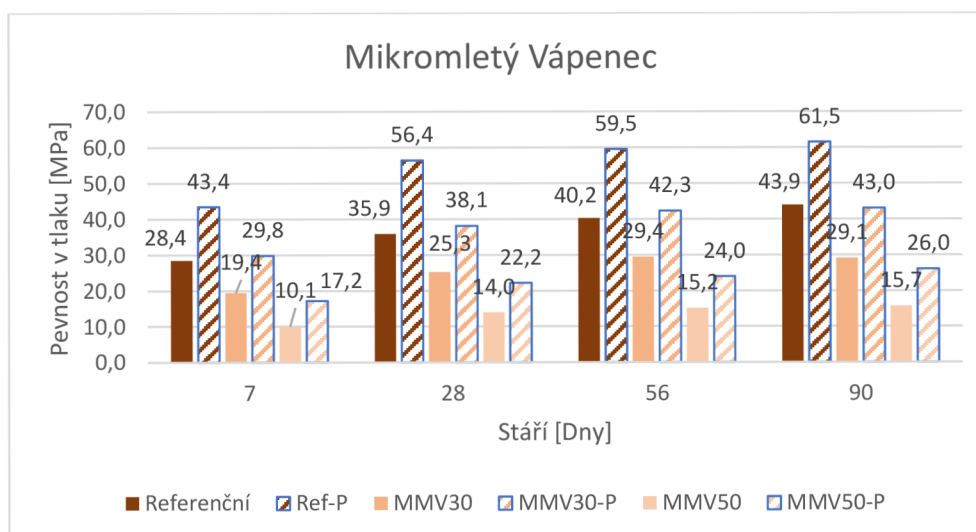
Graf 30: Pevnost v tlaku pro strusku Štramberk



Graf 31: Vliv plastifikační přísady na pevnost betonu se struskou Štramberk



Graf 32: Pevnost v tlaku pro mikromletý vápenec



Graf 33: Vliv plastifikační přísady na pevnost betonu s mikromletým vápencem

Betony s náhradou cementu elektrárenským popílkem Opatovice mají ve stáří 7 dní nižší pevnosti než referenční beton. Pevnost v tlaku se v tomto stáří vzorků snižuje se zvyšující se náhradou cementu elektrárenským popílkem. Po dalším zrání dosahuje beton s 10% náhradou cementu dosahoval vyšších pevností než referenční beton. Náhrada 30 % dosahuje ve stáří 28 dní menších pevností než referenční beton o 20 %. Další betony mají v tomto stáří pevnosti nižší. Stejný průběh pevností je i ve stáří 56 a 90 dní. Náhrada 70 % cementu elektrárenským popílkem nedosahuje ani 50 % pevnosti jako referenční beton ve stářích do 90 dní. V tomto stáří už dosahuje 61 % pevnosti referenčního betonu. U betonů s popílkem Opatovice a plastifikační přísadou byl průběh pevností v tlaku velmi podobný jako u betonů bez plastifikační přísady. V tomto případě se pevnosti v tlaku u všech náhrad podle očekávání zvýšily, protože se snížil vodní součinitel a v betonu bylo menší množství vody a kapilárních pórů.

Beton s 10% náhradou strusky Štramberské dosahoval ve stáří 7 dní téměř stejných pevností jako beton referenční. V dalších stářích dosahoval tento beton vyšších pevností než beton referenční. Beton s 30% náhradou cementu dosahoval po více než sedmi dnech vyšších pevností než beton referenční i než beton s náhradou 10 % cementu struskou Štramberské. Beton s 50 % strusky dosahoval po 28 dnech stejných pevností jako beton referenční. Po dalším zrání dosahoval tento beton vyšších pevností než beton referenční. Jenom beton s náhradou cementu 70 % vysokopepnicí struskou nedosahoval stejných pevností jako beton referenční. U betonů s plastifikační přísadou došlo opět ke zvýšení všech pevností způsobeným nižším množstvím vody v betonu. U betonů se struskou a plastifikační přísadou nedošlo ani v případě 30% náhrady cementu ani 50% náhrady cementu k tak výraznému zvýšení pevnosti jako u betonů bez plastifikační přísady.

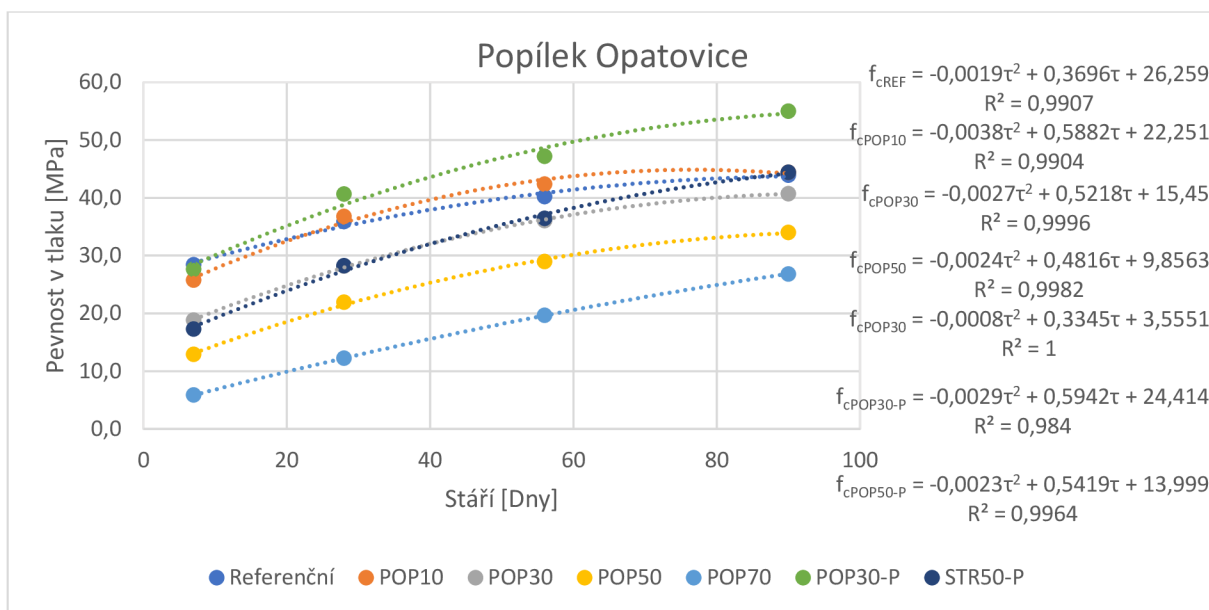
Beton s mikromletým vápencem nedosahoval v téměř žádném případě stejných pevností jako beton referenční. Stejně pevnosti dosahoval pouze beton s náhradou 10 % cementu mikromletým vápencem ve stáří 56 dní. Ve všech stářích je jinak pevnost v tlaku nižší než pevnost v tlaku referenčního betonu. S vyšší náhradou cementu mikromletým vápencem je pevnost v tlaku nižší oproti referenčnímu betonu. U náhrady 50 a 70 % nedosahoval beton ani 50 % pevnosti v tlaku referenčního betonu. U betonu s plastifikační přísadou byl průběh pevností úplně stejný jako u betonů bez plastifikační přísady. S vyšší náhradou cementu se pevnost snižuje a pro náhradu 50 % nedosahuje ani 50 % pevnosti v tlaku referenčního betonu s plastifikační přísadou.

#### **13.3.4. Stanovení funkcí pevnosti**

Funkce pevnosti pro betony jsou sestaveny stejným způsobem jako funkce pevnosti pro cementové malty. V tomto případě je množství příměsí vypočítané stejně jako v případě

funkcí pevnosti pro cementové malty a platí zde i stejné omezení – maximální množství příměsi je 0,7 a maximální stáří 90 dní.

### 13.3.4.1. Funkce pevnosti pro popílek Opatovice



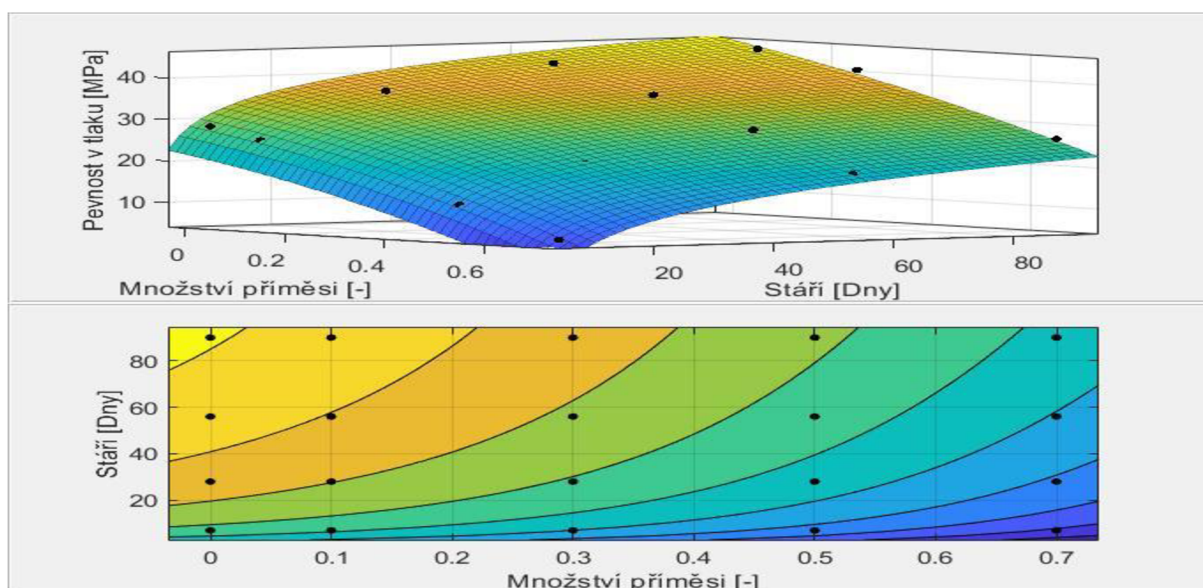
Graf 34: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro popílek Opatovice

Pro popílek Opatovice má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 14,71 - 20,98 \cdot p + 18,92 \cdot p^2 + 6,819 \cdot \ln(\tau) - 0,01564 \cdot p \cdot \tau + 0,08623 \cdot p^2 \cdot \tau + (1,205 \cdot 10^{-4}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9518$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečné naměřené hodnoty.



Obrázek 17: Grafické znázornění funkce pevnosti v tlaku pro popílek Opatovice

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené z funkce pevnosti pro popílek Opatovice, jsou uvedeny v tabulce 51. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 52.

Tabulka 51: Pevnost v tlaku pro popílek Opatovice vypočtená z funkce pevnosti

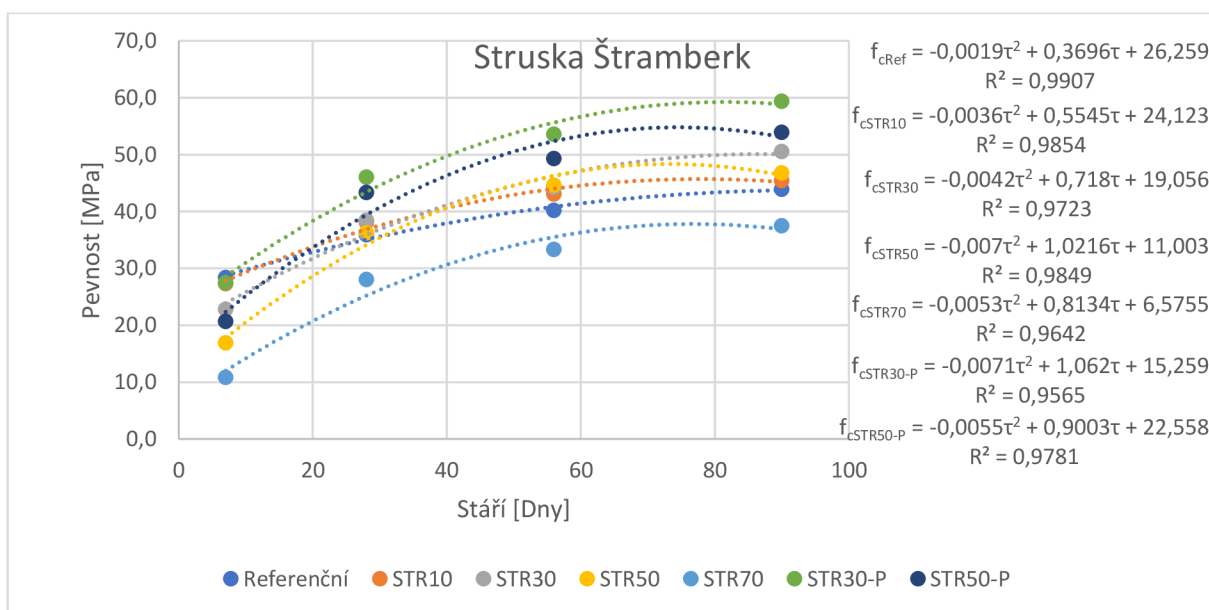
Pevnost v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	28,0	37,4	42,2	45,4
0,1	25,7	35,1	39,8	42,9
0,3	20,0	29,5	34,2	37,4
0,5	12,9	22,5	27,5	30,9
0,7	4,2	14,3	19,7	23,6

Tabulka 52: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	-0,4	1,5	2,0	1,5
0,1	0,0	-1,7	-2,6	-1,5
0,3	1,1	1,3	-1,8	-3,4
0,5	0,0	0,6	-1,4	-3,1
0,7	-0,3	2,1	0,0	-3,3

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 1,4 MPa.

### 13.3.4.2. Funkce pevnosti pro strusku Štramberk



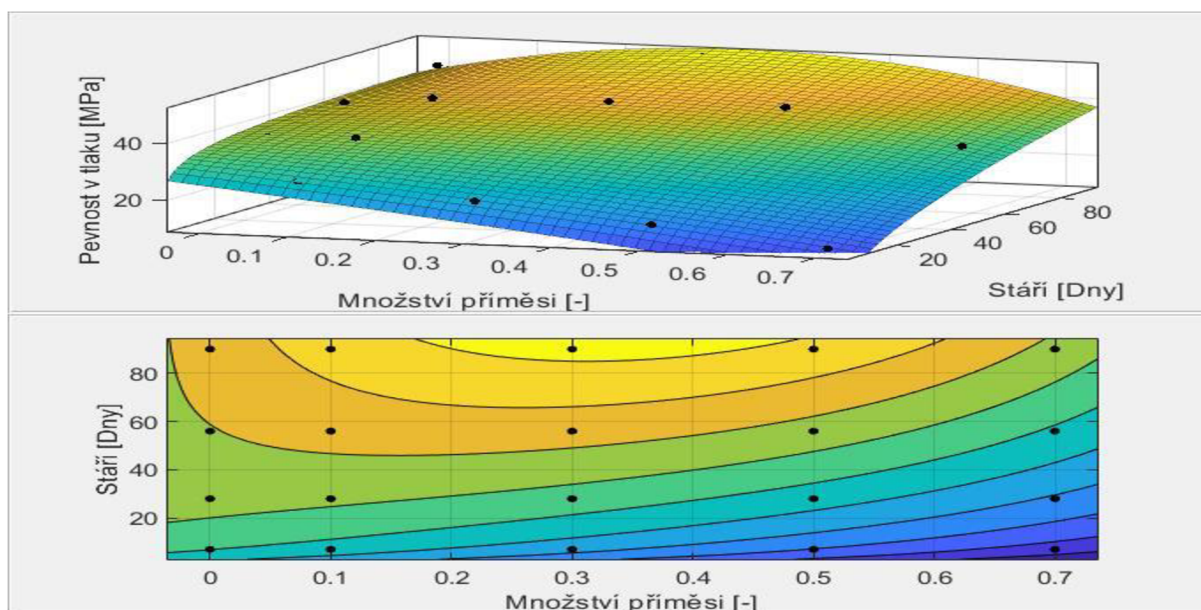
Graf 35: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro strusku Štramberk

Pro strusku Štramberk má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 21,06 - 33,3 \cdot p - 2,793 \cdot p^2 + 4,65 \cdot \ln(\tau) + 1,081 \cdot p \cdot \tau - 0,9691 \cdot p^2 \cdot \tau + (7,420 \cdot 10^{-4}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9265$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečné naměřené hodnoty.



Obrázek 18: Grafické znázornění pevnosti v tlaku pro strusku Štramberk

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené z funkce pevnosti pro strusku Štramberk jsou uvedeny v tabulce 53. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 54.

Tabulka 53: Pevnost v tlaku pro strusku Štramberk vypočtená z funkce pevnosti

Pevnost v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	30,1	36,6	39,8	42,0
0,1	27,4	35,9	41,7	46,9
0,3	21,5	32,8	42,1	51,3
0,5	14,8	27,3	38,0	48,5
0,7	7,4	19,4	29,3	38,5

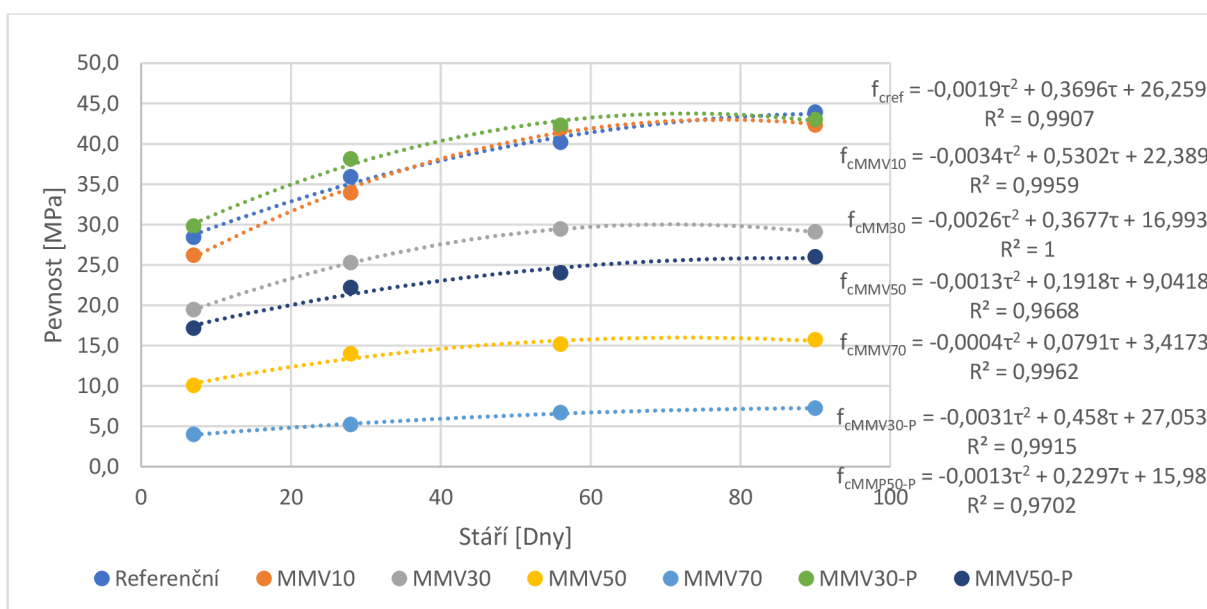


Tabulka 54: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří τ [dny]			
	7	28	56	90
0	1,7	0,7	-0,4	-1,9
0,1	0,1	-2,2	-1,3	1,4
0,3	-1,3	-5,7	-2,2	0,7
0,5	-2,1	-9,0	-6,7	1,7
0,7	-3,4	-8,7	-4,0	1,0

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 3,3 MPa.

### 13.3.4.3. Funkce pevnosti pro mikromletý vápenec



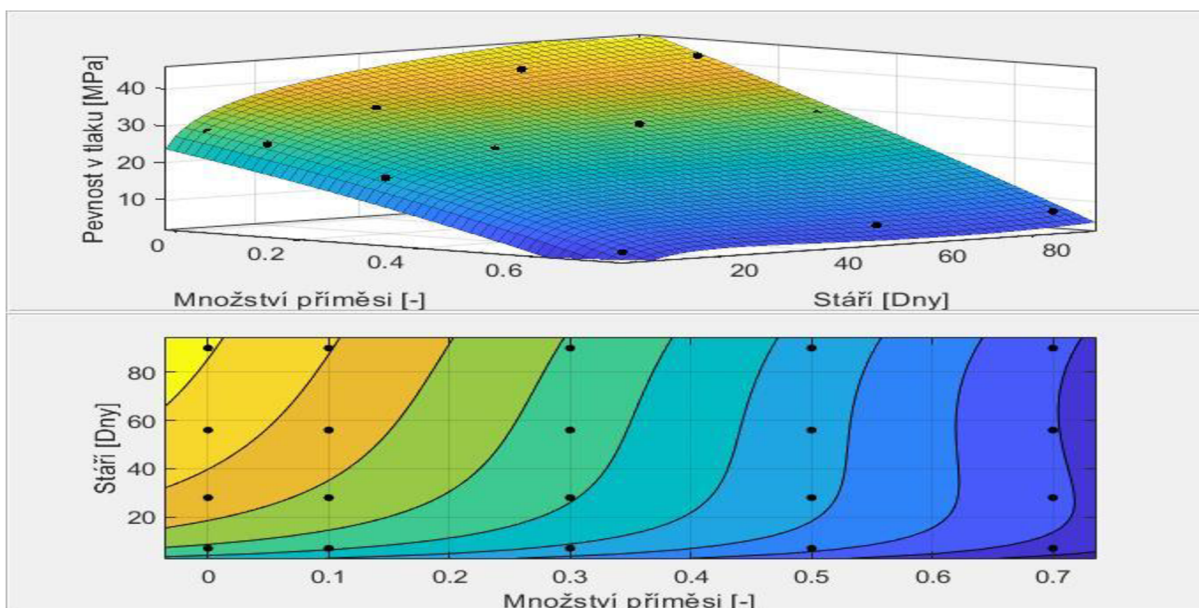
Graf 36: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro mikromletý vápenec

Pro mikromletý vápenec má funkce pevnosti závislá na čase a množství příměsi tvar:

$$f_c = 15,94 - 26,17 \cdot p - 10,96 \cdot p^2 + 6,533 \cdot \ln(\tau) - 0,515 \cdot p \cdot \tau + 0,03916 \cdot p^2 \cdot \tau + (2,6825 \cdot 10^{-3}) \cdot p \cdot \tau^2$$

$$R^2 = 0,9834$$

Následující graf zobrazuje grafické znázornění této funkce. Ve spodní části můžeme vidět půdorys grafu funkce. V obou grafech černé tečky představují skutečné naměřené hodnoty.



Obrázek 19: Grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec

Hodnoty pevností, které jsou vypočtené z funkce pevnosti pro mikromletý vápenec jsou uvedeny v tabulce 55. Jejich odchylky od skutečných hodnot jsou uvedeny v tabulce 56.

Tabulka 55: Pevnost v tlaku pro mikromletý vápenec vypočtená z funkce pevnosti

Pevnost v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	28,7	37,7	42,2	45,3
0,1	25,6	33,8	37,5	40,2
0,3	18,8	25,3	27,5	29,4
0,5	11,2	16,0	16,7	18,1
0,7	2,7	5,9	5,3	6,1

Tabulka 56: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot

Rozdíl pevnosti v tlaku [MPa]				
Množství příměsi p [-]	Stáří $\tau$ [dny]			
	7	28	56	90
0	0,3	1,8	2,0	1,4
0,1	-0,6	-0,2	-4,4	-2,2
0,3	-0,6	0,0	-2,0	0,4
0,5	1,1	2,0	1,6	2,4
0,7	-1,3	0,7	-1,3	-1,1

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů pevností vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 1,7 MPa.

Funkce pevnosti pro popílek Opatovice má koeficient determinace 0,9518. Tento koeficient determinace je nižší než u funkce pevnosti stanovované pro funkci pevnosti malty s obsahem popílku Opatovice. V tomto případě dochází na rozdíl od funkce pro malty s popílkem Opatovice k největším odchýlkám od skutečných hodnot až v hodnotách pro stáří 90 dní.

Pro strusku Štramberk má funkce pevnosti opět nejnižší koeficient determinace ze všech stanovovaných funkcí. V případě funkce stanovované z výsledků betonů se struskou Štramberk dosahuje koeficient determinace pouze hodnoty 0,9265. V tomto případě dochází k největším odchýlkám od skutečných hodnot dochází ve výpočtu u hodnot s množstvím příměsi 0,5.

Stejně jako u funkcí pevnosti pro cementové malty s mikromletým vápencem je i funkce pevnosti pro betony s mikromletým vápencem ze všech příměsí nejpřesnější (má nejvyšší koeficient determinace 0,9834). V tomto případě je nejvyšší odchýlka ve výpočtu pro stáří 56 dní.

Závislost pevnosti v závislosti na čase betonů s aktivní příměsí a plastifikační přísadou jsou velmi podobné jako průběhy pevnosti v závislosti na čase pro betony bez plastifikační přísady. Z toho lze usoudit, že stanovení funkce pevnosti je možné i pro betony ve kterých je použita plastifikační přísada.

### 13.3.5. Stanovení *k*-hodnoty

Pro stanovení *k*-hodnoty byl použit vzorec závislosti pevnosti v tlaku na vodním součiniteli [62]:

$$f_c = K \cdot \left( \frac{1}{v/c} - a \right)$$

Kde:

$f_c$ ... pevnost v tlaku referenčního betonu [MPa]

$K$ ... koeficient závislý na referenčním cementu [MPa]

$c$ ... množství cementu v referenčním betonu [kg/m<sup>3</sup>]

$v$ ... množství vody v referenčním betonu [kg/m<sup>3</sup>]

$a$ ... koeficient závislý na stáří a ošetřování betonu [-]

Pro stanovení *k*-hodnoty je nejprve nutné stanovit koeficient ***K*** a ***a***. Podle doporučení [62] byl zvolen koeficient ***a*** pro stáří 28 dní roven 0,5. Díky této hodnotě lze vypočítat koeficient

**K**, který je pro všechny hodnoty stáří stejný. Po stanovení koeficientu **K** lze následně dopočítat zbylé hodnoty **a** pro stáří 7, 56 a 90 dní.

$$K = \frac{f_{cREF28}}{\frac{1}{v/c} - a_{28}}$$

Pomocí tohoto vzorce je koeficient **K** roven 32,69 MPa. Po zjištění koeficientu **K** lze stanovit koeficienty **a** pro stáří 7, 56 a 90 dní.

$$a_t = \frac{c}{v} - \frac{f_{ct}}{K}$$

Kde:

$a_t$ ... koeficient závislý na stáří betonu pro dané stáří (7,56,90 dní) [-]

$f_{ct}$ ... pevnost v tlaku referenčního betonu pro dané stáří [MPa]

Tabulka 57: Koeficient  $a$  pro stáří 7, 28, 56 a 90 dní

Stáří [Dny]	7	28	56	90
$a$	0,73	0,50	0,37	0,26

Následně lze, po stanovení koeficientů **a** a **K**, zjistit  $k$ -hodnotu pro zkoušené příměsi ve všech náhradách a stářích. Abychom zjistili  $k$ -hodnotu je potřeba upravit vzorec pro pevnost v tlaku tak že  $v/c$  se nahradí  $v/(c+k \cdot p)$  [62]:

$$f_{c p,t} = K \cdot \left( \frac{1}{v/(c + k \cdot p)} - a_t \right)$$

Kde:

$f_{c p,t}$ ... pevnost v tlaku pro danou příměs  $v$  v náhradě  $p$  a stáří  $t$  [MPa]

$k$ ...  $k$ -hodnota [-]

$p$ ... množství příměsí v betonu [kg/m<sup>3</sup>]

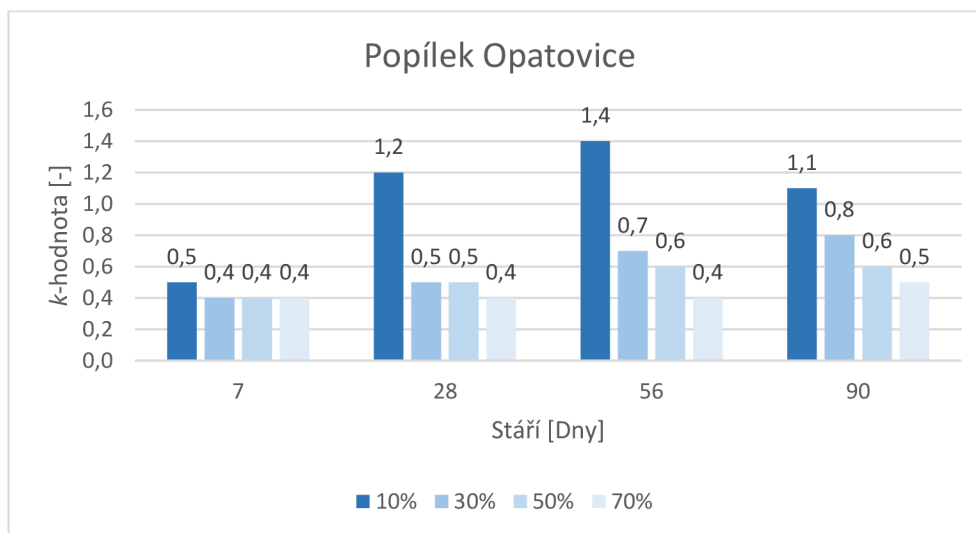
$K$ -hodnotu lze pomocí vyjádření z tohoto vzorce vypočítat následovně:

$$k = \frac{v \left( \frac{f_{c p,t}}{K} + a_t \right) - c}{p}$$

### 13.3.5.1. Stanovení k-hodnoty pro popílek Opatovice

Tabulka 58: k-hodnota pro popílek Opatovice

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,5	1,2	1,4	1,1
30	0,4	0,5	0,7	0,8
50	0,4	0,5	0,6	0,6
70	0,4	0,4	0,4	0,5

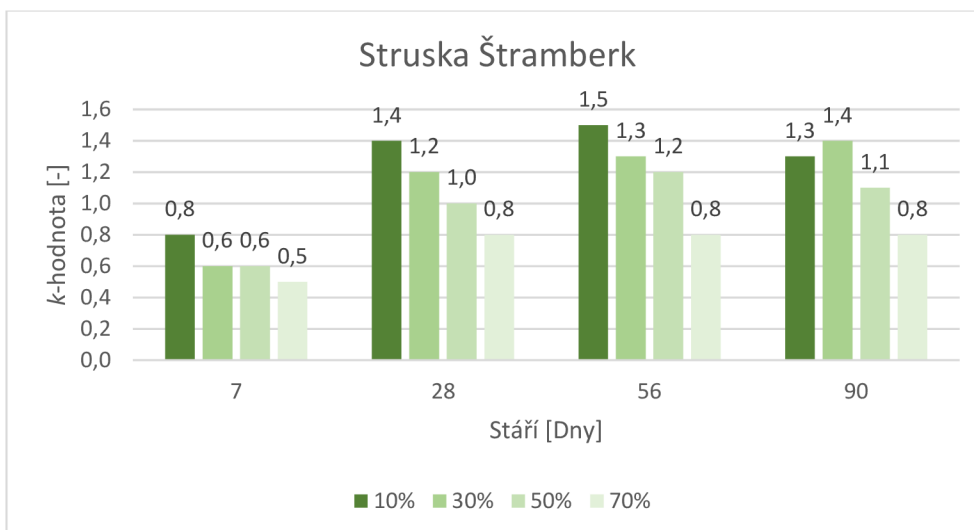


Graf 37: k-hodnota pro popílek Opatovice

### 13.3.5.2. Stanovení k-hodnoty pro strusku Štramberk

Tabulka 59: k-hodnota pro strusku Štramberk

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,8	1,4	1,5	1,3
30	0,6	1,2	1,3	1,4
50	0,6	1,0	1,2	1,1
70	0,5	0,8	0,8	0,8

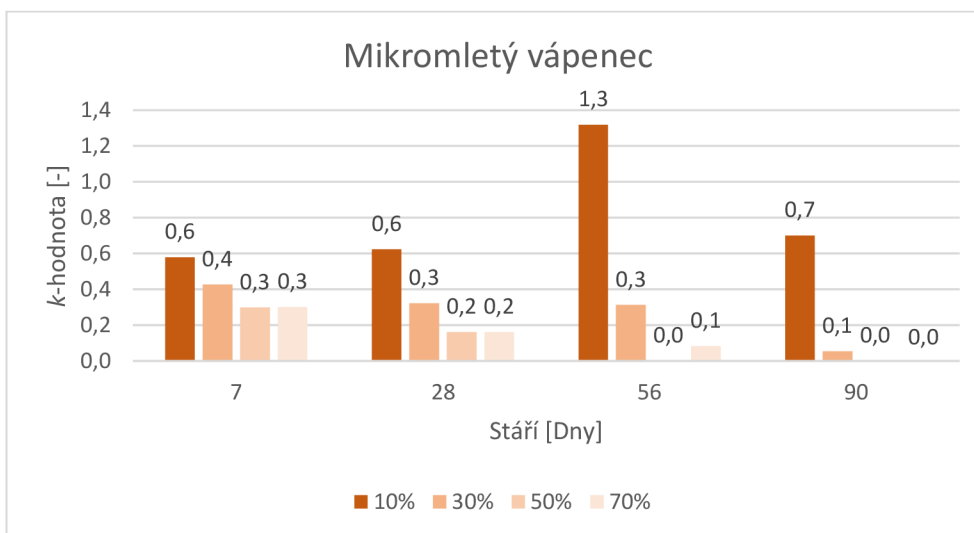


Graf 38: k-hodnota pro strusku Štramberk

### 13.3.5.3. Stanovené k-hodnoty pro mikromletý vápenec

Tabulka 60: k-hodnota pro mikromletý vápenec

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,6	0,6	1,3	0,7
30	0,4	0,3	0,3	0,1
50	0,3	0,2	0,0	0,0
70	0,3	0,2	0,1	0,0



Graf 39: k-hodnota pro mikromletý vápenec

### 13.3.5.4. Stanovení $k$ -hodnoty z betonů s plastifikační přísadou

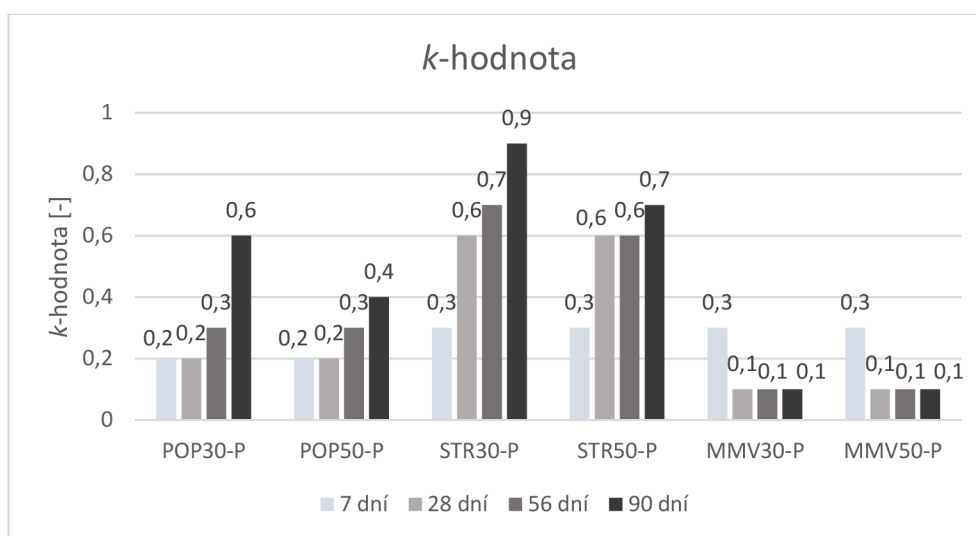
$K=46,07$  MPa

Tabulka 61: Koeficienty  $a$  pro betony s plastifikační přísadou

Stáří [Dny]	7	28	56	90
$a$	0,78	0,50	0,43	0,39

Tabulka 62:  $k$ -hodnoty stanovené z betonů s plastifikační přísadou

Receptura	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
POP30-P	0,2	0,2	0,3	0,6
POP50-P	0,2	0,2	0,3	0,4
STR30-P	0,3	0,6	0,7	0,9
STR50-P	0,3	0,6	0,6	0,7
MMV30-P	0,3	0,1	0,1	0,1
MMV50-P	0,3	0,1	0,1	0,1



Graf 40:  $k$ -hodnota stanovená z betonů s plastifikační přísadou

Pro popílek Opatovice dosahuje  $k$ -hodnota ve stáří 7 dní hodnoty 0,5 pro náhradu 10 % cementu a 0,4 pro náhradu cementu 30, 50 a 70 %. Po dalším zrání betonu se nejvýrazněji  $k$ -hodnota zvyšuje u náhrady 10 % cementu. V tomto případě  $k$ -hodnota přesahuje ve všech stáří hodnotu 1 a to pravděpodobně z toho důvodu, že pevnosti v tlaku betonu s 10 % přesahují v těchto stáří pevnost v tlaku betonu referenčního. Pro ostatní náhrady cementu popílkem Opatovice není nárůst  $k$ -hodnoty tak vysoký. Nejvyšší nárůst je pro beton s náhradou 30 % cementu popílkem. V tomto případě dosahují  $k$ -hodnoty 0,5 pro stáří 28 dní, 0,7 ve stáří 56 dní a 0,8 ve stáří 90 dní. Pro náhradu cementu 50 % popílku se

*k*-hodnota zvyšuje pouze do stáří 56 dní a dosahuje hodnoty 0,6. Pro beton se 70% náhradou cementu popílkem se *k*-hodnota až do stáří 56 dní nezvyšuje. Podle ČSN EN 206+A2 je maximální povolená *k*-hodnota pro elektrárenský popílek rovna 0,4 pro cement CEM I, nebo CEM II/A. Pro tyto jednotlivé cementy se však liší maximální množství popílku, které lze započítat do vodního součinitele, případně jako započitatelné množství pojiva. Pro cement CEM I je maximální toto povolené množství 33 % náhrady cementu a pro CEM II/A 25 % náhrady cementu. Po srovnání vypočtenými *k*-hodnotami lze říct, že tato hodnota odpovídá ve stáří 7 dní od výroby betonu. Pro další stáří už námi stanovená *k*-hodnota dosahuje vyšších hodnot. Z toho lze usoudit, že s použitím 30 % náhrady cementu a použitou *k*-hodnotou 0,4 se pohybujeme na straně bezpečné. Pokud vypočteme množství pojiva s normovou *k*-hodnotu pro beton ve kterém je 350 kg cementu a 30 % je nahrazeno elektrárenským popílkem (245 kg cementu a 105 kg popílku) tak dostaneme množství pojiva rovné 287 kg. Při použití 245 kg cementu a 175 kg popílku můžeme započítat pouze 105 kg popílku a množství pojiva bude stejné a 70 kg popílku bude v betonu navíc. Těchto 70 kg popílku se nepočítá mezi pojivo, ale stejně může přispět k dalšímu vývinu pevností a tím se bezpečnostní rezerva zvyšuje. Při použití námi stanovené *k*-hodnoty dostaneme pro 30% náhradu cementu množství pojiva 297,5 kg ve stáří 28 dní, 318,5 kg pro stáří 56 dní a 329 kg ve stáří 90 dní. Toto množství se zvyšuje, díky vyšší aktivitě popílku po delším zrání betonu, a kdyby byly pro betony s elektrárenským popílkem uvažovány charakteristické pevnosti ve stáří např. 56 dní místo běžně používaných 28, bylo by možné pro tyto betony použít menší množství cementu, nebo započítat do množství pojiva vyšší množství popílku. Také by bylo možné tyto betony použít do náročnějších expozičních tříd. Uvažování pevností po stářích vyšších než 28 dní je možné z toho důvodu, že konstrukce nemusí být plně zatíženy po 28 dnech, ale až po dokončení stavby (nebo hrubé části stavby), které může trvat déle než 28 dní [2].

V případě betonů s náhradou cementu struskou Štramberk byla nejvyšší *k*-hodnota pro náhradu 10 % cementu. Pro náhrady 30 a 50 % byla *k*-hodnota rovna 0,6 a pro náhradu 70 % pouze 0,5. Ve stáří 28 dní dosahovala *k*-hodnota až do náhrady 50 % hodnoty 1 a vyšší. Pro náhradu 70 % cementu struskou dosahovala *k*-hodnota 0,8 a po dalším zrání betonu už se dále nezvyšovala. Pro nižší náhrady se *k*-hodnota dále zvyšovala. Ve stáří 56 dní je *k*-hodnota nejvyšší pro náhradu 10 %, a to 1,5 a ve stáří 90 dní je nejvyšší *k*-hodnota 1,4 pro náhradu 30 % cementu. Vyšší hodnoty dosáhla *k*-hodnota ve 30% náhradě cementu struskou pravděpodobně kvůli vyššímu nárůstu pevností s touto náhradou než s náhradou 10 % cementu. Podle dosažených výsledků lze usoudit, že bezpečná hodnota *k* pro vysokopecní strusku je rovná 1 pro náhrady do 50 % cementu a pro stáří betonu 28 dní a starší. Při porovnání *k*-hodnoty s doporučenou hodnotou uvedenou v ČSN 74 2404 (0,6)



jsou stanovené hodnoty vyšší a opět lze usoudit, že je možné použití nižšího množství cementu pro dosažení požadovaných vodních součinitelů a minimálního množství pojiva pro jednotlivé expoziční třídy prostředí [48].

U betonů s náhradou cementu mikromletým vápencem dosahují parametry  $k$ -hodnoty podstatně nižších hodnot než u popílku a strusky. Ve stáří 7 dní dosahovala  $k$ -hodnota hodnot 0,3-0,6. Po dalším zrání betonu se zvyšovaly pouze hodnoty pro náhradu cementu 10 % mikromletého vápence. Pro vyšší náhrady se  $k$ -hodnoty snižovaly a pro stáří 56 dní už dosahovaly při náhradě 50 a 70 % hodnoty 0. Ve stáří 90 dní byla  $k$ -hodnota rovna téměř nule i pro náhradu 30 %. Z toho lze usoudit, že vápenec přispívá k pevnostem betonu pouze v náhradě 10 % a pro vyšší náhrady nelze uvažovat jeho pozitivní dopad na beton.

Při stanovování  $k$ -hodnoty u betonů s plastifikační přísadou se  $k$ -hodnoty výrazně lišily od  $k$ -hodnot stanovených z betonů bez plastifikační přísady, a to zejména v počátečních stářích. To je způsobeno pravděpodobně tím, že plastifikační přísada výrazně zvedla pevnosti referenčního betonu, a také tím, že pro betony s příměsemi bylo použito různé množství vody pro dosažení stejné konzistence jako u betonu referenčního. Tímto byly zapříčiněny nižší pevnosti betonů s aktivními příměsemi oproti pevnostem v tlaku referenčního betonu. Pro popílek Opatovice  $k$ -hodnota klesla pro obě náhrady (30 a 50 %) na hodnotu 0,2 až do stáří 28 dní. Pro stáří je  $k$ -hodnota pro popílek Opatovice 0,3 až do náhrady 50 % cementu a ve stáří je  $k$ -hodnota 0,6 pro 30% náhradu cementu a 0,4 pro 30-50 % náhrady cementu popílkem Opatovice. Tyto zjištěné  $k$ -hodnoty jsou nižší, než  $k$ -hodnota pro elektrárenský popílek doporučená ČSN EN 206+A2 (0,4). Stejně jako u betonů bez plastifikační přísady jsou  $k$ -hodnoty nejvyšší pro strusku Štramberk. V tomto případě je  $k$ -hodnota ve stáří 7 dní rovna 0,3 až do náhrady 50 % cementu. Ve stáří 28 už je  $k$ -hodnota rovna 0,6. Tato hodnota odpovídá doporučené hodnotě podle ČSN 73 2404. Pro stáří 56 dní se  $k$ -hodnota zvýšila pouze pro náhradu cementu do 30 %, a to na hodnotu 0,7. Ve stáří 90 dní dosahuje  $k$ -hodnota pro náhradu cementu vysokopecní struskou do 30 % hodnoty 0,9 a pro náhrady od 30 do 50 % dosahuje hodnoty 0,7. U mikromletého vápence jsou  $k$ -hodnoty velmi podobné jako u betonů bez plastifikační přísady. Ve stáří 7 dní je  $k$ -hodnota pro tuto příměs rovna 0,3 a pro další stáří pouze 0,1.

### 13.3.6. Stanovení $k$ -hodnoty pomocí funkce pevnosti

Stanovení  $k$ -hodnoty pomocí funkce pevnosti je stejně jako při stanovení z naměřených hodnot pevností provedeno podle vzorce:

$$k = \frac{v \left( \frac{f_{c p,t}}{K} + a_t \right) - c}{p}$$

V tomto případě jsou dosazované hodnoty pevností v tlaku vypočtené z funkce pevnosti pro jednotlivé příměsi stanovené v 13.3.4. Stanovení funkcí pevnosti pomocí těchto funkcí byly i přepočítané koeficienty  $a$  a  $K$ .

### 13.3.6.1. Popílek Opatovice

$K=34,09$  MPa

Tabulka 63: Koeficienty  $a$  pro popílek Opatovice

Stáří [Dny]	7	28	56	90
$a$	0,78	0,50	0,36	0,27

Tabulka 64:  $k$ -hodnota vypočtená pro popílek Opatovice

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,6	0,6	0,6	0,6
30	0,5	0,5	0,5	0,5
50	0,4	0,5	0,5	0,5
70	0,4	0,4	0,4	0,4

Tabulka 65: Odchylky od skutečných hodnot

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	-0,1	0,6	0,8	0,5
30	-0,1	0,0	0,2	0,3
50	0,0	0,0	0,1	0,2
70	0,0	0,0	0,0	0,1

Směrodatná odchylka vypočtená z rozdílů  $k$ -hodnot vypočtených z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 0,3.

### 13.3.6.2. Struska Štramberk

$K=33,29$  MPa

Tabulka 66: Koeficient  $a$  pro strusku Štramberk

Stáří [Dny]	7	28	56	90
$a$	0,69	0,50	0,40	0,34

Tabulka 67:k-hodnota vypočtená pro strusku Štramberk

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,5	0,9	1,4	1,9
30	0,5	0,8	1,1	1,6
50	0,4	0,7	0,9	1,2
70	0,4	0,5	0,7	0,9

Tabulka 68: Odchylky od skutečných hodnot

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,3	0,5	0,2	-0,6
30	0,2	0,4	0,1	-0,2
50	0,1	0,4	0,2	-0,1
70	0,1	0,2	0,1	-0,1

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů  $k$ -hodnot vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 0,3.

### 13.3.6.3. Mikromletý vápenec

$K=34,34$  MPa

Tabulka 69: Koeficient  $a$  pro mikromletý vápenec

Stáří [Dny]	7	28	56	90
$a$	0,76	0,50	0,37	0,28

Tabulka 70:k-hodnota vypočtená pro mikromletý vápenec

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,4	0,3	0,1	0,1
30	0,4	0,2	0,1	0,0
50	0,4	0,2	0,1	0,0
70	0,3	0,2	0,0	0,0

Tabulka 71: Odchylky od skutečných hodnot

Náhrada cementu [%]	Stáří [Dny]			
	7	28	56	90
10	0,1	0,3	1,2	0,6
30	0,0	0,1	0,2	0,0
50	-0,1	0,0	0,0	-0,1
70	0,0	0,0	0,0	0,0

Směrodatná odchylka vypočítaná z rozdílů  $k$ -hodnot vypočítaných z funkce pevnosti a skutečných hodnot je 0,3.

Stanovení  $k$ -hodnoty pro popílek Opatovice pomocí funkce pevnosti dosahují nejvyšší odchylky pro náhradu 10 % cementu. Při této náhradě cementu popílkem Opatovice dochází k rozdílu  $k$ -hodnot o 50 %. Pro další náhrady jsou  $k$ -hodnoty přesnější. Pro náhradu 30, 50 a 70 % nedochází ve stáří 7 a 28 dní k téměř žádné odchylce od skutečných hodnot. Ale pro následující stáří už se odchylky zvyšují. Směrodatná odchylka rozdílů skutečných hodnot od vypočtených podle funkce pevnosti je 0,3.

Při strusku Štramberk nejsou jednotlivé odchylky od skutečných  $k$ -hodnot tak vysoké jako v případě popílku Opatovice v náhradě 10 %, ale v žádném případě nejsou odchylky rovny nule. I v tomto případě je směrodatná odchylka rozdílů skutečných hodnot od stanovených podle funkce pevnosti rovna 0,3.

U betonů s mikromletým vápencem je při náhradách 30 % a vyšších odchylka téměř nulová, to je pravděpodobně způsobeno tím, že  $k$ -hodnoty pro tyto náhrady a stáří jsou nízké nebo rovny nule. Pro náhradu 10 % jsou po 56 a 90 dnech odchylky vysoké. Pro 56 a 90 dní je odchylka téměř 100 %.

Stanovení  $k$ -hodnoty pomocí funkce pevnosti dosahuje velkých odchylek pro všechny zkoušené příměsi. K těmto odchylkám dochází i přesto, že stanovené funkce jsou přesné (mají vysoký koeficient determinace). Ale rozdíly pevností v tlaku vypočtené pro betony bez aktivní příměsi, které slouží pro stanovení koeficientů  $a$  a  $K$  a rozdíly vypočtených pevností v tlaku pro jednotlivé náhrady a stáří způsobují po dosazení do vzorce, pomocí kterého je  $k$ -hodnota stanovována už příliš vysokých rozdílů od skutečných  $k$ -hodnot. Stanovené funkce pevnosti lze zpřesnit vyšším množstvím zkoušených vzorků, dále také například eliminací případných výkyvů výsledků zkoušek využitím různých výrobních šarží stejného cementu a použitých příměsí. Tohle vše by, zároveň se zvýšením počtu zkušebních těles na pevnost v tlaku s jednou šarží mělo vést k větší přesnosti a validaci výsledků zkoušek a dosažených korelací. Tímto způsobem by se mohly funkce pevnosti natolik zpřesnit, že by nedocházelo k tak vysokým odchylkám  $k$ -hodnot, které byly pomocí těchto rovnic stanoveny.

## 14. Diskuse výsledků

U konzistence čerstvých malt s popílkem Opatovice došlo ve všech náhradách k téměř stejnému snížení konzistence, a to o 4 %. Naopak u betonů se konzistence, se zvyšující se náhradou cementu zvyšovala. Nejvyšší hodnota sednutí kužele u betonu s elektrárenským popílkem byla o 20 % vyšší než sednutí kužele referenčního betonu. Zvýšení konzistence s elektrárenským popílkem u betonu potvrzuje i vyšší redukce vody plastifikační přísadou pro dosažení stejné konzistence. U malt se struskou Štramberk nedošlo až do náhrady 30 % k žádné změně konzistence a pro vyšší náhrady už se konzistence snížila až o 12 %. U betonu se naopak konzistence téměř neměnila. Úplně stejný průběh konzistencí jako struska Štramberk měly malty a betony s mikromletým vápencem. U malt až do náhrady 30 % nedošlo k výrazné změně a s vyššími náhradami se konzistence snižovaly (o 10 %) a u betonů došlo u všech náhrad ke zvýšení konzistence o téměř 10 %.

Objemová hmotnost malt i betonů s elektrárenským popílkem měla stejný průběh. Se zvyšující se náhradou popílku se objemová hmotnost snižovala, a to jak v čerstvém, tak i ztvrdlém stavu. V tomto případě se objemová hmotnost snížila o 5 %. U malt a betonů se struskou Štramberk nedošlo k výrazné změně objemových hmotností. Také u betonů a malt s mikromletým vápencem byl průběh podobný jako u malt a betonů s popílkem Opatovice a se zvyšující se náhradou cementu se objemová hmotnost snížila také o cca 5 % objemové hmotnosti referenčních malt a betonů. Tyto hodnoty ukazují na minimální výkyvy homogenity jednotlivých namíchaných směsí a korespondují s různými měrnými hmotnostmi použitých pojiv a příměsí.

Pevnost v tlaku u malt s elektrárenským popílkem se se zvyšující se náhradou snižovala, například až na 11-17 % pevnosti v tlaku referenčního betonu pro náhradu 70 % a stáří 7-90 dní. Akorát po 90 dnech malta s 10% náhradou cementu elektrárenským popílkem dosahovala stejných pevností jako malta referenční. Dále malty s 30 % popílku mají ve stáří od 56 do 90 dní už vyšší nárůst pevností a indexů účinnosti o 10 % oproti nárůstům mezi 28 a 56 dny. Z toho lze usoudit, že probíhá pucoánová reakce a popílek začíná přispívat k pevnostem cementových malt. To se potvrdilo i na betonech, u kterých je možné pozorovat stejný progres zvyšování pevností v tlaku pro náhradu 30 % cementu elektrárenským popílkem pro stáří 56 a 90 dní. Beton s náhradou cementu 10 % elektrárenského popílku dosahuje oproti maltám pevnosti referenčního betonu už po 28 dnech. U malty je pro toto stáří index účinnosti pouze 82,10 % Z těchto hodnot lze usoudit, že optimální množství elektrárenského popílku jako náhrady cementu je do 30 % jeho hmotnosti. U malt se struskou Štramberk dochází po 28 dnech k vyššímu nárůstu pevností a indexu účinnosti než u malt s popílkem Opatovice (řádově o desítky procent), a to pro

všechny náhrady. To může být způsobeno i vyšším měrným povrchem vysokopecní strusky. Z toho lze usoudit, že latentně hydraulická reakce strusky Štramberk je rychlejší než pucolánová reakce popílku. Vyšších indexů účinnosti a pevností v tlaku dosahuje struska i pro náhradu 70 % cementu. Nejvyšší nárůst pevností je pro cementové malty s 30% náhradou cementu struskou. Pro tuto náhradu jsou indexy účinnosti mezi 92 a 110 % ve stáří 28 až 90 dní. Těmto hodnotám odpovídají i betony s 30% náhradou cementu vysokopecní struskou, které také dosahují nejvyšších pevností. V případě betonů byl nárůst pevností způsobený vysokopecní struskou zřetelný již po 28 dnech, kde pro náhrady 10-50 % dosahovaly tyto betony o 3-15 % vyšších pevností než betony referenční. Na základě těchto hodnot lze konstatovat, že strusku Štramberk lze použít až do náhrady 50 % bez výrazného vlivu na pevnost v tlaku po 28 dnech pro betony ovšem je potřeba vzít v úvahu i nižší indexy účinnosti (80-90 %) pro stáří 28 dní a náhradu cementu do 50 % vysokopecní struskou. Proto s ohledem na bezpečnost by bylo vhodnější uvažovat 30% náhradu strusky pro stáří 28 dní a vyšší náhrady pro stáří 56 dní a více. Pro malty a betony s mikromletým vápencem byly pevnosti v tlaku a indexy účinnosti pro náhrady vyšší než 30 % velmi nízké. Pro náhradu 50 % cementu byly indexy účinnosti 28,70 a 38,20 % ve stáří 7 a 90 dní. Pouze u betonů s náhradou 10 % cementu mikromletým vápencem dosahovaly pevnosti ve stáří 28 dní a více alespoň 95 % pevnosti v tlaku referenčního betonu. U vyšších náhrad byly téměř všechny indexy účinnosti nižší než 70 %. U malt a betonů s mikromletým vápencem nebyl pozorován ani vyšší nárůst pevností v tlaku způsobený nukleačním efektem mikromletého vápence. Z dosažených hodnot pevností tlaku lze usoudit, že optimální množství mikromletého vápence je mezi 10 a 30 % náhrady cementu, ale spíše se jedná o množství, které se blíží více k 10 % náhrady cementu.

Ze stanovených pevností v tlaku bylo možné sestavit pomocí regresní analýzy funkce pevnosti v tlaku, které jsou závislé na množství příměsi a stáří malt, nebo betonu. Tyto funkce umožňují výpočet množství příměsi, kterým lze nahradit cement CEM I 42,5 R pro dosažení požadovaných pevností v tlaku. Přesnost těchto rovnic je stanovena pomocí koeficientu determinace, který dosahuje hodnot 0-1 (0=nejméně přesný, 1=velmi přesný). Pro popílek Opatovice je koeficient 0,9896 pro maltu a 0,9518 pro beton. Na základě těchto hodnot lze říct, že tyto funkce jsou velmi přesné (odchylky do 5 %). I směrodatné odchylky vypočtené z rozdílů skutečných a vypočtených hodnot pevností jsou velmi nízké, a to 2,0 MPa pro maltu a 1,4 MPa pro beton. Pro malty a betony se struskou Štramberk jsou koeficienty determinace rovny 0,9586 pro maltu a 0,9265 pro beton. Tyto koeficienty determinace jsou ze všech stanovovaných rovnic nejnižší, a proto směrodatné odchylky rozdílů skutečných hodnot od vypočtených jsou vyšší. U malt je směrodatná odchylka rozdílů skutečných pevností od vypočtených 2,9 MPa u betonů 3,3 MPa. Podle nízkých

koeficientů determinace lze usoudit, že předpis funkce pevnosti v tlaku není vhodný pro daný druh příměsí, ale je třeba najít vhodnější předpis, který by lépe popisoval vývin pevností v tlaku pro malty a betony obsahující tuto příměs. Funkce pevnosti je nejpřesnější malty a batony s náhradou cementu mikromletým vápencem. Pro maltu je s mikromletým vápencem je koeficient determinace 0,9918 a pro beton 0,9834. Tomu odpovídají i nízké směrodatné odchylky rozdílů skutečných pevností v tlaku od pevností vypočtených z funkce pevnosti pro mikromletý vápenec. Pro maltu je směrodatná odchylka těchto rozdílů 1,8 MPa a pro beton 1,7 MPa.

U betonů s elektrárenským popílkem, ve kterých byla použita plastifikační přísada se potvrdily průběhy pevností betonu, ve kterých nebylo použito plastifikační přísady. I když výsledné pevnosti v tlaku byly nižší než referenční beton s plastifikační přísadou. U betonů bez plastifikační přísady dosahovaly stejné náhrady cementu elektrárenským popílkem pevností v tlaku bližší pevnosti referenčního betonu. U betonů s plastifikační přísadou a struskou Štramberk se pevnosti v tlaku snížili o 18 % pro třicetiprocentní náhradu cementu a o 25 % pro padesátiprocentní náhradu cementu ve stáří 28 dní. Po delším zrání už se pevnosti v tlaku batonů se struskou přibližovali pevnostem v tlaku referenčního betonu. To je pravděpodobně způsobeno různým množstvím záměsové vody, které bylo použito pro dosažení stejné konzistence betonů s plastifikační přísadou. To potvrzuje i různá redukce vody plastifikační přísadou pro betony s aktivními příměsemi. U mikromletého vápence je průběh pevností stejný jako u betonů bez plastifikační přísady, a se zvyšujícím se množstvím vápence se pevnosti v tlaku snižují. Ve stáří 7 a 90 dní byly pevnosti při 30% náhradě cementu mikromletým vápencem cca o 30 % nižší. Hlavním důvodem zkoušení pevností v tlaku betonů s plastifikační přísadou bylo, aby se zjistily průběhy pevností v tlaku pro různé množství náhrady cementu aktivní příměsí a pro různé stáří. Na základě tohoto zjištění lze posoudit, jestli lze pro betony s plastifikační přísadou stanovit podobné funkce pevnosti jako pro betony bez plastifikační přísady. Na základě dosažených výsledků, lze říct že pro popílek Opatovice a mikromletý vápenec by bylo možné stanovit stejným způsobem funkce pevnosti pro betony s plastifikační přísadou. Pro strusku Štramberk by pravděpodobně kvůli odlišnému průběhu pevností v tlaku vyšla funkce s nízkým koeficientem determinace, a tudíž funkce s nízkou přesností. V tomto případě je třeba brát v potaz, že průběh pevností v tlaku betonů se struskou Štramberk má jiný průběh než pevnost v tlaku elektrárenského popílku, nebo mikromletého vápence. Proto je možné, že při použití plastifikační přísady do betonu s náhradou cementu vysokopecní struskou bude průběh pevnosti v tlaku mít jiný průběh a koeficienty determinace funkce pevnosti tohoto betonu budou vyšší. Použití funkcí pevnosti stanovených na základě pevností betonu s aktivní příměsí a plastifikační přísadou se jeví jako vhodnější postup, protože hodnoty

více odpovídají skutečnosti. Tento postup je taky vhodnější z hlediska praxe, ve které se běžně do betonu přidávají plastifikační přísady.

Pomocí funkcí pevnosti byly stanovené i indexy účinnosti. To nám umožňuje predikci indexů účinnosti daných poměrů cementu a aktivních příměsí ve stáří 7, 28, 56 a 90 dní. Protože toto stanovení vychází z funkcí pevnosti, tak jejich koeficienty determinace jsou stejné jako u funkcí pevností v tlaku, a proto je opět nejpřesnější stanovení indexů účinnosti pro mikromletý vápenec a nejméně přesné pro strusku Štramberk.

Následně byly stanoveny  $k$ -hodnoty pro jednotlivé příměsi. U všech použitých příměsí byly nejvyšší  $k$ -hodnoty pro náhradu 10 % cementu. To je pravděpodobně způsobeno vysokým množstvím cementu, které  $k$ -hodnotu zkresluje. Dále je také nutno poznamenat, že náhrada 10 % cementu aktivní příměsí není v praxi příliš využívána. Pro tuto náhradu a stáří více než 28 dní byly  $k$ -hodnoty vyšší než 1. Pro vyšší náhrady se v případě popílku Opatovice  $k$ -hodnoty snižovaly až na hodnotu 0,4. U betonů se struskou Štramberk dosahovaly  $k$ -hodnoty vyšších hodnot než u popílku Opatovice. Vysokopeční struska dosahuje ve stáří 28 dní do náhrady 50 % cementu  $k$ -hodnoty 1 a vyšší. Pro náhradu 70 % je  $k$  rovno 0,8 a to pro stáří 28 dní a vyšší. Ve stáří 90 dní dosahuje struska Štramberk nejvyšší  $k$ -hodnoty pro náhradu 30 % cementu. Z těchto hodnot i z hodnot indexu účinnosti a pevností v tlaku lze říct, že struska je v této náhradě neaktivnější. Zajímavým jevem je, že ve stáří 56 dní u popílku a strusky v náhradě 10 % cementu je  $k$ -hodnota vyšší než ve stáří 90 dní. To je pravděpodobně způsobeno rozdílnými koeficienty  $a$ , které  $k$ -hodnotu ve vyšším stáří snižují, nebo vyšším procentuálním rozdílem pevností referenčního betonu a betonu s příměsí. Pro mikromletý vápenec jsou opět  $k$  nejvyšší pro 10% náhradu cementu. Ovšem při vyšších náhradách se  $k$ -hodnoty výrazně snižují a ve stáří 56 dní už dosahují téměř nulových hodnot. Podle dosažených výsledků lze říct, že optimální  $k$ -hodnota pro popílek Opatovice je 0,4 až 0,5 pro stáří do 7 a 28 dní pro náhradu cementu do 50 %. Pro další stáří už se  $k$ -hodnoty liší pro náhradu do 30 % a od 30 do 50 %. Pro strusku Štramberk je optimální  $k$ -hodnota rovna 0,6 pro stáří od 7 do 28 dní. Pro stáří 28 dní a více je  $k$  rovno 1 pro náhrady do 50 %. U mikromletého vápence je  $k$  rovno 0,3, ale v tomto případě je možné  $k$ -hodnotu stanovit pouze do náhrady třiceti procent cementu a do stáří do 28 dní, protože pro vyšší náhrady a delší stáří už vápenec nemá téměř žádný vliv na vývoj pevností betonu.  $K$ -hodnoty stanovené z betonů s plastifikační přísadou dosahovaly pro popílek Opatovice a strusku Štramberk nižších hodnot než  $k$ -hodnoty stanovené z betonů bez plastifikační příměsí. To je pravděpodobně způsobeno vyššími pevnostmi referenčního betonu, které jsou zapříčiněné použitím plastifikační přísady. Použití plastifikační přísady snížilo množství použité záměsové vody a tím se snížilo i množství kapilárních pórů snižujících pevnost betonu. Pro popílek Opatovice je v tomto případě  $k$ -hodnota rovna 0,2 pro náhradu cementu



do 50 % a stáří do 28 dní. Pro strusku Štramberk je  $k$ -hodnota ve stáří 7 dní rovna 0,3 a ve stáří 28 dní 0,6 pro náhrady do 50 % množství cementu. Potom se  $k$ -hodnoty dále zvyšují, ale už v žádném případě nedosahují hodnoty 1 nebo vyšší jako v případě betonů bez plastifikační přísady. Pro mikromletý vápenec jsou  $k$ -hodnoty velmi podobné jako u  $k$ -hodnot stanovených pomocí betonů bez plastifikační přísady. Ve stáří 7 dní je  $k$  rovno 0,3 a pro následující stáří je  $k$  rovno 0,1. Na základě dosažených  $k$ -hodnot je možné potom uvažovat použití betonů s aktivní příměsí do náročnějších expozičních tříd, protože výsledné množství pojiva a vodní součinitel jsou s použitím vyšších  $k$ -hodnot vyšší.

Dále byla posouzena možnost využití funkce pevnosti betonů pro stanovení  $k$ -hodnoty. V tomto případě došlo k vysokým odchylkám skutečných  $k$ -hodnot od vypočtených. Na základě tohoto zjištění je vhodné funkci pevnosti zpřesnit pomocí dalších výsledků zkoušek pevnosti v tlaku pro betony s náhradami cementu od 10 do 70 % aktivní příměsí

Při zjišťování vlivu aktivních příměsí na reologii cementových kaší pomocí rotačního reometru bylo zjištěno, že elektrárenský popílek má v nižších náhradách (do 30 %) pouze malý vliv na reologii. V tomto případě se torzní momenty příliš neměnily. Při vyšších náhradách už bylo zvýšení středních hodnot torzních momentů o 20 %. Dále bylo pozorováno, že po delším míchání kaše s elektrárenským popínkem reologie zhoršuje. V případě strusky Štramberk bylo pozorováno výrazné zhoršení reologií (nárůst středních hodnot torzních momentů až o 87 %). Zhoršení reologií bylo vyšší se zvyšující se náhradou cementu vysokopepční struskou. Při náhradě 70 % cementu neměla reologie hladký průběh. Zrna strusky se do sebe pravděpodobně zaklesávali, a to způsobilo různé hodnoty torzního momentu naměřené během několika sekund. Tento jev je pravděpodobně zapříčiněn tím, že struska má ostrá zrna. Tento jev byl předpokládán i u mikromletého vápence, ale v tomto případě došlo ke snížení torzních momentů, hlavně ve vyšších náhradách cementu mikromletým vápencem. Tato příměs jako jediná snižovala při vyšších dávkách torzní moment, a to až o 29 %. Při zkoušení reologických vlastností cementových kaší s aktivní příměsí a plastifikační přísadou na bázi modifikovaných naftalenformaldehydů bylo pozorováno, že u všech příměsí je po delším čase reologické vlastnosti zhoršují. Jinak byly průběhy torzních momentů velmi podobné jako u kaší bez plastifikační přísady.

## Závěr

Cílem diplomové práce bylo shrnout dosavadní poznatky o možnostech posouzení vlivu aktivních příměsí na beton a shrnutí poznatků o stanovení indexu účinnosti a možnostech použití aktivních příměsí do betonu.

Podle shrnutí poznatků z literatury bylo zjištěno, že elektrárenský popílek může mít pozitivní vliv na konzistenci čerstvého betonu. V ztvrdlém betonu má popílek v počátečních stářích nižší nárůst pevností než beton bez elektrárenského popílku. Ale ve stářích 90 dní a delších dosahuje beton s náhradou cementu popílkem vyšších pevností než beton referenční. U betonů s náhradou cementu vysokopecní struskou bylo zjištěno, že zvyšují konzistenci čerstvého betonu a mohou mít pozitivní vliv na kohezi a redukci krvácení betonu. Vysokopecní struska má taky pozitivní vliv na pevnosti v betonu, mrazuvzdornost, ale může mít negativní vliv na účinnost provzdušňovacích přísad. Vliv mikromletého vápence na beton je popsána pomocí tří efektů. Jedná se o efekt filleru, nukleační efekt a efekt ředění. Z chemického hlediska vápenec ovlivňuje zejména tvorbu ettringitu. Mikromletý vápenec má největší vliv na konzistenci betonu s náhradou cementu mikromletým vápencem díky efektu filleru a efektu ředění. Přidání mikromletého vápence do betonu může také ovlivnit, díky nukleačnímu efektu, dobu tuhnutí a tvrdnutí betonu. Část práce se zabývá indexem účinnosti a možnostmi posouzení a stanovení množství aktivní příměsí do maximálního vodního součinitele a minimálního množství cementu. Index účinnosti se v Evropské unii stanovuje pomocí EN 196-1 a v USA podle ASTM C311/311M. V obou případech se jedná o poměr pevnosti v tlaku referenční malty a malty s příměsí. Liší se zejména v navážkách jednotlivých složek malt a ošetřováním zatvrdlých zkušebních těles. Jako první uvedená možnost stanovení a posouzení započitatelného množství aktivní příměsí do minimálního množství pojiva a maximálního vodního součinitele je koncepce ekvivalentních vlastností betonu. Tato metoda se v České republice nepoužívá, ale je používá se v Nizozemsku a Belgii. Obě tyto metody porovnávají beton referenční a beton s příměsí pomocí trvanlivosti. Ekvivalentní vlastnosti v obou případech jsou založeny na rozdílu výsledků zkoušek trvanlivosti, ale v obou případech jsou jiné mezní parametry schválení ekvivalentních vlastností. Koncepce ekvivalentních kombinací je další metodou pro stanovení min. množství pojiva a max. vodního součinitele. Tato metoda se používá v Irsku, Portugalsku a Velké Británii. Tato metoda je založena na porovnání pevností v tlaku místo trvanlivosti a všechny tyto metody mají různé požadavky na požadované pevnosti v tlaku pro betony, nebo malty s příměsemi, mají povolené různé příměsi, pro které lze stanovit ekvivalentní kombinace a jiné referenční betony nebo malty. Poslední možností posouzení vlivu aktivní příměsí na max. vodní součinitel a minimální množství pojiva je koncepce  $k$ -hodnoty. Tato koncepce zavádí úpravu výpočtu vodního součinitele pomocí hodnoty  $k$ . Vodní součinitel

se v tomto případě rovná voda/(cement+k×příměs). Stanovení *k*-hodnoty je možné pomocí namíchání několika betonů s různými vodními součiniteli. Jedna série těchto betonů bude bez aktivní příměsi a druhá série s konstantním množstvím náhrady cementu aktivní příměsí.

Cílem praktické části práce bylo posouzení vlivu elektrárenského popílku, jemně mleté granulované vysokopecní strusky a mikromletého vápence na čerstvé a zatvrdlé cementové malty a betony v náhradách od 10 do 70 % z množství pojiva. Dále posoudit vliv těchto příměsí na reologii cementových kaší.

Na základě výsledků zkoušek konzistence čerstvých a betonů bylo zjištěno, že popílek Opatovice nemá výrazný vliv na konzistenci cementových malt a v betonu konzistenci zlepšuje až o 20 %. Zlepšení konzistence v betonu bylo potvrzeno i vyšší redukcí vody plastifikační přísadou pro dosažení stejné konzistence jako beton referenční. U strusky Štramberg bylo zjištěno, že u cementových malt nemá výrazný vliv na konzistenci až do náhrady 30 % a s vyšší náhradou se konzistence snížila až o 12 %. U betonu nebyl pozorován výrazný vliv vysokopecní strusky na konzistenci. Podobných výsledků konzistencí bylo dosaženo i v případě použití mikromletého vápence jako náhrady cementu. Pro popílek Opatovice byl v menších náhradách pozorován nízký vliv na reologii čerstvých cementových kaší. Při vyšších náhradách docházelo ke zhoršení reologie o 20 %. U popílku bylo také pozorováno zhoršení reologie v čase. U kaší se struskou Štramberg docházelo k výraznému zhoršení reologie (nárůst středních hodnot torzních momentů až o 87 %) oproti referenční receptuře. Kaše s mikromletým vápencem jako jediné vykazovaly při vyšších dávkách této příměsi zlepšení reologických vlastností, a to navzdory předpokladu, že pro mletý materiál se budou reologické vlastnosti zhoršovat. Na základě výsledků pevnosti v tlaku pro betony a cementové malty lze konstatovat, že popílek má pomalejší nárůst pevností v tlaku než struska Štramberg. To potvrzují výsledky indexů účinnosti, protože u strusky Štramberg bylo dosaženo vyšších indexů účinnosti ve všech stářích cementových malt než u popílku Opatovice. Mikromletý vápenec jako náhrada cementu má spíše negativní vliv na pevnosti v tlaku, a to jak pro cementové malty, tak i pro betony. Na základě dosažených výsledků lze říct, že optimální dávka popílku jako náhrady cementu je pro malty i betony do 30 %. U strusky se dá jako optimální dávka považovat náhrada cementu do 50 %. Malty s těmito dávkami dosahovaly dostatečně vysokých indexů účinnosti a pro betony dosahovaly podobných nebo vyšších pevností v tlaku než beton referenční. Pro mikromletý vápenec se optimální dávka pohybuje mezi 10 a 30 %. Při vyšších dávkách už má mikromletý vápenec negativní vliv na pevnost v tlaku cementových malt (indexy účinnosti pod 70 % pro náhradu 30 % cementu a vyšší) i betonu a k nárůstu pevnosti nijak nepřispívá. Těmto výsledkům odpovídají i stanovené *k*-hodnoty. V této práci

jsou posuzované  $k$ -hodnoty vztažené na množství jednotlivých příměsí a stáří. Pro popílek Opatovice lze  $k$ -hodnotu pro stáří 7 dní stanovit rovnou 0,4 pro všechny použité náhrady. Pro stáří 28 dní je optimální  $k$ -hodnota 0,5 až do náhrady 50 % cementu. Pro stáří 56 a 90 dní je  $k$ -hodnota pro popílek Opatovice rovna 0,7 až do náhrady 30 % cementu, pro náhradu 30-50 % je  $k$  rovno 0,6. Pro strusku Štramberk je optimální  $k$ -hodnota ve stáří 7 dní rovna 0,6 a to pro náhrady cementu až do 50 %. Pro další stáří se  $k$ -hodnota pro náhradu do 50 % blíží hodnotě 1. Jedná se však o výsledky zjištěné na malém množství zkušebních vzorků, které mohou být zatíženy velkou statistickou chybou. Pro náhradu cementu 70 % vysokopeční strusky je  $k$ -hodnota pro stáří 7 dní 0,5 a pro další stáří 0,8. Mikromletý vápenec dosahoval nejnižších  $k$ -hodnot. Pro betony s náhradou cementu vyšší než 30 % a ve stářích 56 a 90 dní bylo  $k$  rovno 0. To potvrzuje fakt, že vyšší dávka mikromletého vápence jako náhrady cementu není vhodná. Pro mikromletý vápenec je  $k$ -hodnota rovna 0,3 pro stáří do 28 dní a pro náhradu cementu do 30 %. Při stanovení  $k$ -hodnot z betonů s plastifikační přísadou byly  $k$ -hodnoty pro popílek a strusku výrazně nižší. Dále byly v této práci stanoveny funkce pevností v tlaku závislé na množství příměsí a stáří. Funkce pevnosti popílku Opatovice a mikromletého vápence dosahovaly vysokých koeficientů determinace (nad 0,97), proto je lze považovat za celkem přesné. V případě strusky Štramberk byly koeficienty determinace nižší. Podle stanovených funkcí pevnosti byly stanoveny i indexy účinnosti. Po výpočtu odchylek od skutečných hodnot můžeme usoudit, že stanovení indexů účinnosti pomocí funkce pevnosti je přesné i když se směrodatné odchylky rozdílu skutečných hodnot a vypočtených indexů účinnosti pohybují v intervalu od 3,5 do 6,5 %. Stanovené funkce pevnosti byly použity i pro stanovení  $k$ -hodnoty. V tomto případě však docházelo k vysokým odchylkám od skutečných hodnot. Z toho lze usoudit, že funkce není dostatečně přesná a je potřeba ji zpřesnit vyšším počtem vzorků. Z praktického hlediska je lepší stanovovat  $k$ -hodnoty a stanovené funkce pevnosti betonu na betonech s plastifikační přísadou a stejnou zpracovatelností, protože tento postup je pro praxi vhodnější

Závěrem je nutno říci, že téma využití aktivních příměsí do betonu jako částečné náhrady cementu a stanovení  $k$ -hodnoty je aktuální, protože se zabývá možností využití druhotných surovin namísto cementu. Je však třeba zpřesnit dosažené závislosti, například větším souborem zkušebních vzorků, aby výsledné předpisy funkce nebyly zatíženy velkou statistickou chybou. Další možností je stanovení a posouzení  $k$ -hodnot pro betony s kombinací různé náhrady cementu aktivní příměsí a různých vodních součinitelů pro tyto náhrady. V neposlední řadě by mohly být posouzeny a stanoveny také  $k$ -hodnoty pro kombinace aktivních příměsí a cementů typu CEM II/A.

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Emise CO <sub>2</sub> vyprodukované při výrobě cementu [6].....	16
Tabulka 2: Použité receptury betonu [8] .....	16
Tabulka 3: Přepočítané vlivy na životní prostředí [8] .....	17
Tabulka 4: Příklad zrnitosti elektrárenského popílku [19] .....	19
Tabulka 5: Zkoušky trvanlivosti pro dané stupně vlivu prostředí [47] .....	30
Tabulka 6: Limitní hodnoty d [47] .....	30
Tabulka 7: Limitní hodnoty T <sub>j</sub> [47] .....	31
Tabulka 8: Požadavky na pevnost v tlaku pro kombinace [51] .....	33
Tabulka 9: Požadavky na pevnost kombinace cementu a jemně mleté strusky [47].....	34
Tabulka 10: Fyzikální vlastnosti cementu CEM I 42,5 R Mokrý.....	43
Tabulka 11: Fyzikální vlastnosti popílku Opatovice .....	44
Tabulka 12: Fyzikální vlastnosti strusky Štramberk SMŠ 400 .....	44
Tabulka 13: fyzikální vlastnosti mikromletého vápence Carmeuse Mokrý .....	45
Tabulka 14: Stanovení procenta jemných částic.....	45
Tabulka 15: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva .....	46
Tabulka 16: Fyzikální vlastnosti DTK 0-4 mm, Žabčice .....	46
Tabulka 17: Stanovení procenta jemných částic.....	47
Tabulka 18: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva .....	47
Tabulka 19: Fyzikální vlastnosti HTK 4-8 mm, Žabčice .....	48
Tabulka 20: Stanovení procenta jemných částic.....	48
Tabulka 21: Výsledky stanovení síťového rozboru kameniva .....	48
Tabulka 22: Fyzikální vlastnosti HDK 8-16 mm, Olbramovice .....	49
Tabulka 23: Stupně sednutí kužele dle ČSN EN 12350-6 [57] .....	53
Tabulka 24: Receptury malt .....	55
Tabulka 25: Receptury cementových kaší .....	55
Tabulka 26: Receptury cementových kaší s plastifikační přísadou .....	56
Tabulka 27: Receptury betonů .....	56
Tabulka 28: Receptury betonů s plastifikační přísadou .....	57
Tabulka 29: Konzistence čerstvých malt.....	57
Tabulka 30: Objemová hmotnost čerstvých a zatvrdlých malt .....	58
Tabulka 31: Pevnost v tlaku cementových malt .....	60
Tabulka 32: Indexy účinnosti pro dané příměsi.....	62
Tabulka 33: Pevnosti vypočtené z funkce pro popílek Opatovice.....	67
Tabulka 34: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	67
Tabulka 35: Pevnosti vypočtené z funkce pro strusku Štramberk .....	68
Tabulka 36: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	69
Tabulka 37: Pevnosti vypočtené z funkce pro mikromletý vápenec .....	70
Tabulka 38: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	70
Tabulka 39: Indexy účinnosti pro popílek Opatovice .....	72

Tabulka 40: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot .....	73
Tabulka 41: Indexy účinnosti pro strusku Štramberk .....	73
Tabulka 42: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot .....	74
Tabulka 43: Indexy účinnosti pro mikromletý vápenec .....	74
Tabulka 44: Rozdíl vypočtených indexů od skutečných od skutečných hodnot .....	75
Tabulka 45: Střední hodnoty torzního momentu .....	75
Tabulka 46: Střední hodnota torzního momentu cementových kaší s plastifikační přísadou .....	76
Tabulka 47: Konzistence čerstvých betonů.....	79
Tabulka 48: Redukce vody plastifikační přísadou .....	80
Tabulka 49: Objemová hmotnost čerstvých a ztvrdlých betonů.....	81
Tabulka 50: Pevnost v tlaku betonů .....	82
Tabulka 51: Pevnost v tlaku pro popílek Opatovice vypočtená z funkce pevnosti .....	87
Tabulka 52: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	87
Tabulka 53: Pevnost v tlaku pro strusku Štramberk vypočtená z funkce pevnosti .....	88
Tabulka 54: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	89
Tabulka 55: Pevnost v tlaku pro mikromletý vápenec vypočtená z funkce pevnosti .....	90
Tabulka 56: Rozdíl vypočtených pevností od skutečných hodnot .....	90
Tabulka 57: Koeficient $\alpha$ pro stáří 7, 28, 56 a 90 dní .....	92
Tabulka 58: k-hodnota pro popílek Opatovice .....	93
Tabulka 59: k-hodnota pro strusku Štramberk .....	93
Tabulka 60: k-hodnota pro mikromletý vápenec .....	94
Tabulka 61: Koeficienty $\alpha$ a $\beta$ pro betony s plastifikační přísadou .....	95
Tabulka 62: k-hodnoty stanovené z betonů s plastifikační přísadou .....	95
Tabulka 63: Koeficienty $\alpha$ a $\beta$ pro popílek Opatovice .....	98
Tabulka 64: k-hodnota vypočtená pro popílek Opatovice .....	98
Tabulka 65: Odchyly od skutečných hodnot.....	98
Tabulka 66: Koeficient $\alpha$ a $\beta$ pro strusku Štramberk .....	98
Tabulka 67: k-hodnota vypočtená pro strusku Štramberk .....	99
Tabulka 68: Odchyly od skutečných hodnot.....	99
Tabulka 69: Koeficient $\alpha$ a $\beta$ pro mikromletý vápenec .....	99
Tabulka 70: k-hodnota vypočtená pro mikromletý vápenec.....	99
Tabulka 71: Odchyly od skutečných hodnot.....	99

## Seznam grafů

Graf 1: Granulometrie cementu CEM I 42,5 R Mokrý	43
Graf 2: Granulometrie elektrárenského popílku Opatovice	43
Graf 3: Granulometrie Strusky Štramberk SMŠ 400	44
Graf 4: Granulometrie mikromletého vápence Carmeuse Mokrý	45
Graf 5: Křivka zrnitosti DTK 0-4 mm, Žabčice	46
Graf 6: Křivka zrnitosti HTK 4-8 mm, Žabčice	47
Graf 7: Křivka zrnitosti HDK 8-16 mm, Olbramovice	49
Graf 8: Konzistence čerstvých malt	57
Graf 9: Objemová hmotnost čerstvých a zatvrdlých malt	59
Graf 10: Pevnost v tlaku pro malty s elektrárenským popílkem	60
Graf 11: Pevnost v tlaku pro malty se Struskou Štramberk	61
Graf 12: pevnost v tlaku pro malty s mikromletým vápencem	61
Graf 13: Index účinnosti pro popílek Opatovice	63
Graf 14: Index účinnosti pro strusku Štramberk	63
Graf 15: Index účinnosti pro mikromletý vápenec	63
Graf 16: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro popílek Opatovice	66
Graf 17: Závislost pevnosti v tlaku na stáří pro strusku Štramberk	67
Graf 18: Závislost pevnosti v tlaku na čase pro mikromletý vápenec	69
Graf 19: Střední hodnoty torzních momentů	76
Graf 20: Střední hodnoty kaší s plastifikační přísadou	76
Graf 21: Průběh torzního momentu popílku Opatovice v čase	77
Graf 22: Grafické znázornění torzního momentu strusky Štramberk v čase	77
Graf 23: Grafické znázornění torzního momentu mikromletého vápence v čase	77
Graf 24: Vliv plastifikační přísady na reologii cementových past s příměsemi	78
Graf 25: Konzistence čerstvého betonu	79
Graf 26: Redukce vody plastifikační přísadou	80
Graf 27: Objemová hmotnost čerstvého a ztvrdlého betonu	81
Graf 28: Pevnost v tlaku pro popílek Opatovice	83
Graf 29: Vliv plastifikační přísady na pevnost v tlaku betonu s popílkem Opatovice	83
Graf 30: Pevnost v tlaku pro strusku Štramberk	83
Graf 31: Vliv plastifikační přísady na pevnost betonu se struskou Štramberk	84
Graf 32: Pevnost v tlaku pro mikromletý vápenec	84
Graf 33: Vliv plastifikační přísady na pevnost betonu s mikromletým vápencem	84
Graf 34: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro popílek Opatovice	86
Graf 35: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro strusku Štramberk	87
Graf 36: Grafické znázornění pevnosti v tlaku v závislosti na čase pro mikromletý vápenec	89
Graf 37: k-hodnota pro popílek Opatovice	93
Graf 38: k-hodnota pro strusku Štramberk	94
Graf 39: k-hodnota pro mikromletý vápenec	94

Graf 40: k-hodnota stanovená z betonů s plastifikační přísadou .....	95
--	----



## Seznam obrázků

Obrázek 1: Klasifikační schéma aktivních příměsí (Pod přerušovanou čarou jsou umístěny aktivní příměsí, jejichž aktivita se zatím zkoumá) [3].....	14
Obrázek 2: Pozice aktivních příměsí v trojném diagramu CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> [4].....	15
Obrázek 3: Hydratační fáze aktivních příměsí v trojném diagramu CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> [4] .....	15
Obrázek 4: Vysokoteplotní spalování uhlí [13].....	18
Obrázek 5: Spalování ve fluidním loži [12] .....	18
Obrázek 6: Vysoká pec [27] .....	22
Obrázek 7: Princip koncepce k-hodnoty [52] .....	37
Obrázek 8: Příklad stanovení empirických koeficientů ze závislosti pevnosti v tlaku na vodním součiniteli [47].....	38
Obrázek 9: Schéma metodiky experimentální části práce .....	40
Obrázek 10: Měřicí soustava pro stanovení reologických vlastností .....	52
Obrázek 11: Grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Opatovice .....	66
Obrázek 12: Grafické znázornění funkce pevnosti pro strusku Štramberk.....	68
Obrázek 13: Grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec.....	70
Obrázek 14: Grafické znázornění indexu účinnosti pro popílek Opatovice .....	72
Obrázek 15: Grafické znázornění indexu účinnosti pro strusku Štramberk.....	73
Obrázek 16: Grafické znázornění indexu účinnosti pro mikromletý vápenec .....	74
Obrázek 17: Grafické znázornění funkce pevnosti v tlaku pro popílek Opatovice.....	86
Obrázek 18: Grafické znázornění pevnosti v tlaku pro strusku Štramberk.....	88
Obrázek 19: Grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec .....	90

## Seznam použité literatury

- [1] SVOBODA ET AL, Luboš. Stavební hmoty [online]. 3. Praha: Jaga Group, 2003 [cit. 2021-6-21]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/>
- [2] ČSN EN 206+A2. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Praha: Centrum technické normalizace, 2021.
- [3] SNELLINGS, Ruben, Gilles MERTENS a Jan ELSEEN. Supplementary Cementitious Materials. Mineralogy and Geochemistry. 2012, 74(1), 211-278. Dostupné z: doi:10.2138/rmg.2012.74.6
- [4] LOTHENBACH, Barbara, Karen SCRIVENER a R.D. HOOTON. Supplementary cementitious materials. Cement and Concrete Research [online]. 2011, 41(12), 1244-1256 [cit. 2021-6-22]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2010.12.001s
- [5] PYTLÍK, Petr. Technologie betonu. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000. Učebnice (VUTIUM). ISBN 80-214-1647-5.
- [6] VAN DEN HEEDE, P. a N. DE BELIE. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations. Cement and Concrete Composites [online]. 2012, 34(4), 431-442 [cit. 2021-6-22]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2012.01.004
- [7] TEH, Soo Huey, Thomas WIEDMANN, Arnaud CASTEL a James DE BURGH. Hybrid life cycle assessment of greenhouse gas emissions from cement, concrete and geopolymers in Australia. Journal of Cleaner Production [online]. 2017, 152, 312-320 [cit. 2021-6-22]. ISSN 09596526. Dostupné z: doi:10.1016/j.jclepro.2017.03.122
- [8] HOSSAIN, Md. Uzzal, Chi Sun POON, Ya Hong DONG a Dongxing XUAN. Evaluation of environmental impact distribution methods for supplementary cementitious materials. Renewable and Sustainable Energy Reviews [online]. 2018, 82, 597-608 [cit. 2021-6-27]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.09.048
- [9] VAN DEN HEEDE, Philip. Durability and Sustainability of Concrete with High Volumes of Fly Ash. Ghent University, Belgium, 2014. ISBN ISBN 978-90-8578-715-0.
- [10] BEHL, Vishal, Vinay SINGH, Vijay DAHIYA a Ajay KUMAR. Characterization of physico-chemical and functional properties of fly ash concrete mix. Materials Today: Proceedings [online]. 2021 [cit. 2021-7-12]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2021.06.353
- [11] CHINDAPRASIRT, Prinya a Ubolluk RATTANASAK. Utilization of blended fluidized bed combustion (FBC) ash and pulverized coal combustion (PCC) fly ash in geopolymer. Waste Management [online]. 2010, 30(4), 667-672 [cit. 2021-7-18]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2009.09.040
- [12] SARKAR, Dipak K. Fluidized-Bed Combustion Boilers. Thermal Power Plant [online]. Elsevier, 2015, 2015, , 159-187 [cit. 2021-7-18]. ISBN 9780128015759. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-801575-9.00005-6

- [13] FRANCO, Alessandro a Ana R. DIAZ. The future challenges for “clean coal technologies”: Joining efficiency increase and pollutant emission control. *Energy* [online]. 2009, 34(3), 348-354 [cit. 2021-7-18]. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2008.09.012
- [14] WESCHE, K. *Fly Ash in Concrete: Properties and Performance*. Rilem: Chapman & Hall, 2005. ISBN 0-203-63026-2.
- [15] ČSN EN 197-1 ED. 2. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Centrum technické normalizace, 2012.
- [16] CHINDAPRASIRT, Prinya, Chai JATURAPITAKKUL, Wichian CHALEE a Ubolluk RATTANASAK. Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management* [online]. 2009, 29(2), 539-543 [cit. 2021-7-21]. ISSN 0956053X. Dostupné z: doi:10.1016/j.wasman.2008.06.023
- [17] CHANDRA, Satish. *Waste Materials Used in Concrete Manufacturing*. Westwood, New Jersey, U.S.A.: Noyes Publication, 1997. ISBN 0-8155-1393-3.
- [18] BOUZOUBAË, N., M.H. ZHANG, A. BILODEAU a V.M. MALHOTRA. The effect of grinding on the physical properties of fly ashes and a portland cement clinker. *Cement and Concrete Research* [online]. 1997, 27(12), 1861-1874 [cit. 2021-7-22]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(97)00194-4
- [19] GUNTER, Francis A. *Residues of Pesticides and Other Contaminants in the Total Environment* [online]. New York: Springer-Verlag, 1979 [cit. 2021-7-22]. ISBN 978-1-4612-6185-8. Dostupné z: <https://tr.zlibcdn2.com/book/2137596/6944eb>
- [20] MATSUNAGA, T, J.K KIM, S HARDCASTLE a P.K ROHATGI. Crystallinity and selected properties of fly ash particles. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2002, 325(1-2), 333-343 [cit. 2021-7-22]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/S0921-5093(01)01466-6
- [21] LI, Gengying a Xiaozhong WU. Influence of fly ash and its mean particle size on certain engineering properties of cement composite mortars. *Cement and Concrete Research* [online]. 2005, 35(6), 1128-1134 [cit. 2021-7-27]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2004.08.014
- [22] ERDOĞDU, Şakir, Caner ARSLANTÜRK a Şirin KURBETCI. Influence of fly ash and silica fume on the consistency retention and compressive strength of concrete subjected to prolonged agitating. *Construction and Building Materials* [online]. 2011, 25(3), 1277-1281 [cit. 2021-7-27]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.09.024
- [23] HALSTEAD, Woodrow J. *USE OF FLY ASH IN CONCRETE*. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 1986. ISBN 978-0-309-04401-1.
- [24] CHOUSIDIS, N., E. RAKANTA, I. IOANNOU a G. BATIS. Mechanical properties and durability performance of reinforced concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 101, 810-817 [cit. 2021-7-27]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.127
- [25] THOMAS, Michael. *Optimizing the Use of Fly Ash in Concrete* [online]. Skokie, Illinois, 2007 [cit. 2021-7-28]. Dostupné z: [https://www.cement.org/docs/default-source/fc\\_concrete\\_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf](https://www.cement.org/docs/default-source/fc_concrete_technology/is548-optimizing-the-use-of-fly-ash-concrete.pdf)

- [26] YUKSEL, Isa. Blast-furnace slag. Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete [online]. Elsevier, 2018, 2018, , 361-415 [cit. 2021-7-28]. ISBN 9780081021569. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2
- [27] GAO, Chuanhou, Qinghuan GE a Ling JIAN. Rule Extraction From Fuzzy-Based Blast Furnace SVM Multiclassifier for Decision-Making. IEEE Transactions on Fuzzy Systems [online]. 2014, 22(3), 586-596 [cit. 2021-7-28]. ISSN 1063-6706. Dostupné z: doi:10.1109/TFUZZ.2013.2269145
- [28] HUSSAIN, Faisal, Inderpreet KAUR a Amir HUSSAIN. Reviewing the influence of GGBFS on concrete properties. Materials Today: Proceedings [online]. 2020, 32, 997-1004 [cit. 2021-7-28]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2020.07.410
- [29] OSMANOVIC, Zehrudin, Nedžad HARAČIĆ a Jelica ZELIĆ. Properties of blastfurnace cements (CEM III/A, B, C) based on Portland cement clinker, blastfurnace slag and cement kiln dusts. Cement and Concrete Composites [online]. 2018, 91, 189-197 [cit. 2021-7-29]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.05.006
- [30] ADOLFSSON, Daniel, Ryan ROBINSON, Fredrik ENGSTRÖM a Bo BJÖRKMAN. Influence of mineralogy on the hydraulic properties of ladle slag. Cement and Concrete Research [online]. 2011, 41(8), 865-871 [cit. 2021-7-29]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2011.04.003
- [31] SARANYA, P, Praveen NAGARAJAN a A P SHASHIKALA. Eco-friendly GGBS Concrete: A State-of-The-Art Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 330 [cit. 2021-8-3]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/330/1/012057
- [32] KHATIB, J.M. a J.J. HIBBERT. Selected engineering properties of concrete incorporating slag and metakaolin. Construction and Building Materials [online]. 2005, 19(6), 460-472 [cit. 2021-8-3]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2004.07.017
- [33] WANG, Dehui, Caijun SHI, Nima FARZADNIA, Zhenguo SHI, Huangfei JIA a Zhihua OU. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures. Construction and Building Materials [online]. 2018, 181, 659-672 [cit. 2021-8-7]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075
- [34] POITEVIN, P. Limestone aggregate concrete, usefulness and durability. Cement and Concrete Composites [online]. 1999, 21(2), 89-97 [cit. 2021-8-7]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/S0958-9465(98)00047-X
- [35] AQEL, M. a D.K. PANESAR. Hydration kinetics and compressive strength of steam-cured cement pastes and mortars containing limestone filler. Construction and Building Materials [online]. 2016, 113, 359-368 [cit. 2021-8-11]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.03.031
- [36] DE WEERDT, K., M. Ben HABA, G. LE SAOUT, K.O. KJELLEN, H. JUSTNES a B. LOTHENBACH. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research [online]. 2011, 41(3), 279-291 [cit. 2021-8-11]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2010.11.014

- [37] WANG, Dehui, Caijun SHI, Nima FARZADNIA, Zhenguo SHI a Huangfei JIA. A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2018, 192, 153-166 [cit. 2021-8-12]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119
- [38] BENTZ, Dale P., Ahmad ARDANI, Tim BARRETT, et al. Multi-scale investigation of the performance of limestone in concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, 75, 1-10 [cit. 2021-8-12]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.042
- [39] MOON, Gyu Don, Sungwoo OH, Sang Hwa JUNG a Young Cheol CHOI. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete. *Construction and Building Materials* [online]. 2017, 135, 129-136 [cit. 2021-8-22]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.12.189
- [40] THORSTENSEN, Rein Terje a Per FIDJESTOL. Inconsistencies in the pozzolanic strength activity index (SAI) for silica fume according to EN and ASTM. *Materials and Structures* [online]. 2015, 48(12), 3979-3990 [cit. 2021-9-15]. ISSN 1359-5997. Dostupné z: doi:10.1617/s11527-014-0457-6
- [41] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu: Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Centrum technické normalizace, 2016.
- [42] DONATELLO, S., M. TYRER a C.R. CHEESEMAN. Comparison of test methods to assess pozzolanic activity. *Cement and Concrete Composites* [online]. 2010, 32(2), 121-127 [cit. 2021-10-8]. ISSN 09589465. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.10.008
- [43] AVET, François, Ruben SNELLINGS, Adrian ALUJAS DIAZ, Mohsen BEN HAHA a Karen SCRIVENER. Development of a new rapid, relevant and reliable (R3) test method to evaluate the pozzolanic reactivity of calcined kaolinitic clays. *Cement and Concrete Research* [online]. 2016, 85, 1-11 [cit. 2021-10-8]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2016.02.015
- [44] SIVAKUMAR, Pithchai Pandian, Stijn MATTHYS, Nele DE BELIE a Elke GRUYAERT. Reactivity Assessment of Modified Ferro Silicate Slag by R3 Method. *Applied Sciences* [online]. 2021, 11(1) [cit. 2021-10-8]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: doi:10.3390/app11010366
- [45] LIU, J. a J. YU. *Toward Greener and Designed Synthesis of Zeolite Materials. Zeolites and Zeolite-Like Materials* [online]. Elsevier, 2016, 2016, , 1-32 [cit. 2021-11-14]. ISBN 9780444635068. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-444-63506-8.00001-X
- [46] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu: Část 1. Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Centrum technické normalizace, 2012.
- [47] CEN/TR 16639: 2014 *Technická normalizačná informácia "Použitie koncepcie k – hodnoty, koncepcie ekvivalentných vlastností betónu a kombinovanej koncepcie ekvivalentných vlastností betónu"*
- [48] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace*. Praha: Centrum technické normalizace, 2016.

- [49] DE SCHUTTER, Geert. The Quest for Absolute Concrete Durability Performance Criteria. *Key Engineering Materials* [online]. 2016, 711, 599-606 [cit. 2021-11-15]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.711.599
- [50] De Schutter G. How to evaluate equivalent concrete performance following EN 206-1: the Belgian approach. In: Kovler K, editor. *Concrete Durability and Service Life Planning, 2nd International RILEM workshop, Proceedings*. Bagneux, France: RILEM Publications; 2009. p. 1–7.
- [51] BS 8500-2:2015+A1:2016. *Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206: Part 2: Specification for constituent materials and concrete. 3*. Londýn: The British Standards Institution, 2016.
- [52] BIJEN, J. a R. VAN SELST. Cement equivalence factors for fly ash. *Cement and Concrete Research*. 1993, 23(5), 1029-1039. DOI: 10.1016/0008-8846(93)90162-3. ISSN 00088846. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008884693901623>
- [53] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku)*. Praha: Centrum technické normalizace, 2000.
- [54] ČSN EN 1015-6+A1. *Zkušební metody malt pro zdivo: Stanovení objemové hmotnosti čerstvé malty*. Praha: Centrum technické normalizace, 2007.
- [55] ČSN EN 1015-10. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 10: Stanovení objemové hmotnosti suché zatvrdlé malty*. Praha: Centrum technické normalizace, 2000.
- [56] ČSN EN 12350-6. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 6: Objemová hmotnost*. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
- [57] ČSN EN 12350–2. *Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím*. 2009. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
- [58] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
- [59] ČSN EN 12390-3/Z1. *Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Centrum technické normalizace, 2020.
- [60] ABDUL-MAULA, S. Possibilities of quantitative determination of the AFt-(ettringite) and AFm-(monosulphate) phases in hydrated cement pastes. *Cement and Concrete Research* [online]. 1984, 14(1), 133-141 [cit. 2021-12-21]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/0008-8846(84)90089-9
- [61] Koeficient determinace. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2021-12-22]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Koeficient\\_determinace](https://cs.wikipedia.org/wiki/Koeficient_determinace)
- [62] BADOGIANNIS, E., V.G. PAPADAKIS, E. CHANIOTAKIS a S. TSIVILIS. Exploitation of poor Greek kaolins: strength development of metakaolin concrete and evaluation by means of k-value. *Cement and Concrete Research* [online]. 2004, 34(6), 1035-1041 [cit. 2021-12-29]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/j.cemconres.2003.11.014
- [63] LI, Chen, Xian Zheng GONG, Su Ping CUI, Zhi Hong WANG, Yan ZHENG a Bi Chuan CHI. CO<sub>2</sub> Emissions due to Cement Manufacture. *Materials Science Forum* [online].

2011, 685, 181-187 [cit. 2022-01-04]. ISSN 1662-9752. Dostupné z:  
doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.685.181

- [64] Petr Šperling, Studium koncepce K-hodnoty a indexu účinnosti pro popílek a strusku a jejich posouzení a stanovení pro betony. Brno, 2020. 80 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Adam Hubáček, Ph.D.