



# 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

## OPTIMALIZACE VYUŽÍVÁNÍ AKTIVNÍCH PŘÍMĚSI VE SMĚSNÝCH CEMENTECH A STANOVENÍ K HODNOTY

OPTIMIZING THE USE OF ACTIVE ADMIXTURES IN MIXED CEMENTS AND DETERMINING THE K VALUE

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Hana Kužílková

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

BRNO 2023

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav technologie stavebních hmot a dílců  
Studentka: **Hana Kužílková**  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.**  
Akademický rok: 2022/23  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Stavebně materiálové inženýrství

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## **Optimalizace využívání aktivních příměsí ve směsných cementech a stanovení k hodnoty**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Tato bakalářská práce se zabývá možností nahrazení cementu aktivními příměsemi. Konkrétní aktivní příměši, které nahrazují část cementu v betonu jsou mikromletý vápenec, elektrárenský popílek a vysokopepční struska. Použití příměsí jako náhrady cementu má vliv na vlastnosti betonu, jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu. Proto jsou v teoretické části této práce shrnuty poznatky o příměších a jejich vliv na vlastnosti čerstvého a zatvrdlého betonu. Dále je zde uvedena krátká charakteristika portlandských směsných cementů, základní informace o indexu účinnosti a koncepci k-hodnoty. V praktické části bakalářské práce je kladen důraz na stanovení indexu účinnosti a sledování dvou základních vlastností betonu, konzistence a pevnosti v tlaku.

### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

Cílem teoretické části bude shrnout současný stav používání k – hodnoty podle příslušných ČSN, EN. Vysvětlit dopady k- hodnoty na navrhování složení betonů v souvislosti s indexem účinnosti a posoudit možnosti předefinování k-hodnoty při zohlednění aktivity dané příměsí.

V praktické části práce stanovte indexy účinnosti pro aktivní příměši - jemně mletá struska, vysokoteplotní popílek a mikromletý vápenec. Na cementových normových maltách ověřte možnosti 25, 35 a 50% náhrady cementu CEM I 42,5. Stanovte dopady na konzistenci malt při konst. vodním součiniteli a pevností po 2, 7, 28, 60 a 90 dnech zrání. Dále posuďte ekonomický přínos těchto příměsí při částečné náhrady.

Předpokládaný rozsah bakalářské práce 40 až 50 stran.

### **Seznam doporučené literatury a podklady:**

1.ČSN EN 206+A1 Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda

Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně / Veveří 331/95 / 602 00 / Brno

2. ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplňující informace

3. Hela, R.: Technologie betonu I a II, učební opory VUT FAST Brno

4. Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

5. České a zahraniční časopisy

6. Internetové zdroje, Science Direct apod.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 9. 11. 2022

L. S.

---

doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.  
vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.  
vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.  
děkan

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá možností využití příměsí jako částečné náhrady cementu v betonu. Tato práce se zabývá náhradou cementu třemi konkrétními příměsemi: mikromletým vápencem, elektrárenským popílkem a vysokopecní struskou. Při použití příměsí jako částečné náhrady cementu má přídavek příměsí vliv na vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Teoretická část práce se věnuje popisu příměsí a jejich vlivu na vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Dále jsou v teoretické části uvedeny základní informace o indexu účinnosti a k-hodnotě. Cílem praktické části bakalářské práce je stanovení indexů účinnosti daných příměsí a snaha alespoň teoreticky určit k-hodnoty daných příměsí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Příměs, mikromletý vápenec, popílek, jemně mletá vysokopecní granulovaná struska, beton, portlandský směsný cement, index účinnosti, koncepce k-hodnoty.

## ABSTRACT

The goal of this bachelor's thesis is to examine the possibility of using admixtures as a partial substitute for cement in concrete. The thesis examines the replacement of cement with three specific additives: micronized limestone, power plant fly ash and blast furnace slag. When using an admixture as a partial replacement for cement, the addition of the admixture affects the properties of both fresh and hardened concrete. The theoretical part of the work is devoted to the description of admixtures and their influence on the properties of fresh and hardened concrete. Furthermore, basic information on the efficiency index and k-value is presented. The aim of the practical part of the bachelor's thesis is to determine the efficiency indices of the given additives as well as their k-values.

## KEYWORDS

Admixture, micronized limestone, fly ash, finely ground blast furnace granulated slag, concrete, Portland mixed cement, efficiency index, k-value concept.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUŽÍLKOVÁ, Hana. *Optimalizace využívání aktivních přísady ve směsných cementech a stanovení k hodnoty*. Brno, 2023. 78 s., 0 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Optimalizace využívání aktivních příměsí ve směsných cementech a stanovení k hodnoty* zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 15. 5. 2023

---

Hana Kužílková

autor

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat vedoucímu své bakalářské práce panu prof. Ing. Rudolfu Helovi CSc. za odborné vedení a za pomoc a rady při zpracování této práce. Dále bych ráda poděkovala zaměstnancům Ústavu technologie stavebních hmot a dílců, zaměstnancům výzkumného centra AdMas a všem, kteří mi byli při psaní práce, jakkoliv nápomocni.

# OBSAH

ÚVOD .....	10
CÍLE PRÁCE .....	11
TEORETICKÁ ČÁST .....	12
1. Příměsi do betonů .....	12
1.1. Dělení příměsí do betonů .....	12
2. Mikromletý vápenec .....	15
2.1. Obecný popis vápence .....	15
2.2. Mikromletý vápenec jako příměs .....	15
2.3. Mechanismy působení mikromletého vápence v betonu .....	16
2.4. Vlastnosti betonu s mikromletým vápencem .....	17
3. Popílek .....	18
3.1. Obecný popis popílku .....	18
3.2. Výroba popílku .....	18
3.3. Vlastnosti popílku .....	20
3.4. Chemické složení .....	20
3.5. Mineralogické složení .....	21
3.6. Fyzikální vlastnosti popílku .....	21
3.7. Normativní požadavky na popílek .....	22
3.8. Vlastnosti betonu s popílkem .....	23
4. Vysokopecní struska .....	26
4.1. Obecný popis strusky .....	26
4.2. Výroba vysokopecní strusky .....	26
4.3. Chemické a mineralogické složení .....	26
4.4. Fyzikální vlastnosti strusky .....	27
4.5. Normativní požadavky na vysokopecní strusku .....	27
4.6. Vlastnosti betonu s obsahem vysokopecní strusky .....	28
5. Portlandský směsný cement .....	28
5.1. Použití cementu do betonu .....	29
5.2. Vliv granulované vysokopecní strusky na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného .....	29
5.3. Vliv popílku na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného .....	30
5.4. Vliv vápence na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného .....	31
5.5. Obecný závěr .....	31
6. Index účinnosti .....	32
6.1. Index účinnosti pro popílek .....	32
6.2. Index účinnosti pro jemně mletou granulovanou strusku .....	32

6.3. Index účinnosti pro mikromletý vápenec.....	32
7. Koncepce <i>k</i> -hodnoty .....	33
7.1. Princip koncepce <i>k</i> -hodnoty .....	33
7.2. Metoda výpočtu <i>k</i> -hodnoty .....	34
7.3. Doporučení pro použití <i>k</i> -hodnoty .....	35
7.4. Koncepce <i>k</i> -hodnoty dle ČSN EN 206+A2 .....	35
7.5. Využití <i>k</i> -hodnoty při navrhování betonů .....	37
7.6. Pohlížení na koncepci <i>k</i> -hodnoty, možnost předefinování <i>k</i> -hodnoty a souvislost <i>k</i> -hodnoty a indexu účinnosti .....	38
PRAKTICKÁ ČÁST .....	39
8. Cíl praktické části.....	39
9. Schéma praktické části .....	40
10. Popis vstupních surovin .....	41
10.1. Cement .....	41
10.2. Kamenivo.....	41
10.3. Záměsová voda.....	43
10.4. Příměsi.....	43
11. Postupy provedených zkoušek.....	45
11.1. Zkoušky provedené na čerstvých maltách.....	45
11.2. Zkoušky provedené na zatvrdlých maltách.....	46
11.3. Zkoušky provedené na čerstvém betonu .....	47
11.4. Zkoušky provedené na zatvrdlém betonu .....	48
12. Složení receptur malt a betonů.....	50
12.1. Receptury malt .....	50
12.2. Receptury betonů.....	51
13. Výsledky zkoušek a jejich vyhodnocení.....	51
13.1. Výsledky zkoušek čerstvých malt .....	51
13.2. Výsledky zkoušek zatvrdlých malt .....	53
13.3. Výsledky zkoušek čerstvých betonů .....	64
13.4. Výsledky zkoušek zatvrdlých betonů .....	65
13.5. Teoretické určení <i>k</i> -hodnoty.....	68
13.6. Ekonomické přínosy náhrady části cementu příměsí.....	69
ZÁVĚR .....	70
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	73
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	76
SEZNAM TABULEK.....	77
SEZNAM GRAFŮ .....	78

# ÚVOD

Beton je kompozitní materiál, jeden z nejdůležitějších stavebních materiálů, který se používá po celém světě. Nejdražší součástí betonu je cement, který se do betonu dává v poměrně vysokém množství. Z důvodu vysoké ceny cementu se za něj v posledních letech snaží najít adekvátní náhrada, která negativně neovlivní výsledné vlastnosti čerstvého i zatvrdlého betonu. Touto náhradou se staly příměsi, které mají vliv na různé vlastnosti betonu. V čerstvém betonu ovlivňují příměsi především zpracovatelnost, při tvrdnutí betonu ovlivňují příměsi vývin hydratačního tepla a v zatvrdlém betonu mají vliv především na trvanlivost a pevnost betonu. S velkou výhodou se jako příměsi používají vedlejší energetické produkty, které jsou svojí cenou většinou velmi ekonomicky výhodné. Další možností je používat místo portlandského cementu portlandský cement směsný nebo směsné cementy. Náhrada cementu má ekonomické (vysoká cena cementu) i ekologické (vysoký obsah CO<sub>2</sub> při výrobě cementu) opodstatnění. Možností částečné náhrady cementu aktivní příměsí v betonu se zabývá koncepce *k*-hodnoty. Koncepce *k*-hodnoty je v českých i evropských normách popsána jen velmi obecně.

## CÍLE PRÁCE

Cílem teoretické části bakalářské práce je shrnutí současného stavu používání  $k$ -hodnoty podle příslušných ČSN a EN. Dále pak popsat dopady  $k$ -hodnoty na navrhování složení betonů a popsat souvislosti  $k$ -hodnoty s indexem účinnosti a posoudit možnosti předefinování  $k$ -hodnoty při zohlednění aktivity dané příměsí. Současný systém používání  $k$ -hodnoty je podle ČSN EN 206+A2 nejednotný a pro praxi nejasný. Při použití různých typů aktivních příměsí tato norma umožňuje použití aktivních příměsí jako částečné náhrady cementu a použití části hmotnostní dávky příměsí pro snížení vodního součinitele v dané receptuře.

Cílem praktické části je stanovení indexů účinností pro konkrétní aktivní příměsí - mikromletý vápenec, vysokoteplotní popílek Dětmárovice a jemně mletá struska Cemex (Dětmárovice). Na cementových normových maltách se ověří možnost náhrady 25 %, 35 % a 50 % cementu CEM I 42,5 R příměsí. U malt se stanoví při konstantním vodním součiniteli konzistence a pevnost v tlaku. Dále se pak připraví beton C 30/37, u kterého se posoudí ekonomický přínos náhrady cementu CEM I 42,5 R aktivní příměsí.

# TEORETICKÁ ČÁST

## 1. Příměsi do betonů

„Minerální příměsi jsou obvykle anorganické práškové látky, které se přidávají do betonu za účelem zlepšení vlastností jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu. Velikost částic těchto látek je menší než 0,125 mm a mají velký měrný povrch. Jelikož jsou příměsi vyráběny většinou jako vedlejší energetické produkty, tato skutečnost se pozitivně odráží na jejich ceně, která je obvykle výrazně nižší, než je cena cementu. S rostoucím množstvím jemných příměsí přidávaných do betonu roste také potřebné množství záměsové vody. Kvůli této skutečnosti se jemné příměsi započítávají do obsahu jemných podílů v cementovém tmelu a bereme jej v úvahu při výpočtu vodního součinitele. Vodní součinitel lze vyjádřit jako poměr mezi záměsovou vodou a součtem všech jemných příměsí v betonu. Příměsi můžeme dělit podle různých kategorií, ale nejčastější je dělení podle ČSN EN 206+A2 – Beton – Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda. Tato norma rozděluje příměsi na dva typy: Typ I – inertní příměsi; Typ II – aktivní příměsi.“ [1][29]

### 1.1. Dělení příměsí do betonů

Příměsi do betonů lze rozdělit dle různých hledisek, například dle normy ČSN EN 206+A2, dle velikosti a tvaru zrn příměsí, či podle funkce a vodonáročnosti.

#### 1.1.1. Dělení podle ČSN EN 206+A2

##### 1.1.1.1. Typ I – inertní příměsi

„Tento typ příměsí se přidává do betonu za účelem dosažení hutnější struktury betonu nebo také pro zlepšení reologických vlastností čerstvého betonu. Tento typ příměsí kvůli svému chemickému a mineralogickému složení netuhne či netvrdne ani za přítomnosti budiče (nevykazují hydraulické ani latentně hydraulické vlastnosti). Jejich úkolem je zvýšit hutnost struktury směsi a zvýšit množství jemné cementové malty, čímž přispějí k dosažení lepší zpracovatelnosti betonu. Užívají se také ke změně barvy betonu. Do skupiny inertních příměsí se řadí především kamenná moučka a barevné pigmenty. K inertním příměsím se částečně řadí i mikromletý vápenec. Podle posledních studií se u této příměsí dá pozorovat určitá reaktivnost, především u vápenců, které vykazují vysokou jemnost mletí.“ [1]

##### 1.1.1.2. Typ II – aktivní příměsi

„Aktivní příměsi jsou anorganické látky, které díky svému složení přispívají k vývinu pevnosti cementového tmele. Podle způsobu působení se dělí na latentně hydraulické a pucolánové látky.“ [1]

### „Rozdělení hydraulických a pucolánových látek dle Rankina:

- hydraulické - poměr:  $\text{CaO/SiO}_2 > 2$
- latentně hydraulické - poměr:  $\text{CaO/SiO}_2 = 1 - 1,5$
- pucolánové - poměr:  $\text{CaO/SiO}_2 < 0,5$ “ [2]

„Latentní hydraulická je schopnost látky tvrdnout reakcí s  $\text{Ca(OH)}_2$  ve vodním prostředí za normální teploty. Latentně hydraulické schopnosti jsou aktivovány účinkem budičů. Dle povahy budiče se dělí na alkalické ( $\text{pH} > 7$ ) a síranové (vedou k tvorbě ettringitu). Nejvýznamnější latentně hydraulickou látkou je vysokopecní jemně mletá struska.“ [1][29]

### „Členění latentně hydraulických příměsí podle Pytlíka:

- s obsahem amorfního  $\text{SiO}_2$  nad 47 %, rozpustné v kyselém i alkalickém prostředí (křemičité úlety, diatomity, opál)
- s obsahem 16 až 53 %  $\text{CaO}$  (popílký, struska a hlíny pálené do teploty 600 - 800 °C, obsahující amorfni metakaolinit)
- látky obsahující sopečné sklo, tedy pravé pucolány“ [2]

„Pucolánové látky jsou anorganické látky, které samotné netuhnou ani netvrdnou, obsahují však amorfni  $\text{SiO}_2$ , který je schopen reagovat s  $\text{Ca(OH)}_2$  a vodou, za vzniku CSH gelu. Dle původu dělíme pucolány na přírodní a umělé. K přírodním pucolánům se řadí tufy, trasy a křemelina. Vysokopecní popílký, mikrosilika a jemně mletý cihlářský stěp se řadí k pucolánům umělým.“ [1]

„Norma ČSN EN 206+A2 pro minerální příměsí typu II zavádí koncepci  $k$ -hodnoty, pro výpočet ekvivalentního vodního součinitele. Ekvivalentní vodní součinitel vypočítáme následovně:

$$w_k = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p}$$

$w_k$  ... ekvivalentní vodní součinitel při započtení  $k$ -hodnoty [-]

$m_v$  ... množství záměsové vody [kg]

$m_c$  ... množství cementu [kg]

$m_p$  ... množství příměsí [kg]

$k$  ...  $k$ -hodnota závislá na použité příměsí a užitém cementu [-]“ [1]

### **1.1.2. Dělení podle velikosti zrn**

- „filery (korekční příměsí) s významným zastoupením zrn průměrů 0,04 až 0,25 mm, kterými je zlepšována zrnitost drobného kameniva
- běžné pojivové příměsí (popílký, mleté strusky, inertní moučky), jejichž zrnitost odpovídá přibližně zrnitosti cementů
- mikronové s převahou zrn o velikosti jednotek mikronů (některé metakaoliny)
- submikronové (křemičité úlety, některé metakaoliny), včetně příměsí se zrny v oblasti nanočástic“ [2]

„Mikronové a submikronové příměsi vyplňují mezery mezi zrny pojiva, a tím umožňují zvětšit hutnost cementové kaše. Tuto hutnost ovlivňuje i obsah vody. Proto se uvedené nejjemnější příměsi kladně uplatní jen při minimalizaci tloušťky vodního filmu obalujícího všechna jemná zrna. Podmínkou jejich kladného působení je proto buď spoluúčast velmi účinné plastifikační přísady, nebo použití mimořádně účinného zhutnění.“ [2]

### **1.1.3. Dělení podle tvaru zrn**

„Příměsi s nevhodným tvarem zrn se mohou projevit jako škodlivé i v případech, kdy mají vhodnou zrnitost a mohou pro své chemické nebo nukleační schopnosti přispět k hydrataci pojiva. Nevhodným tvarem zrn se zvětšuje měrný povrch. Důsledkem zvětšení měrného povrchu je i zvětšení mezerovitosti, kterou na rozdíl od zvětšení měrného povrchu nelze významně omezit plastifikačními přísadami. Při dodržení požadované konzistence se pak kromě pevnosti zhoršují i další požadované vlastnosti betonu, především odolnost proti vlivům prostředí.“ [2]

### **1.1.4. Dělení podle funkce**

„Podle nahrazované složky betonu se rozlišují příměsi nahrazující nebo doplňující drobné kamenivo a příměsi nahrazující určitý podíl cementu. V případě příměsi nahrazující určitý podíl cementu se směs cementu a příměsi označuje jako pojivo. Proto se kromě termínu vodní součinitel a ekvivalentní vodní součinitel používá pro hodnocení betonu i pojem vodopojivový součinitel. Jedná se o hmotnostní podíl účinného obsahu vody k hmotnosti pojiva.“ [2]

### **1.1.5. Dělení podle vodonáročnosti**

„Díky vodonáročnosti lze velikostní a tvarové vlastnosti příměsí vyjádřit praktičtěji a komplexněji než dříve uvedenými charakteristikami. Vodonáročnost samotné příměsi nebo směsi cementu a příměsi je v ČSN EN 206+A2 definována vodním součinitelem kaše normální konzistence, který je stanovený zkouškou používanou pro zkoušení tuhnutí cementu. Tato charakteristika má velmi blízkou souvislost s vlastnostmi čerstvého betonu, které nejvíce ovlivňují hlavní užité vlastnosti zatvrdlého betonu. Modifikací uvedené zkoušky lze ověřovat i vliv plastifikační přísady, případně úhrnný vliv kombinace všech hlavních složek pojivové kaše (cementu, příměsi, přísad).“ [2]

## 2. Mikromletý vápenec

### 2.1. Obecný popis vápence

„Vápence jsou horniny tvořené převážně nerostem kalcitem. Jsou to celistvé až zrnité sedimentární horniny organického nebo chemického původu, obsah uhličitanu vápenatého je často nad 95 %. Většina vápenců vznikla usazením vápnitých schránek živočichů a rostlin hlavně v mořských sedimentačních pánvích. Uhličitán vápenatý má několik polymorfních modifikací. V přírodě se uhličitán vápenatý vyskytuje převážně jako minerál kalcit a aragonit. Synteticky byla vytvořena další modifikace – vaterit. Barva vápenců je proměnlivá, závisí na obsahu příměsí, samotný kalcit je bezbarvý. Barva se může pohybovat od bílé přes šedou a hnědou až k modré a šedočerné.“ [3]

### 2.2. Mikromletý vápenec jako příměs

„Mikromletý vápenec je minerální plnivo, které se získává drcením vápence. Takový vápenec musí obsahovat minimálně 75 %  $\text{CaCO}_3$  a obsah jílu nesmí překročit 1,2 g/100 g. Nejdůležitějšími parametry mikromletého vápence jsou granulometrie a jemnost mletí. Díky snadnému mletí je mikromletý vápenec zastoupený v cementové pastě ve formě velmi jemných částic, díky tomu zhušťuje strukturu cementového kamene. Obecný požadavek je, aby propad sítem 0,063 mm byl větší než 70 %.“ [1]

„ČSN EN 206+A2 řadí mikromletý vápenec mezi inertní příměsi, tedy mezi látky, které se nepodílí na hydrataci cementu. V tomto případě je mikromletý vápenec pouze plnivo, které má vyplnit mezery mezi zrny cementu a kameniva. Jemná zrna vápence však působí v betonu jako nukleační centra pro krystaly portlanditu a urychlují hydrataci silikátových a aluminátových fází. Díky této skutečnosti mohou ovlivnit počáteční nárůst pevností betonu a celkový stupeň hydratace.“ [1]

„Se zvyšujícím se množstvím jemně mletého vápence se hydratace v počátečních fázích urychluje, ale z dlouhodobého hlediska probíhá hydratace cementu s mikromletým vápencem pomaleji. Jemně mletý vápenec se ale nechová jen jako inertní plnivo, protože se dokáže účastnit i hydratačních reakcí. Zejména se jedná o hydrataci trikalciumaluminátu ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ze slínku, za vzniku kalciumkarbonátaluminát hydrátu ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot3\text{CaCO}_3\cdot32\text{H}_2\text{O}$ ) v cementech s vyšším obsahem  $\text{C}_3\text{A}$ . Trikarbonát může v pozdějších fázích transformovat na stabilnější monokarbonát.“ [1]

„Několik studií se zabývalo hledáním vlivu mikromletého vápence na tvrdnutí betonu. Výsledkem bylo dvojí zjištění. V první řadě se jedná o „urychlující efekt“. Zrna vápence tvoří zárodky, které zvyšují pravděpodobnost, že se částice rozpuštěné v CSH srazí a poté rychleji spojí. Tento efekt je patrný pouze v počátečních stadiích tvrdnutí a po 28 dnech je již zanedbatelný. Druhým efektem je „pojící efekt“. Pokud cement obsahuje velké množství hlinité fáze, v tomto případě vznikají hlinitokřemičitany, které mají pojící schopnost.“ [1]

## **2.3. Mechanismy působení mikromletého vápence v betonu**

„Mechanismus působení mikromletého vápence v betonu lze rozdělit na mechanismus efektu plniva (efekt plniva, nukleační efekt a efekt zředění) a mechanismus chemického efektu.“ [4]

### **2.3.1. Efekt plniva**

„Účinek mikromletého vápence souvisí především s velikostí jeho částic. Pokud jsou částice mikromletého vápence jemnější než částice cementu, mikromletý vápenec vyplní prostor mezi částicemi cementu, tím zlepší propojenost částic ve směsi. V důsledku toho se sníží spotřeba vody, naopak se zvýší pevnost v tlaku a trvanlivost betonu. Díky velkému měrnému povrchu mikromletého vápence se sníží hodnota konzistence čerstvého betonu.“ [3][4]

### **2.3.2. Nukleační efekt (urychlující efekt)**

„Mikromletý vápenec vytváří v cementové pastě nukleační místa (krystalizační zárodky), na kterých dochází k vysrážení reakčních produktů slínku, tím se urychluje růst krystalů a dochází k větší hydrataci slínku. Nukleační efekt ovlivňuje velikost a množství částic a povrchová struktura mikromletého vápence. Hydratační produkty cementu mají tendenci obalovat povrch částic mikromletého vápence s podobnými povrchovými strukturami, které se vztahují na atomy Ca a O v kalcitu a CaO v CSH fázích. S rostoucím množstvím mikromletého vápence, roste i množství nukleačních míst.“ [3][4]

### **2.3.3. Efekt ředění**

„Efekt ředění je připisován především množství mikromletého vápence v matrici. Vzhledem k tomu, že oxid hlinitý je v cementu zastoupen v malém množství, jen malá část mikromletého vápence se zúčastní reakcí. Proto větší množství mikromletého vápence jako náhrady cementu snižuje obsah cementového slínku a hydratačních produktů. Jelikož mikromletý vápenec nemá pucolánové ani latentně hydraulické vlastnosti, dochází při stejném vodním součiniteli (voda/pojivo) a při větším nahrazení cementu mikromletým vápencem ke zvýšení množství volné vody, která může reagovat s částicemi cementu a tím se zvyšuje stupeň jeho hydratace. Tento jev lze označit jako efekt ředění.“ [4]

### **2.3.4. Chemický efekt (pojící efekt)**

„Chemický efekt mikromletého vápence na směs je ovlivněn především velikostí jeho částic a obsahem oxidu hlinitého z  $C_3A$  a  $C_4AF$  v cementu. S rostoucí velikostí částic vápence se zvyšuje rychlost jeho rozpouštění, v důsledku toho se zvyšuje koncentrace uhličitanu vápenatého, díky které se zvyšuje i chemický efekt vápence. Uhličitán vápenatý reaguje s aluminátovou fází ve slínku ( $C_3A$ ), výsledkem je kalciumkarbonátaluminát, který se dále mění na monokarbonátaluminát. Přidáním vápence se mění morfologie CSH do kratších a tlustších vláken.“ [3][4]

„Předchozí studie uváděly nekonzistentní výsledky chemické reakce mikromletého vápence. V jedné studii bylo výsledkem, že vápenec reagoval s  $C_3A$  v cementu a alkalita směsi se snížila. Další studie tvrdí, že se alkalita směsi při reakci vápence a  $C_3A$  nemění. Jeden výzkum uvádí, že při reakci vápence se sulfoaluminátem vápenatým se alkalita směsi zvýší, druhý výzkum tvrdí pravý opak. Chemické reakce vápence mohou v matici ovlivnit alkalitu, vlhkost a objemovou stálost.“ [3][4]

## **2.4. Vlastnosti betonu s mikromletým vápencem**

### **2.4.1. Čerstvý beton**

#### Zpracovatelnost

„Vliv mikromletého vápence na zpracovatelnost čerstvého betonu není jasný. Jeden výzkum uvádí, že přidáním vápence do betonu se zpracovatelnost zlepší. Druhá studie pak tvrdí, že po přidání vápence do betonu se tekutost betonové směsi snižuje. Vliv přídavku vápence do betonu na zpracovatelnost betonu má především morfologie vápence, efekt plniva a efekt ředění. Nukleační efekt a chemický efekt se projevují až po několika hodinách hydratace, proto na zpracovatelnost mají minimální vliv. Vliv na zpracovatelnost betonu má velikost částic a přítomnost nečistot (jíl - zvyšuje množství záměsové vody). I vyšší obsah  $MgO$  snižuje zpracovatelnost.“ [5]

#### Doba tuhnutí

„Doba tuhnutí betonu s přídavkem vápence je ovlivněna především nukleačním a ředícím efektem. Chemický efekt nemá velký vliv na dobu tuhnutí, neboť se projevuje až po ukončení tvrdnutí. Pokud jsou částice vápence menší než částice cementu, je dominantní nukleační efekt a efekt ředění. Pokud je velikost částic vápence stejná nebo větší než částice cementu, je dominantní efekt ředění. Pokud u vápence dochází dominantně k nukleačnímu efektu, doba tuhnutí se zkracuje.“ [5]

### **2.4.2. Zatvrdlý beton**

#### Pevnost v tlaku

„Obecně lze říci, že čím jemnější vápenec se do betonu použije, tím vyšších pevností v tlaku lze dosáhnout. Při vysoké náhradě cementu vápencem se u vápence začne projevovat efekt ředění a dochází ke snižování pevnosti betonu v tlaku. Čím vyšší je náhrada cementu vápencem, tím nižší jsou pevnosti v tlaku, lze si jich povšimnout především při delší době zrání vzorků.“ [5]

## Trvanlivost

„Díky velmi malým částicím vápence, které vyplní dutiny a částice mezi cementovými zrny, dochází ke snížení pórovitosti a propustnosti betonu pro vodu. Studie prokázala, že při 0 - 8% náhradě cementu vápencem dochází ke snížení propustnosti vody betonem, což lze přičíst efektu plniva. Při náhradě cementu vápencem maximálně do 20 % dochází ke snižování propustnosti chloridů betonem, projevuje se zde především efekt plniva. Přidáním vápence do betonu se zvyšuje hloubka karbonatace betonu. Vyšší hodnotu karbonatace po přidání vápence lze přičíst efektu ředění a chemickému efektu vápence, které spotřebovávají vápenné hydráty při reakci vápence a hlinitanových fází. Ve srovnání s betonem, který obsahoval popílek případně křemičitý úlet, byla hloubka karbonatace u betonu s vápencem vyšší.“ [5]

## **3. Popílek**

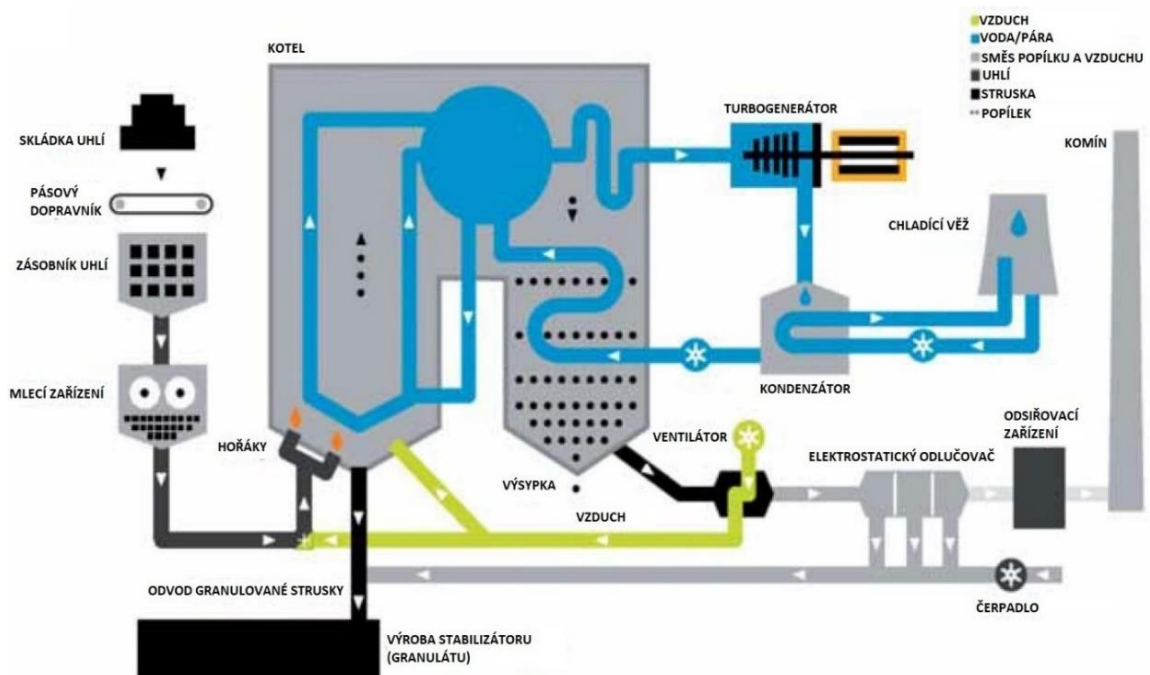
### **3.1. Obecný popis popílku**

„Popílek je velmi jemně zrnitý prášek, který má převážně kulovité sklovité částice, které vznikají při spalování práškového uhlí samotného, nebo se spoluspalovaným materiálem, který má pucolánové vlastnosti a skládá se převážně z  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Popílek se řadí mezi aktivní příměsi (typ II). Popílek je zachycován v elektrostatických nebo mechanických odlučovačích z plynů topenišť. Popílek je vedlejší energetický produkt a jako ostatní VEP může vykazovat proměnlivé chemické, mineralogické i granulometrické složení podle druhu spalovaného uhlí, lokality a způsobu odlučování. Černouhelný popílek má obvykle menší variabilitu vlastností a je tedy kvalitativně vhodnější příměsí do betonu než popílek hnědouhelný. Popílek se před použitím může upravovat například tříděním, proséváním, sušením, mletím a podobně.“ [6][7]

### **3.2. Výroba popílku**

#### **3.2.1. Výroba vysokoteplotního elektrárenského popílku**

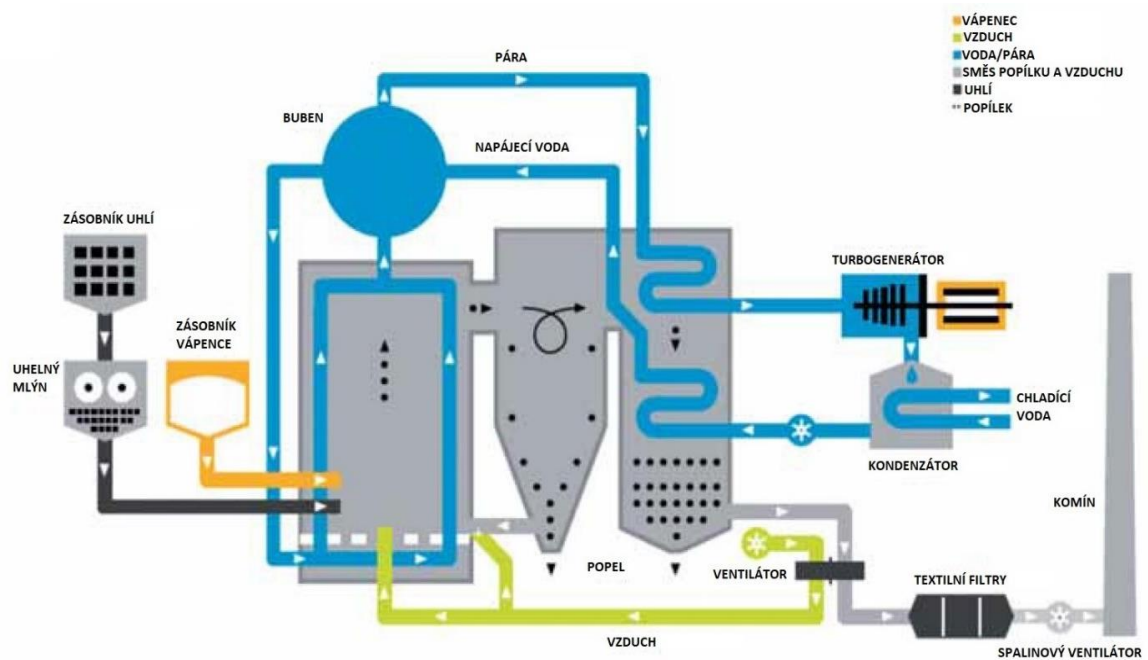
„Uhlí, které je namleto na jemný prášek, který se vysuší odpadním teplem, je spolu s přehřátým vzduchem vháněno do spalovací komory kotle, kde hoří při teplotě 1400 - 1600 °C. Zbytkem po tomto typu spalování je struska, která padá na dno kotle a úletový popílek, který je unášen spalinami a následně je separován v odlučovačích. Elektrostatické odlučovací zařízení využívá sil vznikajících v elektrostatickém poli při vysokém napětí. Tento typ zařízení dosahuje odlučivosti až 99 %. Mechanické odlučování probíhá na tkaninových filtrech, které jsou ze speciálních vláken vzdorujících vysokým teplotám.“ [1]



Obrázek 1: Výroba vysokoteplotního elektrárenského popílku [1]

### 3.2.2. Výroba nízkoteplotního popílku

„Jedná se o popílky, které vznikají při fluidním spalování. Při fluidním spalování je uhlí nadrceno na částice o velikosti okolo 20 mm a společně s vápencem je přivedeno do spalovací komory fluidního kotle, kde dochází ke spalování při teplotě 700 - 900 °C. Toto spalování probíhá ve vznosu v tzv. fluidním loži, které vzniká proudem vzduchu vhněným zpod vrstvy popela, vápence a inertního písku. Tyto popílky většinou nesplňují požadavky ČSN EN 450-1: Popílek do betonu - Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody.“ [1]



Obrázek 2: Výroba nízkoteplotního popílku [1]

### 3.3. Vlastnosti popílku

„Pro vlastnosti popílků jsou určující především vlastnosti uhlí, ze kterého popílek vzniká. Dále jsou velmi důležité následující faktory: teplota a podmínky spalování uhlí a způsob odlučování popílku ze spalin. Popílky mají různé chemické, mineralogické a granulometrické složení, které ovlivňují jejich použití v betonu. Vlastnosti popílků ovlivňují i vlastnosti betonu. Mezi nejvýznamnější faktory, které ovlivňují charakteristiku popílku se řadí:

- zdroj spalovaného materiálu (lokalita, odkud surovina pochází)
- složení původní suroviny (typ uhlí a jeho chemické a mineralogické složení)
- podmínky hoření (teplota, délka a teplotní průběh)
- vlastnosti spoluspalovaných látek (pokud jsou použity)“ [8]

### 3.4. Chemické složení

„Chemické složení popílku je charakterizované třemi základními složkami. Z celkového obsahu popílku zastupují následující tři oxidy asi 90 % složení:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . V popílku se v menším množství vyskytuje  $\text{CaO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{SO}_3$  a  $\text{TiO}_2$ . Hmotnostní podíl jednotlivých oxidů je určující pro možnost použití popílku na daný účel. Procentuální zastoupení jednotlivých oxidů v popílku je poměrně variabilní v závislosti od typu spalovaného uhlí. I pro jednotlivé typy uhlí jsou rozmezí poměrně široká, proto je nutné posuzovat každý popílek zvlášť (i v rámci jednoho zdroje popílku se mohou fyzikální vlastnosti a chemické složení v průběhu času měnit).“ [8]

Tabulka 1: Typické chemické složení křemičitého popílku [8]

Složky	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	Alkálie	$\text{SO}_3$	Ztráta žháním
Podíl [%]	36 - 59	20 - 35	3 - 19	1 - 12	0,7 - 4,8	0,6 - 9,5	0,1 - 2	0,5 - 5

#### 3.4.1. Dělení popílku dle ČSN EN 197-1 ED.2

##### Křemičitý popílek (V)

„Křemičitý popílek je jemný prášek sestávající z kulových částic s pucolánovými vlastnostmi. V jeho složení je především aktivní  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ve zbytku je pak obsažen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a jiné sloučeniny. Obsah aktivního  $\text{CaO}$  musí být nižší než 10 % hmotnosti, obsah volného  $\text{CaO}$ , stanovený metodou uvedenou v ČSN EN 451-1 nesmí být vyšší než 1 % hmotnosti. Obsah aktivního  $\text{SiO}_2$  nesmí být menší než 25 % hmotnosti.“ [9]

##### Vápenatý popílek (W)

„Vápenatý popílek je jemný prášek, který má hydraulické a/nebo pucolánové vlastnosti. V jeho složení je především aktivní  $\text{CaO}$ , aktivní  $\text{SiO}_2$  a  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ve zbytku je pak obsažen  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a jiné sloučeniny. Obsah aktivního  $\text{CaO}$  nesmí být menší než 10 % hmotnosti. Vápenatý popílek obsahující aktivní  $\text{CaO}$  mezi 10 a 15 % hmotnosti musí obsahovat nejméně 25 % hmotnosti aktivního  $\text{SiO}_2$ .“ [9]

### 3.4.2. Dělení popílku dle ASTM C618

#### Typ F (křemičitý popílek)

„Křemičitý popílek vzniklá ze spalování antracitu či velmi kvalitního hnědého uhlí. Složení tohoto typu obsahuje  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  okolo 70 % a  $\text{CaO}$  méně než 10 %. Tento popílek má pucolánové vlastnosti a reakce probíhá za přítomnosti  $\text{Ca(OH)}_2$ .“ [1]

#### Typ C (vápenatý popílek)

„Vápenatý popílek vzniká spalováním mladého hnědého uhlí a lignitu. Popílek tohoto typu obsahuje  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  okolo 50 % a obsah  $\text{CaO}$  je větší než 20 %. Samotný popílek má vzhledem k vysokému obsahu aktivního  $\text{CaO}$  hydraulické vlastnosti a nepotřebuje aktivátor.“ [1]

### 3.5. Mineralogické složení

„I mineralogické složení popílku přímo souvisí s charakteristikou a skladbou spalovaného uhlí. V běžném uhlí používaném v energetickém průmyslu se nachází zejména jílové minerály, železnaté sulfidy a uhličitany, dále pak křemen a různé oxidy a hydroxidy železa. Při pálení uhelného prachu probíhají látkové přeměny jako je odvodnění, odkysličení a slinutí. Převážná část minerálních látek se při hoření roztaví a následkem prudkého ochlazení spalin následně ztuhne a vznikne amorfní sklovitá látka. Výsledný obsah sklovitých částic, které představují sklovitou fázi, je v popílku přibližně 60 - 85 hm. %. Kromě sklovité fáze se v popílku nachází fáze mullitu (hlinitokřemičitan), křemen a železnaté oxidy. Jen malá část popílku se nachází v krystalické formě.“ [8]

Tabulka 2: Zastoupení nejdůležitějších minerálů v popílku z černého uhlí [8]

Minerál	Množství [hm. %]
Skelná fáze	60 - 85
Magnetit	0,8 - 6,5
Hematit	1,1 - 2,7
Křemen	2,2 - 8,5
Mullit	6,5 - 9,0
Volné $\text{CaO}$	do 3,5

### 3.6. Fyzikální vlastnosti popílku

„Při tavení jemných minerálů uhlí vzniká v nových produktech napětí, které způsobuje, že vznikající popílek dostává tvar kulových částic s uzavřeným povrchem. Spolu s nepórovitými plnými kuličkami (plerosféry) se mohou vyskytovat i kuličky duté (cenosféry).“ [8]

„Mezi důležité fyzikální vlastnosti popílku patří jemnost. Tato vlastnost se stanovuje síťovou analýzou, a to mokřým nebo suchým způsobem. Mokřým způsobem se jemnost stanovuje dle ČSN EN 451-2: Metoda zkoušení popílku – Část 2: Stanovení jemnosti proséváním za mokra. Suchým způsobem se jemnost stanovuje dle ČSN EN 933-10: Zkoušení

geometrických vlastností kameniva – Část 10: Posouzení jemných částic – Zrnitost fileru (prosévání proudem vzduchu). Dále je možné jemnost popílku stanovovat pomocí laserové granulometrie, která může být přesnější než stanovení jemnosti mokrým nebo suchým způsobem.“ [7][8]

„Pro účinek popílku v betonu je kromě jemnosti důležitá i jeho zrnitost (zastoupení jednotlivých velikostí zrn). Důležitý je i tvar zrn popílku. Převážně kulový tvar zrn popílku zabezpečuje jeho příznivý vliv na vlastnosti betonu, především lepší zpracovatelnost. Objemová hmotnost zrn popílku je 2000 - 2500 kg/m<sup>3</sup>, střední průměr zrn je 10 - 30 μm, sypaná hmotnost popílku je 800 - 1100 kg/m<sup>3</sup> a specifický povrch měřený metodou Blain dosahuje hodnot 250 - 550 m<sup>2</sup>/kg.“ [8]

### 3.7. Normativní požadavky na popílek

Aby bylo možné popílek do betonu použít, musí splňovat požadavky normy ČSN EN 450-1.

Tabulka 3: Normativní požadavky na popílek [7]

Vlastnost	Mezní hodnoty jednotlivých výsledků
Ztráta žiháním (horní mezní hodnota)	7,0 % hmotnosti (kategorie A)
	9,0 % hmotnosti (kategorie B)
	11,0 % hmotnosti (kategorie C)
Jemnost (horní mezní hodnota)	45 % hmotnosti (kategorie N)
	13 % hmotnosti (kategorie S)
Variabilita jemnosti (dolní a horní mezní hodnota)	± 15 procentních bodů z deklarované hodnoty (jen u kategorie N)
Chloridy (horní mezní hodnota)	0,10 % hmotnosti
Volný oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	1,6 % hmotnosti
Aktivní oxid vápenatý (horní mezní hodnota)	11,0 % hmotnosti (kategorie C)
Oxid sírový (horní mezní hodnota)	3,5 % hmotnosti
Oxid křemičitý + oxid hlinitý + oxid železitý (dolní mezní hodnota)	65 % hmotnosti
Celkový obsah alkálií (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
Oxid hořečnatý (horní mezní hodnota)	5,5 % hmotnosti
Objemová stálost (horní mezní hodnota)	11 mm
Index účinnosti po 28 dnech (dolní mezní hodnota)	70 %
Index účinnosti po 90 dnech (dolní mezní hodnota)	80 %
Variabilita měrné hmotnosti (dolní a horním mezní hodnota)	± 225 kg/m <sup>3</sup> od deklarované hodnoty
Počátek tuhnutí (horní mezní hodnota)	2,25 krát déle než počátek tuhnutí cementu bez popílku
Požadavek na množství vody (horní mezní hodnota)	97 % (jen kategorie S)

### 3.8. Vlastnosti betonu s popílkem

„Popílek má vliv na vlastnosti betonu jak v čerstvém, tak i zatvrdlém stavu, svým reologickým působením, účinkem jako plnivo a pucolánovou aktivitou. Rozpětí změn vlastností závisí na způsobu použití a složení receptur. V praxi se aplikují různé varianty použití popílku. V první řadě se popílek používá jako náhrada cementu, při nezměněném obsahu vody. Další možností může být přídavek popílku jako plniva pro zlepšení čáry zrnitosti. Do většiny standardních betonů se používá těžené drobné kamenivo frakce 0 - 4 mm, které se získává těžáním z vody. Při těžení voda s sebou odnáší i jemné podíly, které jsou v betonu potřeba pro plynulou křivku zrnitosti. Přidáním popílku, se mohou chybějící jemné podíly doplnit, a tím zlepšit vlastnosti betonu.“ [10][11]

#### 3.8.1. Čerstvý beton

„Popílek jako příměs do betonu umožňuje regulovat množství pojiva v betonu, jehož dostatečné množství je nevyhnutelné pro dobrou zpracovatelnost betonu. Příznivý vliv popílku na zrnitost směsi a zpracovatelnost čerstvého betonu je viditelný okamžitě, už jen při kontrole zpracovatelnosti. Betony s lepší zpracovatelností jsou výhodné nejen pro odběratele, ale také pro výrobce. Kromě zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi má popílek značný vliv i na kvalitu čerstvého betonu, především omezuje segregaci a krvácení. Tyto vlivy jsou nežádoucí zejména u betonu typu SCC (samozhutnitelný beton), proto je použití popílků do těchto specifických betonů výhodné.“ [8][10][11]

##### Zpracovatelnost

„Použití popílku vede ke zlepšení zpracovatelnosti nezávisle na dosažitelné úspoře vody. Zejména dochází ke zlepšení čerpatelnosti (viskozity), soudržnosti a také zhutnitelnosti. Všechny tři aspekty jsou prioritní pro použití popílku jako příměsi u transportbetonu, kde je nutné tyto podmínky zajistit. Díky tomu se snižují náklady na dopravu, ukládání a zhutňování betonové směsi.“ [10][11]

##### Spotřeba vody

„Náhrada části cementu popílkem vede ke snížení spotřeby vody při zachování určité míry rozlití. Při zachování obsahu vody je velmi často míra rozlití větší. Tento plastifikační účinek se často charakterizuje pojmem „efekt kuličkového ložiska“. Pojem je odvozen z tvaru zrn popílku, který je víceméně dokonale kulovitý a sklovitý. Jemnost popílku má také vliv na konzistenci betonových směsí. Čím jemnější zrna popílku, tím je směs tekutější. Negativní vliv na spotřebu vody má bohužel větší obsah nespáleného uhlí v důsledku nepravidelného tvaru a pórovitosti. U větších frakcí popílku se nachází nepravidelně tvarované částice. Z těchto dvou souvislostí vyplývá nepřímý vliv, že jemnější popílky mají menší spotřebu vody. Z těchto důvodů se v normě ČSN EN 450-1 kladou požadavky na jemnost a ztrátu žíháním.“ [10][11]

### 3.8.2. Zatvrdlý beton

„Dostatečné množství pojiva zabezpečí hutnou strukturu zatvrdlého betonu. Hutnost této fáze je docílena objemem pórů, který se zmenšuje použitím popílku. Použití popílku vede ke snížení objemové hmotnosti betonu, jelikož hustota popílku je nižší než hustota cementu. Proces tuhnutí a tvrdnutí betonu při nahrazení části cementu popílkem je pomalejší. Tento jev souvisí se sníženou dávkou cementu a se skutečností, že pucolánové reakce probíhají pomaleji než hydratace cementu. Z tohoto důvodu je nutné zvážit používání popílku jako náhrady za část cementu při výrobě betonu za nízkých teplot nebo při potřebě rychlého nárůstu počátečních pevností. V těchto případech je žádaný rychlý vývin hydratačního tepla, a proto je popílek pro tyto situace nevhodný. Naopak je tento jev žádoucí u masivních staveb, kde se snažíme cíleně zabránit rychlému nárůstu hydratačního tepla a následnému vzniku smršťovacích trhlin.“ [10][11]

#### Vznik trhlin na základě vývoje hydratačního tepla

„Jedním z nejdůležitějších dopadů popílku na betonovou směs je určité snížení hydratačního tepla. Náhradou určitého podílu portlandského cementu (který nejvíce uvolňuje teplo, především v počáteční fázi) popílkem, se sníží celkový potenciál pro nárůst tepla, neboť je známo, že popílek nevydává teplo při prvních dnech hydratace, ale až později. Díky této skutečnosti dochází ke snížení vývinu hydratačního tepla, a tedy i ke snížení vzniku trhlin. Tohoto efektu se využívá především u masivních konstrukcí.“ [10][11]

#### Pevnost v tlaku

„Záměrným používáním popílku lze ovlivnit pevnosti betonu v delším časovém intervalu. Při zohlednění  $k$ -hodnoty, tedy zachování ekvivalentní hodnoty vodního součinitele, lze při náhradě cementu popílkem dosáhnout stejných pevností jako u betonu bez přidání popílku. Když zachováme vodní součinitel, počáteční reakce se kompenzuje snížením potřebné vody. Vlivem pucolánové reakce, tedy pomalejším vytvrzováním, bude beton vykazovat vyšší konečnou pevnost než referenční beton. Díky této reakci, v průběhu několika dalších let, může dojít k dalšímu zvýšení pevnosti. U popílkových betonů, většinou konečné pevnosti převyšují pevnosti srovnatelného betonu jen z portlandského cementu.“ [10][11]

#### Trvanlivost betonu

„Jemnost popílku pomáhá při zlepšování kvality povrchů betonových konstrukcí. Povrch betonu je obvykle místem prvního kontaktu s agresivní látkou a kvalita povrchu sehrává významnou úlohu při zabezpečení trvanlivosti celé betonové konstrukce. Popílek vyplňuje prostor mezi již vzniklými hydratačními produkty a tím zhutňuje strukturu cementového tmele. Díky tomuto efektu se snižuje množství mikroskopických dutin a pórů, které jsou slabým místem, přes které může probíhat transport cizorodých látek do betonu. Zhutnění struktury cementového tmele je úzce spojeno s odolností proti vniku vody a agresivních látek, souvisí tedy i s trvanlivostí betonu.“ [8]

### 1. Odolnost proti vnikání chloridů, koroze ocelové výztuže

„S přenosem chloridových iontů úzce souvisí proces koroze ocelové výztuže. Odolnost popílkových betonů proti vnikání chloridů se zlepšuje díky pucolánové aktivitě popílku. Ke zlepšení dochází díky zmenšení póru, z větších kapilárních na menší gelové, přes které je transport vody a agresivních látek obtížnější. Experimentálně je ověřeno, že beton získává po 90 dnech výraznou odolnost proti pronikání chloridů přes strukturu betonu.“ [8]

### 2. Odolnost proti karbonataci

„Karbonatace betonu probíhá od jeho povrchu a stává se nebezpečnou, když dosáhne úrovně výztuže. Při porovnání hloubky karbonatace při stejné pevnosti betonu v tlaku, vychází stejné nebo nepatrně vyšší hodnoty karbonatace pro popílkové betony oproti betonům, bez použití popílku. Podstatně vyšší vliv (než použití popílku) na postup karbonatace má druh použitého cementu a doba ošetření betonu. Hlavním výsledkem výrazné karbonatace betonu je spotřeba  $\text{Ca(OH)}_2$  v reakci se vzdušným  $\text{CO}_2$  v důsledku čehož dochází ke snižování pH betonu. Alkalita roztoku závisí na množství alkálií  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  a  $\text{Ca(OH)}_2$ . Ačkoliv se při pucolánové reakci popílku spotřebuje část  $\text{Ca(OH)}_2$ , snížení pH roztoku je možné jen při extrémně velké spotřebě. Nárůst hloubky karbonatace v čase je u betonů s popílkem jen o málo vyšší než u betonů bez popílku. V pórovém roztoku se při použití popílku sníží pH jen nevýrazně a pasivace výztuže je zachována.“ [8]

### 3. Odolnost proti účinkům mrazu a rozmrazovacím prostředkům

„Postup narušení betonu mrazem je ovlivněn rychlostí absorpce vody do gelových a kapilárních pórů až do jejich kritického nasycení. Když se dosáhne kritického nasycení, narušení betonu nastává i malým počtem zmrazovacích a rozmrazovacích cyklů. Toto narušení se projeví poklesem pevnostních charakteristik. Při náhradě části cementu popílkem a při konstantním obsahu vody, vzniká následkem menšího obsahu cementu větší pórovitost. Na druhé straně se následkem pucolánové reakce zlepšuje rozdělení velikosti pórů. Při zkoušce po 28 dnech dojde ke snížení mrazuvzdornosti betonu, neboť pucolánová reakce ještě nezačala ve větší míře probíhat. Při dodržení stanovených požadavků na minimální obsah cementu a ekvivalentní hodnotu vodního součinitele dosahují betony s obsahem popílku porovnatelné odolnosti proti mrazu a rozmrazovacím prostředkům jako betony bez obsahu popílku.“ [8]

### 4. Odolnost proti působení kyselin a síranů

„Odolnosti betonu proti působení kyselin je možné dosáhnout snížením hodnoty vodního součinitele a zvýšenou náhradou slínku portlandského cementu pucolánovými nebo latentně hydraulickými příměsemi, jako je například popílek. Přídavkem těchto příměsí dochází ke ztuhnutí struktury betonu a snížení obsahu hydroxidu vápenatého, který sehrává významnou roli při rozpouštění kyselinami.“ [8]

„Při působení síranů je nutné použít síranovzdorné cementy s obsahem  $C_3A \leq 3$  hm. % a s obsahem  $Al_2O_3 \leq 5$  hm. %. Možností je také použít vysokopecní cementy s minimálním obsahem 65 hm. % vysokopecní granulované strusky. Použití popílku jako příměsi do betonu může výrazně zlepšit odolnost malt a betonů proti působení síranů. To platí i tehdy, když se nepoužijí síranovzdorné cementy, protože popílek vytváří hutnější pórovou strukturu, má vyšší difuzní odpor a redukuje obsah  $C_3A$  v pojivu a  $Ca(OH)_2$  v betonu.“ [8]

## 4. Vysokopecní struska

### 4.1. Obecný popis strusky

„Strusky jsou pevné nekovové doprovodní výrobky hutní výroby, které vznikly roztavením hlušin rudy, přidávkem struskotvorných látek a minerálních podílů z pevných paliv. Ve stavebnictví se využívá zejména struska vysokopecní, která vzniká při redukcí surového železa ve vysokých pecích.“ [13]

### 4.2. Výroba vysokopecní strusky

"Směs železné rudy, koksu a vápna se nadávkuje do vysoké pece, kde se při teplotě 1500 °C taví. Obvykle vzniká 200 - 400 kg strusky na 1 tunu vyprodukovaného železa. Roztavené železo a tekutá struska se hromadí na dně vysoké pece, kde méně hustá struska tvoří vrstvu nad roztaveným železem. Struska je odváděna z pece jako kapalina připomínající lávu. V závislosti na metodách chlazení a tunutí roztavené strusky lze vyrábět tři typy strusky: granulovanou strusku, strusku chlazenou vzduchem a expandovanou strusku.“ [12]

### 4.3. Chemické a mineralogické složení

„Struska stejně jako ostatní druhotné suroviny vykazuje proměnlivé chemické složení. Hlavními složkami jsou oxid vápenatý, oxid křemičitý, oxid hlinitý a oxid manganatý, které tvoří 95 % složení“. [12]

Tabulka 4: Chemické složení vysokopecní strusky [15]

Chemické složky	Obsah [%]
CaO	30 - 50
SiO <sub>2</sub>	30 - 43
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5 - 18
MgO	1 - 15
FeO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2 - 3
S	0,5 - 3
MnO	0,2 - 2

„Hlavní minerály přítomné ve strusce jsou zejména gehlenit, akermanit, merwinit, belit, wollastonit a melilit (pevný roztok gehlenitu a akermanitu).“ [15]

„Granulovaná vysokopecní struska je latentně hydraulická látka, která vzniká rychlým ochlazením tekoucí taveniny zásadité strusky, která odpadá jako vedlejší produkt při výrobě surového železa ve vysoké peci. Je-li tavenina rychle zchlazena, zabrání se její krystalizaci, a tím se stabilizuje její sklovitý charakter. Rychlé ochlazení má udržet strusku ve skelném stavu, protože taková má při vhodném složení taveniny latentně hydraulické vlastnosti. Po granulaci se musí struska semlít, aby bylo dosaženo potřebného specifického měrného povrchu (podobného jako u cementu 350 - 450 m<sup>2</sup>/kg). Základní parametr pro použití strusky jako neinertní příměsi je její modul zásaditosti.“ [1]

$$M_z = \frac{CaO + MgO}{SiO_2 + Al_2O_3}$$

„Jednotlivé oxidy jsou do vzorce dosazeny v procentuálním hmotnostním zastoupení. Pro strusky používané jako latentně hydraulické látky musí být  $M_z > 1$ . Pokud je  $M_z < 1$ , jedná se o strusky kyselé, které se používají pouze jako kamenivo.“ [1]

#### 4.4. Fyzikální vlastnosti strusky

„Objemová hmotnost strusky se pohybuje v rozmezí 1200 - 1300 kg/m<sup>3</sup>. Měrná hmotnost strusky je 2900 kg/m<sup>3</sup>. Barva strusky je bílá až špinavě bělavá. Měrný povrch jemně mleté granulované vysokopecní strusky bývá někdy větší než měrný povrch cementů, dosahuje hodnot okolo 320 - 390 m<sup>2</sup>/kg. Reaktivita strusky je určena jemností jejího mletí. Obecně lze říci, že čím jsou částice jemnější, tím dochází ke zvyšování pevnostních charakteristik. Jemnost mletí je ale omezena ekonomickou náročností mletí. Měrný povrch dle Blaina se pohybuje zhruba od 400 - 550 m<sup>2</sup>/kg. Jemnost mletí je důležitý parametr, který ovlivňuje reaktivitu strusky, vývoj pevností betonu a vodonáročnost směsi.“ [14][16]

#### 4.5. Normativní požadavky na vysokopecní strusku

Aby bylo možné strusku do betonu použít, musí splňovat požadavky normy ČSN EN 15167-1.

Tabulka 5: Normativní požadavky pro strusku [18]

Vlastnost	Mezní hodnoty jednotlivých výsledků (jako větší/menší než charakteristická hodnota)
Obsah oxidu hořečnatého	19 %
Obsah sulfidů	2,5 %
Obsah síranů	3,0 %
Ztráta žiháním	3,5 %
Obsah chloridů <sup>a)</sup>	0,10 %
Vlhkost	1,5 %
Jemnost	250
Počátek tuhnutí	2,25násobek než zkušební cement
Index účinnosti po 7 dnech	40 %
Index účinnosti po 28 dnech	65 %
<sup>a)</sup> Mletá granulovaná vysokopecní struska může obsahovat více než 0,10 % chloridů, ale v tomto případě musí být maximální obsah chloridů uveden.	

## 4.6. Vlastnosti betonu s obsahem vysokopecní strusky

### 4.6.1. Čerstvý beton

#### Zpracovatelnost

„Obecně lze říci, že když se příměs přidá ve správném množství, dochází ke zlepšení zpracovatelnosti čerstvého betonu. Nepochází pouze ke zlepšení zpracovatelnosti, ale také ke snížení krvácení a segregace. Zpracovatelnost se zlepšuje díky lepší disperzi částic. Částice jemně mleté vysokopecní granulované strusky mají hladký povrch, nejsou tak vodonáročné, jako částice cementu, díky tomu je možné snížit vodní součinitel, při zachování stejné zpracovatelnosti, což přispívá ke zvýšení pevností betonu.“ [12]

### 4.6.2. Zatvrdlý beton

#### Pevnost betonu

„U betonu s přídavkem strusky je vývoj pevnosti v tlaku do stáří 28 dní pomalejší než u betonu bez strusky. Po uplynutí 28 dní, pevnost betonu v tlaku se struskou roste rychleji, než pevnost betonu bez strusky. Počáteční rychlost nárustu pevnosti je nepřímo úměrná obsahu strusky v betonu.“ [12]

#### Odolnost proti vnikání chloridů, koroze ocelové výztuže

„Přidání jemně mleté vysokopecní granulované strusky do betonu vede ke snížení pórovitosti a změně mineralogie vznikajících hydrátů, což vede ke snížení vnikání chloridů. Použití příměsí, jako je například vysokopecní struska, jako částečné náhrady cementu, se projevuje snížením pravděpodobnosti koroze výztuže a také propustnosti betonu.“ [17]

## 5. Portlandský směsný cement

„Podle definice je cement hydraulické pojivo, jemně mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří kaši, která v důsledku chemické hydraulické reakce tuhne a tvrdne. Po předchozím zatuhnutí na vzduchu dále tuhne a tvrdne i pod vodou, přičemž si zachovává pevnost i trvanlivost. Cement se vyrábí zejména společným semletím portlandského (křemičitanového) slínku, sádrovce (který upravuje rychlost jeho tuhnutí) a dalších přísad uvedených v normě.“ [30]

„Evropská cementářská norma EN 197-1 specifikuje celou skupinu portlandských cementů CEM II. Tyto cementy obsahují kromě portlandského slínku ještě jednu další hlavní složku.

Patří sem:

- portlandský struskový cement
- portlandský cement s křemičitým úletem
- portlandský pucolánový cement
- portlandský popílkový cement
- portlandský cement s kalcinovanou břidlicí
- portlandský cement s vápencem“ [30]

„Označení CEM II (M), tj. portlandský směsný cement, je určeno pro cementy, které obsahují kombinaci více hlavních složek, mezi něž patří:

- granulovaná vysokopecní struska
- křemičitý úlet
- přírodní pucolán
- křemičitý nebo vápenatý popílek
- vápenec“ [30]

„Současným trendem je výzkum zaměřující se především na vlastnosti cementů CEM II (M), které obsahují kombinaci slínku, granulované vysokopecní strusky a vápence. Výpal portlandského slínku a výroba cementů s jeho vysokým podílem jsou nejen environmentálně problematické, ale i stále více neekonomické.“ [30]

### **5.1. Použití cementu do betonu**

„Obvyklá dávka cementu na 1 m<sup>3</sup> betonu je v rozmezí 250 až 400 kg, záleží na zamýšleném použití. Dávku cementu určuje evropská norma EN 206 s řadou dodatků a národních norem, které umožňují přidávat do betonu stejné složky, jaké mohou být již v samotném cementu, např. mletou vysokopecní granulovanou strusku, křemičité popílky, mleté vápence. Nicméně samostatným přidáváním těchto složek vzniká nebezpečí nehomogenit, které je v dodávaném směsném cementu zcela minimalizováno. Nebezpečí nehomogenit je do jisté míry eliminováno ustanovením ČSN EN 206+A2 o používání principu *k*-hodnoty. Tento princip omezuje možnost započítání těchto složek jako pojiva do výpočtu vodního součinitele. Množství použité nad limit je pak pouhým plnivem. Tím je snížena motivace výrobců betonu používat jako příměsi do betonu složky, které jsou již obsaženy ve směsných cementech.“ [30]

### **5.2. Vliv granulované vysokopecní strusky na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného**

„Vysokopecní granulovaná struska je pro své chemické složení blízké cementu a pro své hydraulické vlastnosti používána jako jedna z hlavní složek cementu a po semletí i jako příměs do betonu. Se struskou se běžně vyrábí portlandský struskový cement CEM II (S) a ve směsi s popílkem a vápencem portlandský směsný cement (M). V portlandském směsném cementu struska vhodně modifikuje vlastnosti popílku anebo vápence pro dosažení požadovaného nárůstu pevností a reologie čerstvého betonu. Použitím cementu s podílem strusky nebo mleté strusky jako příměsi pro výrobu betonu se dosahuje různých pozitivní vlastností betonu. Tyto cementy mají nižší teplotu při hydrataci a beton z něj vyrobený vykazuje vysokou trvanlivost, která je výsledkem nízké kapilární mezerovitosti. Je odolný proti penetraci chloridů a agresivnímu působení síranů. Beton vykazuje nízkou

náchylnost ke vzniku trhlin vlivem nižšího hydratačního tepla. Takový beton má také velmi dobrou zpracovatelnost.“ [30]

„Výroba 1 t portlandského cementu způsobuje vznik v průměru 1,2 t CO<sub>2</sub>, zatímco výroba 1 t cementu obsahující 50 % mleté strusky dává vzniknout pouze 0,54 t CO<sub>2</sub>. Tato data zahrnují emise při procesu pálení cementu, spalování fosilních paliv a použití elektrické energie. Použití strusky je tak velmi efektivní a ekonomicky přínosná metoda při snižování spotřeby energie a emisí CO<sub>2</sub> v porovnání s výrobou portlandského cementu do okamžiku, než započteme i CO<sub>2</sub> unikající při výrobě železa a oceli. Pak již tato výroba natolik environmentálně příznivá není. V případě přidávání mleté vysokopeční granulované strusky přímo do betonu platí doporučení stejná jako pro beton obsahující cement CEM I a CEM II/A, tedy EN 197–1 a pro mletou granulovanou vysokopeční strusku platí k-hodnota 0,6 podle EN 15167–1. Maximální obsah strusky by měl vyhovovat doporučenému hmotnostnímu poměru struska/cement  $\leq 1,0$ .“ [30]

### **5.3. Vliv popílku na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného**

„Pro své příznivé vlastnosti a cenu je popílek využíván především jako příměs do betonu, při výrobě cementu se používá jako možná součást do surovinové směsi nebo jako jedna z hlavních složek hotového cementu. Vzhledem k energetické náročnosti výroby cementu a faktu, že je produkce popílku, tedy vedlejšího energetického produktu spalování pevných paliv, nevyhnutelná, jeví se možnost využití popílku do cementu i do betonu jakožto částečné náhrady slínku jako velmi pozitivní. Popílek může být svou podstatou křemičitý nebo vápenatý. První má pucolánové vlastnosti, druhý může mít navíc vlastnosti hydraulické. Důležitým parametrem pro jeho použití je hodnota ztráty žíháním stanovená podle EN 196–2 po dobu 1 h.“ [30]

„Vzhledem ke své pucolánové aktivitě jsou popílky přínosné i pro samotný beton. Popílek zlepšuje zpracovatelnost čerstvého betonu a díky kulovitému tvaru zrn částečně pomáhá redukovat potřebné množství záměsové vody. Pozitivně ovlivňuje také dlouhodobé pevnosti betonu a hloubku karbonatace. Betony s příměsí popílku se projevují nižšími počátečními pevnostmi a pomalejším vývojem pevností. Proto je třeba počítat s dosažením plánované pevnosti v horizontu pozdějším, než je 28 dní (zpravidla 56 až 90 dní). S tím souvisí také nízké hydratační teplo. Tyto betony jsou velmi odolné vůči trhlinám, a díky tomu i vůči agresivnímu prostředí či tvorbě výkvětů. Popílek používaný jako příměs do betonu obsahuje amorfní SiO<sub>2</sub>, ve směsi po smíchání s vodou reaguje s Ca(OH)<sub>2</sub> za vzniku CSH gelů. Ty uzavírají kapiláry a zmenšují velikost pórů v betonu a tím příznivě ovlivňují jeho chemickou odolnost. Velikost zrn popílku může i nemusí mít vliv na vývin pevností, výzkum ale ukazuje, že čím jemnější popílek je, tím je pucolánová reakce intenzivnější.“ [30]

## **5.4. Vliv vápence na vlastnosti portlandského směsného cementu a betonu z něj vyrobeného**

„Vápenec je materiál bez skutečné hydraulické reaktivity. Přesto se stal jednou z hlavních složek portlandských cementů s vápencem nebo portlandských směsných cementů s podílem vápence, kde je schopen nahradit určité množství slínku. Mineralogické složení vápence z různých lomů se může výrazně lišit, odlišné složení však může mít i vápenec v rámci jednoho lomu. Jeho hlavní složkou je kalcit s mnoha dalšími možnými složkami, jako je křemen, jílové minerály nebo dolomit. Výzkum v posledních letech ukázal, že malá množství kalcitu mohou chemicky reagovat s dostupným oxidem hlinitým ze slínku. Hlavní objem vápence v cementu však dominuje jako plnivo. Některé chemické a fyzikální standardní požadavky na vápenec, např. limity na obsahy jílového podílu a celkového organického uhlíku, jsou definovány předem tak, aby byla zaručena nezbytná kvalita betonu a aby se zabránilo negativním dopadům na zpracovatelnost a trvanlivost (zejména na odolnost proti mrazu a rozmrazování).“ [30]

## **5.5. Obecný závěr**

„Cementy s několika hlavními složkami a s omezeným obsahem slínku významně přispívají k ochraně životního prostředí, a to jak pro hospodárnost výroby, tak i pro efektivnost svého použití. Používání těchto cementů pro vhodné betonové stavby bude v dalším období nezbytností jak z environmentálního hlediska, tak i s ohledem na náklady na výrobu.“ [30]

„Tyto cementy jsou vhodnou alternativou portlandských cementů i z technického hlediska. Při vhodné kombinaci hlavních složek mohou portlandské směsné cementy CEM II (M) přispět ke zvýšení robustnosti stavebních systémů. Nejefektivnější je kombinace vápence a granulované vysokopecní strusky. Širšího uplatnění v betonářském průmyslu by se měly dočkat hlavně portlandské směsné cementy CEM II (M) (S-LL), jejichž hlavními složkami jsou portlandský slínek, granulovaná vysokopecní struska a vápenec. Podobné výsledky lze očekávat, když ve funkci hlavních složek bude použita kombinace vápence a popílku odpovídajícího normě EN 450–1. V cementech pro pozemní a inženýrské stavitelství je třeba počítat i s dalším růstem obsahu granulované vysokopecní strusky. O tomto trendu svědčí růst výroby cementů CEM III/A s obsahem strusky nad 50 hm. %.“ [30]

## 6. Index účinnosti

„Index účinnosti lze vyjádřit jako poměr pevnosti v tlaku vzorku, ve kterém je část cementu nahrazena danou příměsí ku pevnosti v tlaku referenčního vzorku, který obsahuje pouze cement.“ [19]

„Index účinnosti lze vypočítat z výsledků zkoušky pevnosti v tlaku. Dle ČSN EN 196-1 se připraví referenční malta, která se skládá z jednoho hmotnostního dílu cementu (450 g), tří hmotnostních dílů normalizovaného písku CEN (1350 g) a půl dílu vody (225 g). Vodní součinitel této směsi je 0,5. Vytvoří se vzorky o velikosti 40 x 40 x 160 mm, vzorek je při zkoušce v tahu za ohybu rozlomen na dvě poloviny, na kterých je následně zkoušena pevnost v tlaku.“ [20]

### 6.1. Index účinnosti pro popílek

„Index účinnosti pro popílek je definován v normě ČSN EN 450-1. Zkušební vzorky se připraví stejně, jako u referenční malty, pouze se do malty použije 75 % hmotnosti cementu a 25 % hmotnosti popílku. Stanovení pevnosti v tlaku probíhá stejně jako u referenční malty. Index účinnosti po 28 dnech musí být minimálně 75 %, po 90 dnech musí index účinnosti dosahovat nejméně 85 %. Použitý cement musí vyhovovat následujícím požadavkům:

- jemnost (dle Blaina): nejméně 300 m<sup>2</sup>/kg
- trikalciualuminát: 6 - 12 % hmotnosti
- alkálie (Na<sub>2</sub>O<sub>eq</sub>): 0,5 - 1,2 % hmotnosti“ [7]

„Výsledek zkoušky indexu účinnosti nedává přímou informaci o vlivu popílku na pevnost betonu ani nelimituje dávkování popílku ve směsi, která je použita při těchto zkouškách.“ [7]

### 6.2. Index účinnosti pro jemně mletou granulovanou strusku

„Index účinnosti pro mletou granulovanou vysokopecní strusku je definován v normě ČSN EN 15167-1. Zkušební vzorky se připraví stejně, jako u referenční malty (dle ČSN EN 196-1), pouze se do malty použije 50 % hmotnosti cementu a 50 % hmotnosti mleté granulované vysokopecní strusky. Stanovení pevnosti v tlaku probíhá stejně jako u referenční malty. Index účinnosti po 7 dnech musí být minimálně 45 %, po 28 dnech musí index účinnosti dosahovat nejméně 70 %.“ [18]

„Výsledek zkoušky indexu účinnosti nedává přímou informaci o vlivu mleté granulované vysokopecní strusky na pevnost betonu ani nelimituje dávkování mleté granulované vysokopecní strusky ve směsi, která je použita při zkoušce indexu aktivity.“ [18]

### 6.3. Index účinnosti pro mikromletý vápenec

Hodnoty pro index účinnosti mikromletého vápence nejsou uvedeny v žádné z českých technických norem.

## 7. Koncepce $k$ -hodnoty

„Koncepce  $k$ -hodnoty je založena na srovnání trvanlivosti (nebo pevnosti) referenčního betonu s cementem „A“ se zkušebním betonem, ve kterém je část cementu „A“ nahrazena příměsí. Koncepce  $k$ -hodnoty umožňuje použití příměsi II. druhu když:

- vodní součinitel voda/cement lze nahradit poměrem voda/(cement +  $k$  x příměs)
- množství (cement +  $k$  x příměs) není menší než minimální obsah cementu požadovaný pro příslušný stupeň vlivu prostředí“ [21]

„Když je část cementu „A“ nahrazena příměsí, jsou jako mezní hodnoty stejně použity ty, které by platily pro cement „A.“ [21]

Lze říci, že  $k$ -hodnota udává procentuální množství aktivní příměsi, z celkového množství nadávkované aktivní příměsi do betonu, kterou lze považovat za stejně účinnou, jako je cement.

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

„Příměsi II. druhu (aktivní příměsi) přispívají k vlastnostem betonu různými mechanismy. Vliv aktivních příměsí na vlastnosti betonu závisí na vlastnostech jednotlivých příměsí, na stáří betonu, na okolních podmínkách (teplota, vlhkost). Pro zohlednění výše uvedených vlivů při návrhu betonu se používá  $k$ -hodnota, která využívá vztahu mezi vodním součinitelem a pevností betonu. Pokud je splněna podmínka stejné pevnosti, lze využít pro výpočet efektivního vodního součinitele referenčního betonu následující vztah:

$$\omega_0 = w_a / (c_a + k \cdot a)$$

$\omega_0$  ... vodní součinitel referenčního betonu bez příměsi [-]

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

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

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

$k$  ...  $k$ -hodnota dané příměsi [-]“ [21]

„ $k$ -hodnotu lze poté vypočítat následovně:

$$k = \left( \frac{w_a}{\omega_0} - c_a \right) / a$$

Lze použít ještě vzorec, kde se vyskytuje hodnota množství cementu v betonu s příměsí  $c_a$ :

$$k = \left( \frac{\omega_a}{\omega_0} - 1 \right) / \frac{a}{c_a}$$

Při navrhování betonu využívající koncepci  $k$ -hodnoty,  $k$ -hodnota vyjadřuje maximální hodnotu, kterou lze použít k prokázání, že poměr voda/(cement +  $k$  x příměs) betonu nepřekročí maximální poměr voda/cement, jak je definováno pro příslušný stupeň vlivu prostředí. Při vyhodnocování výsledků různých souborů zkoušek lze stanovit různé  $k$ -hodnoty, protože účinnost příměsi do betonu je závislá na řadě faktorů, jako je například kvalita, množství a vlastnosti příměsi, druh a vlastnosti cementu, stáří a teplota.“ [21]

## 7.2. Metoda výpočtu $k$ -hodnoty

„Metoda výpočtu  $k$ -hodnoty je obecně použitelná pro aktivní příměsí. Koncepce  $k$ -hodnoty je založena na porovnávání vlastností referenčního betonu s cementem „A“ se zkušebním betonem, ve kterém je část cementu „A“ nahrazena aktivní příměsí.“ [21]

„Níže popsaná metoda je založena na Smithově metodě vyvinuté pro popílek v roce 1967. Základem pro výpočet  $k$ -hodnoty je porovnání vodního součinitele a pevnosti betonu se stejným obsahem příměsí. Stanovení by se nemělo stanovovat na základě výsledků jednotlivých betonových směsí, ale na základě souboru dat.“ [21]

„Pro lineární závislost pevnosti v tlaku a omezeném rozsahu vodního součinitele lze použít následující vztah (referenční beton):

$$f_0 = A_0 - B_0 \cdot \omega_0$$

$f_0$  ... pevnost v tlaku referenčního betonu [MPa]

$A_0, B_0$  ... koeficienty lineárního vztahu [-]

$\omega_0$  ... vodní součinitel referenčního betonu bez příměsí [-]

Lineární závislost pro beton s aktivní příměsí bude mít následující vztah:

$$f_a = A_a - B_a \cdot \frac{w_a}{c_a + a}$$

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

$A_a, B_a$  ... koeficienty lineárního vztahu [-]

$w_a$  ... obsah vody v betonu s příměsí [kg/m<sup>3</sup>]

$c_a$  ... obsah cementu v betonu s příměsí [kg/m<sup>3</sup>]

$a$  ... obsah příměsí [kg/m<sup>3</sup>]

Vyjádření  $k$ -hodnoty vychází z následujícího předpokladu:

$$f_0 = f_a$$

$$A_0 - B_0 \cdot \omega_0 = A_a - B_a \cdot \frac{w_a}{c_a + a}$$

$$\omega_0 = \frac{w_a}{c_a + k \cdot a} \rightarrow w_a = \omega_0 \cdot (c_a + k \cdot a)$$

$$A_0 - B_0 \cdot \omega_0 = A_a - B_a \cdot \frac{\omega_0 \cdot (c_a + k \cdot a)}{c_a + a}$$

Nyní pomocí vzorce a nezbytných aritmetických transformací lze určit  $k$ -hodnotu. Při takovém způsobu výpočtu nebude  $k$ -hodnota jedním číslem, ale bude parametrem závislosti vodního součinitele referenčního betonu.“ [21]

$$k = \frac{(A_a - A_0) \cdot (1 + a/c_a)}{B_a \cdot a/c_a} \cdot \frac{1}{\omega_0} + \left[ \frac{B_0 \cdot (1 + a/c_a)}{B_a} - 1 \right] \cdot \frac{1}{a/c_a}$$

### 7.3. Doporučení pro použití *k*-hodnoty

„Pro aplikaci koncepce *k*-hodnoty je třeba vzít v úvahu následující doporučení:

- *k*-hodnota by se měla vypočítat pouze pro vodní součinitel, na který byla namíchána
- kromě cementu a příměsí mají na pevnost betonu vliv všechny ostatní složky betonu, proto je vhodné udržovat jejich konstantní vlastnosti i množství
- je-li nutné udržet konstantní zpracovatelnost, použije se plastifikační přísada, je ovšem nutné kontrolovat množství vzduchu v betonu
- je nutné zajistit co nejmenší rozptyl hodnot pevností v tlaku, neboť větší rozptyl více ovlivňuje výsledné *k*-hodnoty“ [21]

### 7.4. Koncepce *k*-hodnoty dle ČSN EN 206+A2

#### 7.4.1. Obecný popis

„Koncepce *k*-hodnoty je předepsaný postup. Je založen na srovnání posuzování trvanlivosti (nebo, je-li to vhodné, pevnosti jako náhradního kritéria pro trvanlivost) referenčního betonu s cementem „A“ se zkouškami betonu, ve kterém je část cementu „A“ nahrazena příměsí, která se započítává do vodního součinitele.“ [23]

„Pravidla pro použití koncepce *k*-hodnoty pro popílek dle ČSN EN 450-1, pro křemičitý úlet dle ČSN EN 13263-1 a pro mletou granulovanou vysokopecní strusku dle ČSN EN 15167-1 spolu s cementem CEM I a CEM II/A dle ČSN EN 197-1 budou uvedena níže.“ [23]

#### 7.4.2. Koncepce *k*-hodnoty pro popílek

„Pro beton s cementem CEM I a CEM II/A podle ČSN EN 197-1 je povolena *k*-hodnota 0,4. Pro beton s cementem CEM I musí maximální množství popílku, které lze započítat, vyhovovat požadavku hmotnostního poměru: popílek/cement  $\leq 0,33$ . Pro beton s cementem CEM II/A musí maximální množství popílku, které lze započítat, vyhovovat požadavku hmotnostního poměru: popílek/cement  $\leq 0,25$ . Jestliže se přidává větší množství popílku, pak se přebývající část nemůže brát v úvahu pro výpočet součinitele voda/(cement +  $k \times$  popílek) ani pro minimální obsah cementu.“ [23]

„Pro beton s cementem CEM II/B a CEM III/A podle ČSN EN 197-1 ED.2 je povolena *k*-hodnota 0,2. Pro beton s cementem CEM II/B a CEM III/A musí maximální množství popílku, které lze započítat, vyhovovat požadavku hmotnostního poměru: popílek/cement  $\leq 0,25$ . Pro všechny stupně vlivu prostředí s výjimkou XF2, XF4 se smí použít místo vodního součinitele uvedeného v ČSN EN 206+A2 nejvýše přípustný součinitel voda/(cement +  $k \times$  popílek). Obsah (cement +  $k \times$  popílek) nesmí být nižší, než jsou hodnoty uvedené v tabulce v normě ČSN P 73 2404. V případě použití cementu CEM III/A pro stupeň vlivu prostředí XC1-XC4 se princip *k*-hodnoty neuplatní.“ [22]

### **7.4.3. Koncepce $k$ -hodnoty pro mletou granulovanou vysokopecní strusku**

„ $k$ -hodnota a maximální množství mleté granulované vysokopecní strusky, které se bere v úvahu pro výpočet koncepce  $k$ -hodnoty, musí být v souladu s předpisy platnými v místě použití. Pro beton obsahující cement CEM I a CEM II/A podle ČSN EN 197-1 a mletou granulovanou vysokopecní strusku podle ČSN EN 15167-1 se doporučuje  $k$ -hodnota 0,6. Maximální obsah strusky by měl vyhovovat doporučenému hmotnostnímu poměru: struska/cement  $\leq 1,0$ . Pokud se používá větší množství strusky, nemá se její přebytek brát v úvahu pro výpočet vodního součinitele (cement +  $k$  x struska) ani pro minimální obsah cementu.“ [23]

### **7.4.4. Koncepce $k$ -hodnoty pro křemičitý úlet třídy 1**

„Pro beton obsahující cementy CEM I a CEM II/A (s výjimkou cementů obsahujících křemičitý úlet) podle ČSN EN 197-1, je dovoleno použít následující  $k$ -hodnoty:

- pro předepsaný vodní součinitel  $w/c \leq 0,45$  je  $k$ -hodnota rovna 2,0
- pro předepsaný vodní součinitel  $w/c \geq 0,45$  je  $k$ -hodnota rovna 2,0 s výjimkou stupňů prostředí XC a XF, kde  $k = 1,0$ “ [23]

„Maximální množství křemičitého úletu třídy 1, které lze vzít v úvahu pro výpočet součinitele voda/(cement +  $k$  x křemičitý úlet) a pro výpočet minimálního obsahu cementu, musí vyhovovat požadavku hmotnostního poměru: křemičitý úlet/cement  $\leq 0,11$ . Jestliže se přidá větší množství křemičitého úletu třídy 1, pak se přebývající část nesmí brát v úvahu pro výpočet součinitele voda/(cement +  $k$  x křemičitý úlet) a pro výpočet minimálního obsahu cementu. Množství cementu se nesmí snížit o více než 30 kg/m<sup>3</sup> pod minimální obsah cementu požadovaný pro příslušný stupeň vlivu prostředí.“ [23]

## 7.5. Využití $k$ -hodnoty při navrhování betonů

„Pro návrh betonu s využitím koncepce  $k$ -hodnoty je nutné si v normě ČSN EN 206+A2 zjistit pro daný stupeň vlivu prostředí minimální množství cementu a maximální vodní součinitel. Povolené  $k$ -hodnoty a poměr náhrady cementu příměsí musí být též převzaty ze stejné normy, případně musí být odvozeny z národních předpisů.“ [21]

### 7.5.1. Příklad návrhu betonové směsi s použitím koncepce $k$ -hodnoty

„Úkolem je navrhnout beton s použitím portlandského směsného cementu CEM II/A-S pro stupeň vlivu prostředí XC4. Z ČSN EN 206+A2 lze zjistit minimální množství cementu, které je  $300 \text{ kg/m}^3$ . Dále je možné zjistit maximální vodní součinitel, který má pro daný stupeň vlivu prostředí (XC4) hodnotu 0,5. V takové situaci je možné nahradit určité množství cementu popílkem ( $k = 0,4$ ), poměr: popílek/cement  $\leq 0,25$ .

#### Stanovení obsahu popílku

ČSN EN 206+A2 definuje, že množství (cement +  $k \times$  příměs) nesmí být menší než obsah cementu pro daný stupeň vlivu prostředí. Dále je nutné dodržet podmínku poměr: popílek/cement  $\leq 0,25$ . Z těchto dvou podmínek vzniknou dvě rovnice, díky kterým zjistíme množství cementu a popílku.

$$c_a + k \cdot a \geq 300$$

$$\frac{a}{c_a} \leq 0,25$$

Provedeme substituci:

$$c_a + 0,4 \cdot 0,25 \cdot c_a \geq 300$$

$$c_a \geq 272 \rightarrow c_a = 280 \text{ kg/m}^3$$

Dopočítáme množství popílku:

$$a \leq 0,25 \cdot 280$$

$$a \leq 70 \rightarrow a = 70 \text{ kg/m}^3$$

#### Stanovení maximálního obsahu vody

$$w_a / (c_a + k \cdot a) \leq 0,5$$

$$w_a \leq 0,5 \cdot (c_a + k \cdot a) \rightarrow w_a \leq 0,5 \cdot (280 + 0,4 \cdot 70) \rightarrow w_a \leq 154 \text{ l/m}^3$$

Pro stupeň vlivu prostředí XC4 je možné použít  $280 \text{ kg/m}^3$  cementu CEM II/A-S,  $70 \text{ kg/m}^3$  popílku a maximální množství vody, které lze použít, aby byl beton odolný prostředí XC4 je  $154 \text{ l/m}^3$ .“ [21]

## 7.6. Pohlížení na koncepci *k*-hodnoty, možnost předefinování *k*-hodnoty a souvislost *k*-hodnoty a indexu účinnosti

„Současná ustanovení jsou založena na technologických parametrech, jako je obsah cementu, vodní součinitel a pevnost v tlaku, ale množství vědeckých výzkumů tato ustanovení kritizuje. Pevnost betonu v tlaku se nejeví jako vyhovující parametr pro zaručení trvanlivosti betonu. Požadovaný minimální obsah cementu je rovněž považován za nevhodný parametr, jak ukázal výzkum. I k vodnímu součiniteli, jenž je považován za jeden z nejdůležitějších parametrů trvanlivosti betonu, by se mělo přihlížet obezřetněji. V případě použití portlandského cementu a vody je definice vodního součinitele zcela jasná a není zpochybňována. Při použití pouze portlandského cementu a vody existuje jasná souvislost mezi vodním součinitelem a pevností.“ [28]

„Při současném trendu stále častějšího používání příměsí do betonů je definice vodního součinitele diskutabilní a nejasná. Evropská norma EN 206 se snaží tento problém řešit definicí koncepce *k*-hodnoty. Koncepce *k*-hodnoty se zdá být funkční pro jednoduché případy s omezeným množstvím použité aktivní příměsi. V mnoha zemích byly zahájeny diskuse o platnosti koncepce *k*-hodnoty pro složitější případy. V důsledku mnoha potíží spojených s koncepcí *k*-hodnoty se v Evropě definované *k*-hodnoty mohou v členských zemích lišit. Hlavním problémem je skutečnost, že koncepce *k*-hodnoty je v zásadě založena na pevnosti betonu, díky čemuž není souvislost s trvanlivostí betonu vždy jasná.“ [28]

„Například ve Francii, kde se koncepce *k*-hodnoty používá pro aktivní příměsi a některé příměsi I. typu (vápenec) jsou hodnoty odvozeny z Bolomeyovy metody a upraveny zkušenostmi. Porovnání různých přístupů ukazuje, že existují mírné rozdíly ve vypočítaných *k*-hodnotách, ale úroveň výsledků je podobná. Odchyly ve výsledcích naměřených pevností v tlaku mají mnohem větší vliv na vypočítané *k*-hodnoty.“ [21]

Celá koncepce *k*-hodnoty je především zatím ve stavu zkoušení, zkoumání a zjišťování nových informací, neboť se jedná o velmi složitou problematiku. Nejpodrobnější informace ke koncepci *k*-hodnoty nám poskytuje především PD CEN/TR 16639: Use of *k*-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept. Informace pro možnosti předefinování *k*-hodnoty s ohledem na aktivitu dané příměsi jsou zatím takřka nulové. Proto, jak bylo uvedeno výše, je *k*-hodnota občas upravována i díky zkušenostem výzkumných pracovníků, kteří se této problematice podrobně věnují. Stejně jako možnost předefinování *k*-hodnoty i souvislost mezi indexem účinnosti a *k*-hodnotou zatím nebyla prověřena studii a následným provedením zkoušek, které by nám daly jasné souvislosti mezi indexem účinnosti a *k*-hodnotou.

# PRAKTICKÁ ČÁST

## 8. Cíl praktické části

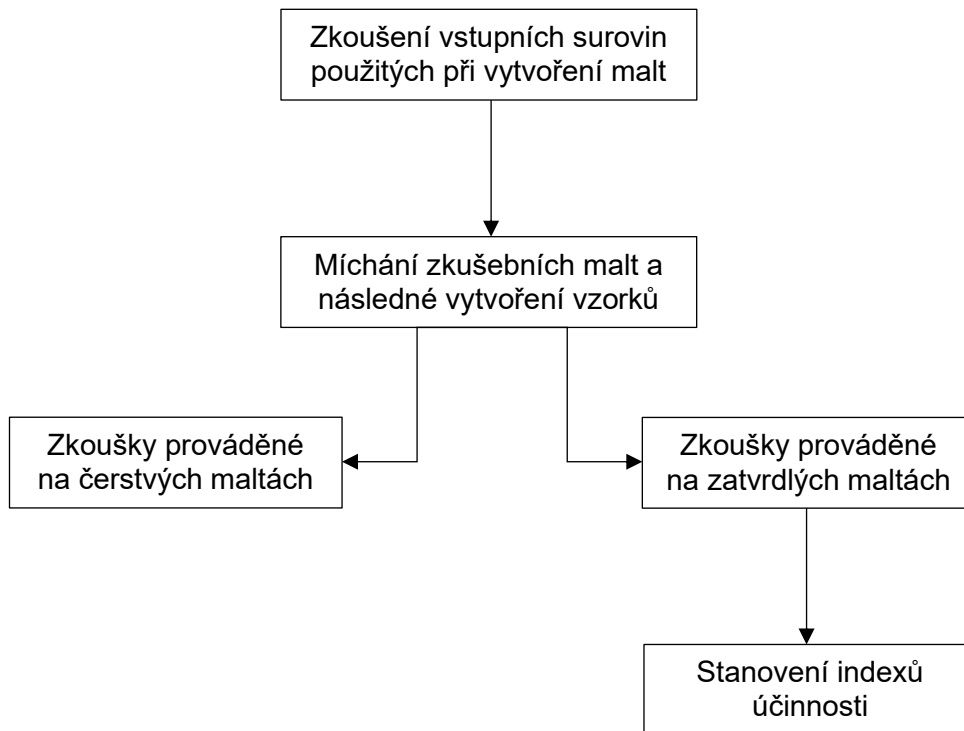
Praktická část bakalářské práce byla rozdělena na dvě části.

První část zahrnovala vytvoření cementových malt bez náhrady cementu, s náhradou cementu 25, 35 a 50 % danou příměsí. Cement CEM I 42,5 R byl nahrazen následujícími příměsemi: mikromletý vápenec, vysokoteplotní popílek Dětmárovice a jemně mletá struska Cemex. U všech cementových malt byl zachován stejný vodní součinitel, proto se sledovaly dopady na konzistenci čerstvých malt. Po zatvrdnutí byly vzorky uloženy do vodního prostředí. Po 2, 7, 28, 60 a 90 dnech byly zkušební vzorky podrobeny pevnostní zkoušce v tlaku. Poté bylo možné určit indexy účinnosti u cementových malt, které byly nahrazeny zčásti příměsí.

V druhé části bylo cílem namíchat beton C30/37 s náhradou cementu určitou dávkou příměsí. Konkrétně se jednalo o náhradu cementu 25 % mikromletým vápencem (MV 25), 25 % popílkem Dětmárovice (PD 25) a 35 % popílkem Dětmárovice (PD 35). U všech betonových záměsí bylo dávkováno konstantní množství vody (konstantní vodní součinitel), opět byla sledována konzistence čerstvých betonů. Po zatvrdnutí byly vzorky uloženy do vodního prostředí a následně byly po 7, 28, 60 a 90 dnech testovány na pevnost v tlaku.

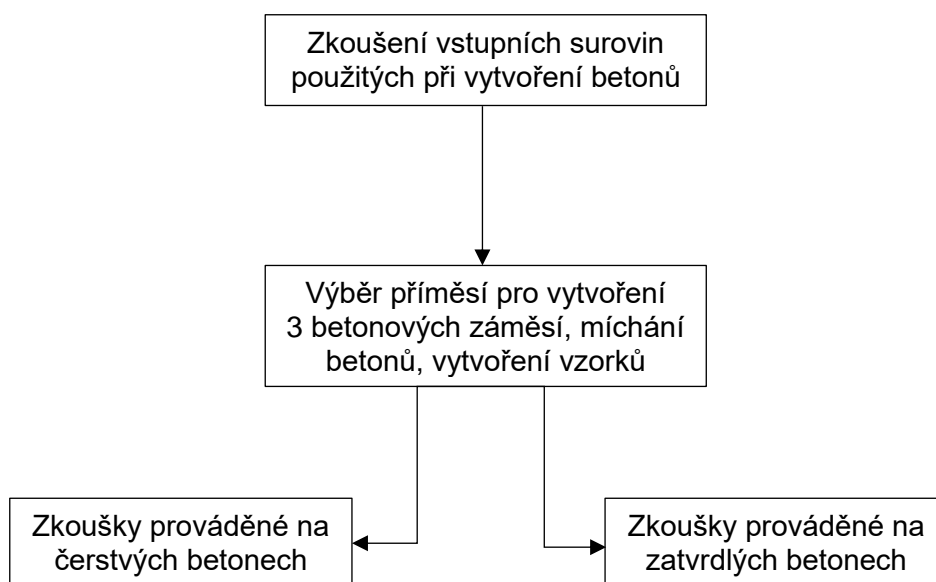
## 9. Schéma praktické části

### První část



Obrázek 3: Schéma první části praktické části

### Druhá část



Obrázek 4: Schéma druhé části praktické části

## 10. Popis vstupních surovin

### 10.1. Cement

Pro výrobu malt i betonů byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Hranice.

### 10.2. Kamenivo

Při výrobě cementových malt byl použit normalizovaný písek CEN, frakce 0 - 2 mm.

Zkoušky prováděné na kamenivu:

- stanovení zrnitosti kameniva dle ČSN EN 933-1
- stanovení sypné hmotnosti volně sypaného kameniva dle ČSN EN 1097-3
- stanovení objemové hmotnosti dle ČSN EN 1097-6

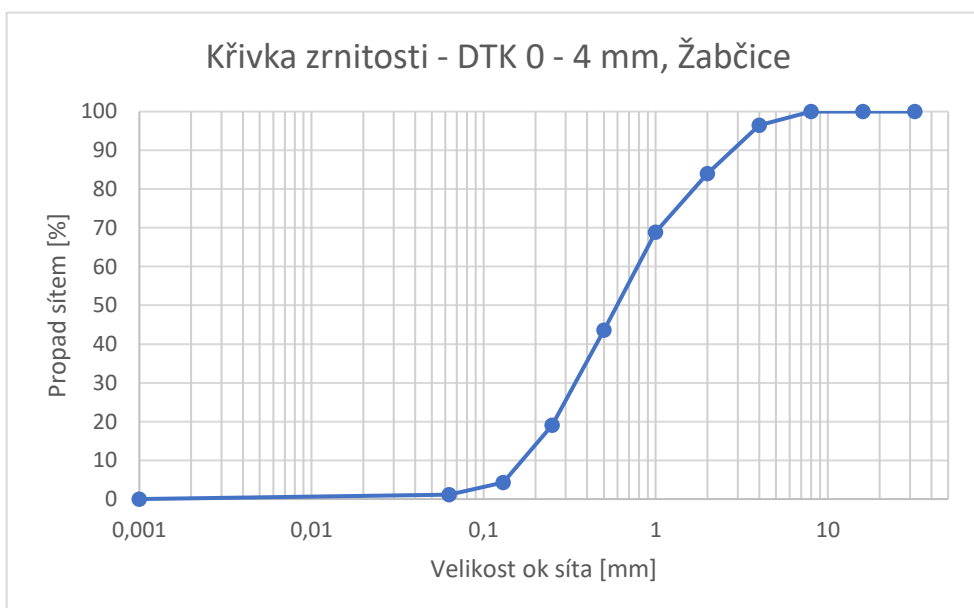
Při výrobě betonů bylo použito kamenivo tří frakcí.

#### 1. DTK 0 - 4 mm, Žabčice

Jedná se o písek praný ve vodě, který má žlutou barvu. (DTK – drobné těžené kamenivo)

Tabulka 6: Sítový rozbor vzorku DTK 0 - 4 mm, Žabčice

Velikost ok síta [mm]	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,13	0,063
Propad sítem [g]	986	986	986	951	828	679	430	188	42	11
Propad sítem [%]	100	100	100	96	84	69	44	19	4	1



Graf 1: Křivka zrnitosti vzorku DTK 0 - 4 mm, Žabčice

Fyzikální vlastnosti:

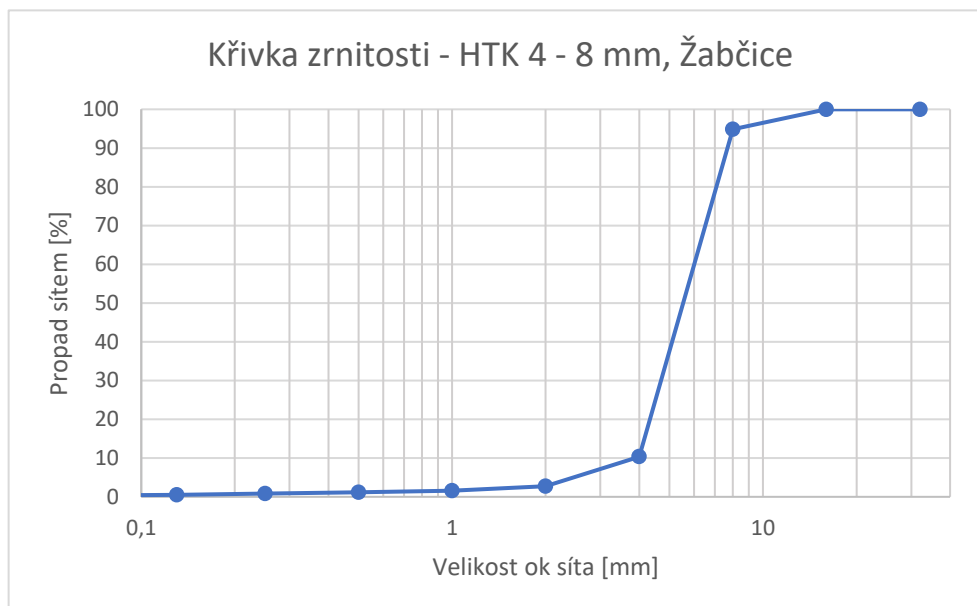
- sypná hmotnost: 1610 kg/m<sup>3</sup>
- objemová hmotnost: 2500 kg/m<sup>3</sup>

## 2. HTK 4 - 8 mm, Žabčice

Kamenivo prané ve vodě. (HTK – hrubé těžené kamenivo)

Tabulka 7: Sítový rozbor vzorku HTK 4 - 8 mm, Žabčice

Velikost ok síta [mm]	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,13	0,063
Propad sítem [g]	1122	1122	1064	116	31	18	13	9	6	4
Propad sítem [%]	100	100	95	10	3	2	1	1	1	0



Graf 2: Křivka zrnitosti vzorku 4 - 8 mm, Žabčice

Fyzikální vlastnosti:

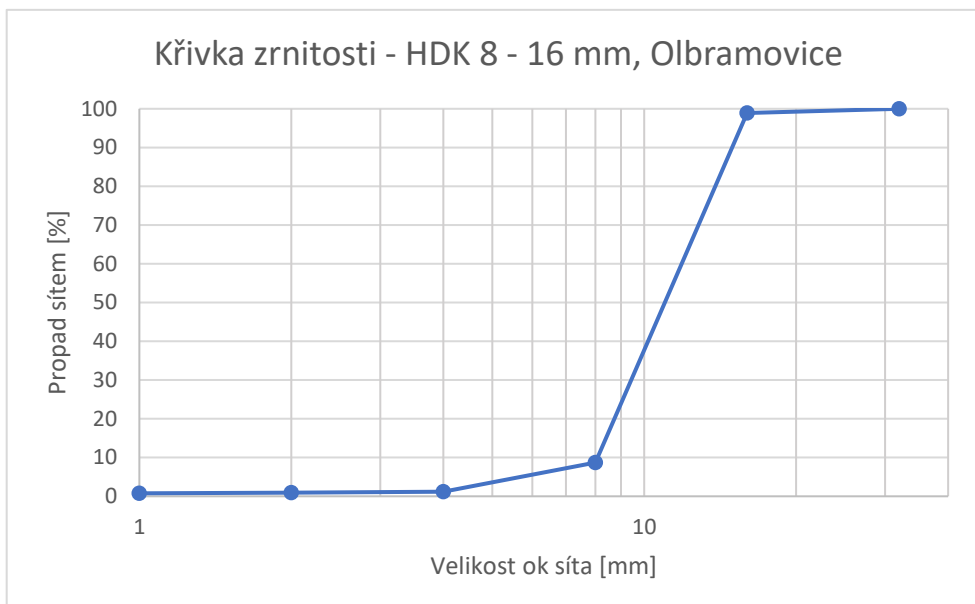
- sypná hmotnost: 1520 kg/m<sup>3</sup>
- objemová hmotnost: 2630 kg/m<sup>3</sup>

## 3. HDK 8 - 16 mm, Olbramovice

Jedná se o drcené prané kamenivo. (HDK – hrubé drcené kamenivo)

Tabulka 8: Sítový rozbor vzorku HDK 8 - 16 mm, Olbramovice

Velikost ok síta [mm]	32	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,13	0,063
Propad sítem [g]	1504	1488	131	18	14	12	10	8	6	4
Propad sítem [%]	100	99	9	1	1	1	1	1	0	0



**Graf 3: Křivka zrnitosti vzorku HDK 8 - 16 mm, Olbramovice**

Fyzikální vlastnosti:

- sypaná hmotnost:  $1350 \text{ kg/m}^3$
- objemová hmotnost:  $2630 \text{ kg/m}^3$

### 10.3. Záměsová voda

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

### 10.4. Příměsi

Pro výrobu malt i betonů byly použity následující tři příměsi: Mikromletý vápenec, černouhelný popílek Dětmorovice a struska Cemex Dětmorovice.

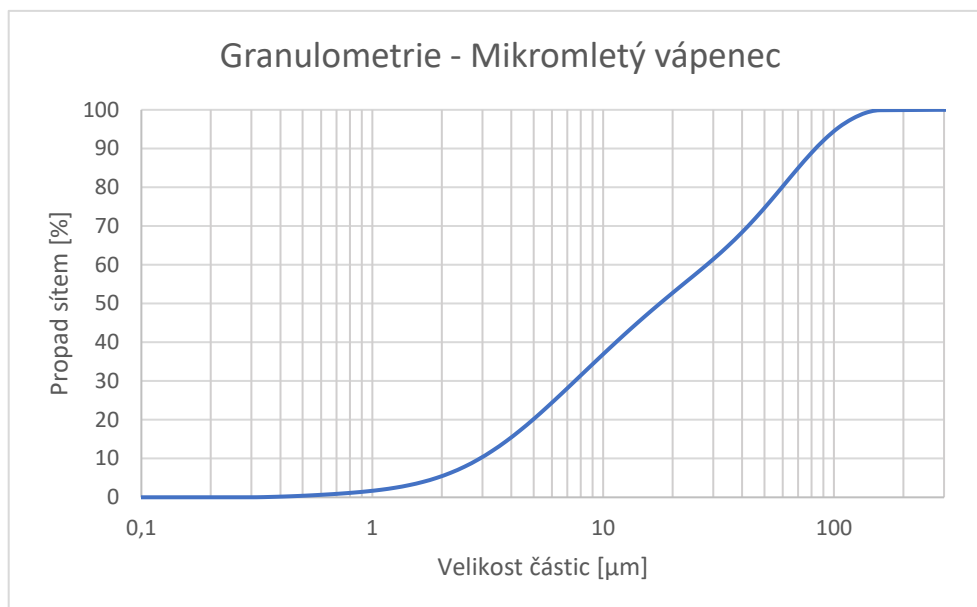
Zkoušky prováděné u příměsí

- stanovení měrné hmotnosti dle ČSN EN 196-6
- stanovení jemnosti mletí (měrného povrchu) permeabilní metodou dle ČSN EN 196-6
- stanovení granulometrie pomocí granulometru Mastersizer 2000.

### 10.4.1. Mikromletý vápenec

Pro výrobu malt i betonů byl použit mikromletý vápenec následujících fyzikálních vlastností:

- měrná hmotnost: 2,74 g/cm<sup>3</sup>
- měrný povrch: 4100 cm<sup>2</sup>/g

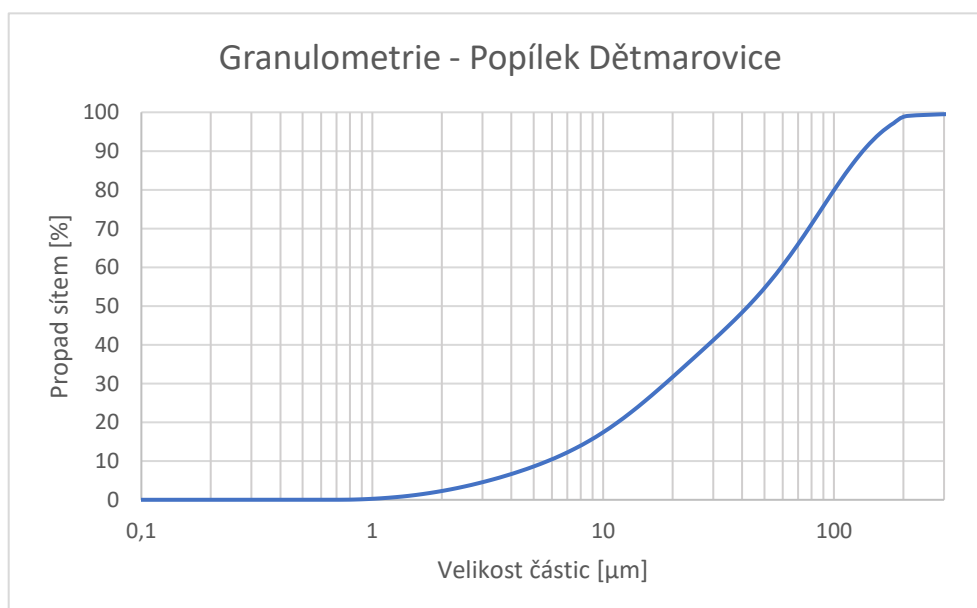


Graf 4: Granulometrie mikromletého vápence

### 10.4.2. Popílek

Pro výrobu malt i betonů byl použit černouhelný popílek z tepelné elektrárny Dětmarovice, který měl následující fyzikální vlastnosti:

- měrná hmotnost: 2,33 g/cm<sup>3</sup>
- měrný povrch: 3180 cm<sup>2</sup>/g

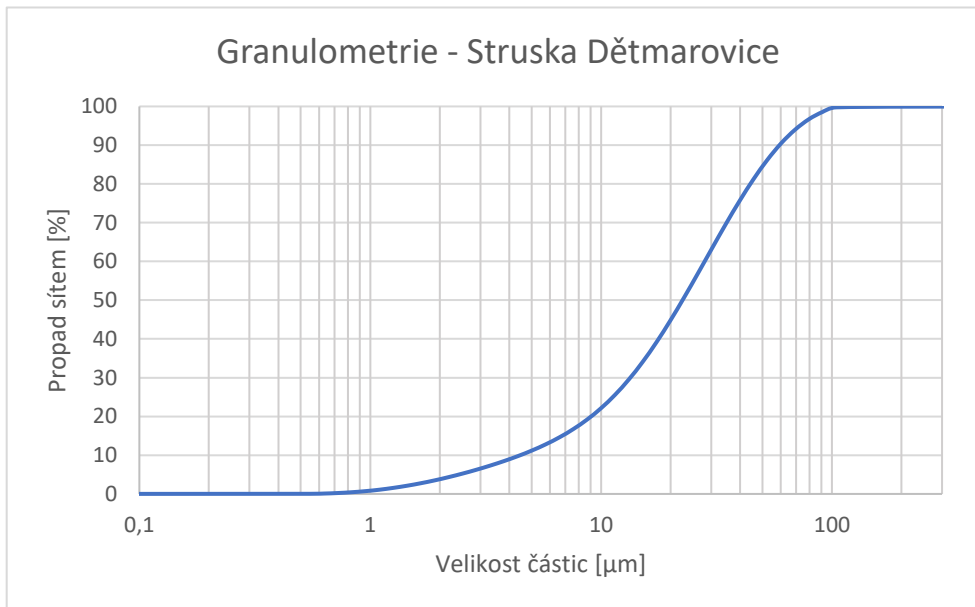


Graf 5: Granulometrie popílku Dětmarovice

### 10.4.3. Struska

Pro výrobu malt byla použita jemně mletá struska Cemex Dětmarovice následujících fyzikálních vlastností:

- měrná hmotnost: 2,97 g/cm<sup>3</sup>
- měrný povrch: 3530 cm<sup>2</sup>/g



Graf 6: Granulometrie strusky Cemex Dětmarovice

## 11. Postupy provedených zkoušek

### 11.1. Zkoušky provedené na čerstvých maltách

#### 11.1.1. Konzistence

„Zkouška byla provedená dle ČSN EN 1015-3: Zkušební metody malt pro zdivo – Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešovacího stolku).

#### Podstata zkoušky

Hodnota rozlité se stanoví změřením průměru rozlitého zkušební vzorku čerstvé malty umístěné na desce střešovacího stolku pomocí kovového kužele po předepsaném počtu svislých pádů, při nichž se deska střešovacího stolku zvedá a pak volně padá z předepsané výšky.

#### Zkušební zařízení:

- střešací stolek
- kovový kužel vysoký 60 mm o vnitřním průměru 100 mm ve spodní části a vnitřním průměru 70 mm v horní části
- dusadlo o průměru 40 mm a délce asi 200 mm
- měřidlo umožňující měření průměru do 300 mm s přesností 1 mm

### Postup zkoušení

Před každou zkouškou se deska a vnitřní povrch kovového kužele očistí vlhkou tkaninou a otřou se do sucha. Kovový kužel se umístí do středu desky střešacího stolku a naplní se maltou ve dvou vrstvách. Každá vrstva se rozprostře nejméně 10 lehkými údery dusadla tak, aby byl kovový kužel rovnoměrně naplněn. Přebytečná malta se setře pomocí špachtle a volná plocha desky se pečlivě otře. Asi po 15 s se kovový kužel lehce zvedne kolmo vzhůru a malta se na desce střešacího stolku rozlije 15 nárazy s konstantní frekvencí jednoho zdvihu za jednu sekundu. Průměr koláče malty se změří ve dvou na sebe kolmých směrech pomocí měřidla. Výsledek se udává s přesností na 1 mm.“ [24]

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

### **11.2.1. Objemová hmotnost**

#### Podstata zkoušky

„Objemová hmotnost zatvrdlých malt je závislost hmotnosti tělesa ku objemu tělesa.

#### Zkušební zařízení

- laboratorní váhy
- posuvné měřítko

#### Postup zkoušení

Zkušební těleso se otře hadříkem, změří se pomocí posuvného měřítka a následně se zváží na laboratorních vahách. Poté proběhne výpočet dle níže uvedeného vzorce. Objemová hmotnost se po výpočtu zaokrouhluje na 10 kg/m<sup>3</sup>.

#### Výpočet objemové hmotnosti

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

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

m ... hmotnost trámečků [kg]

V ... objem trámečků [m<sup>3</sup>]“ [26]

### **11.2.2. Pevnost v tlaku**

„Zkouška byla provedená dle ČSN EN 196-1: Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti.

#### Podstata zkoušky

Metoda určuje stanovení pevnosti v tlaku na dvou polovinách trámečků, které zůstaly po zkoušce pevnosti v tahu za ohybu, která byla prováděna na trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm.

#### Zkušební zařízení

- zkušební stroj pro stanovení pevnosti v tlaku

### Postup zkoušení

Zkouška se provádí na polovinách trámečků zlomených při zkoušce pevnosti tahu za ohybu. Poloviny trámečků se vystředí bočními stranami (tj. kolmo na směr hutnění) na destičkách zkušebního stroje, destičky mají rozměry 40 mm x 40 mm (tlačná plocha). Zatížení se zvyšuje plynuje rychlostí  $2400 \pm 200$  N/s až do porušení.

### Výpočet pevnosti v tlaku

$$R_c = \frac{F_c}{1600} [N/mm^2] = [MPa]$$

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

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

1600 ... plocha destiček (40 mm x 40 mm) [mm<sup>2</sup>]

Pevnost v tlaku se vyjádří průměrnou aritmetickou hodnotou ze šesti jednotlivých výsledků sady tří trámečků. Kdy každý výsledek je vyjádřen s přesností na 0,1 MPa. Pokud se odlišuje jeden ze šesti výsledků o více než  $\pm 10$  % od jejich průměrné hodnoty, vyřadí se a aritmetický průměr se vypočítá ze zbývajících pěti výsledků. Odlišuje-li se jeden výsledek z pěti zbývajících o více než  $\pm 10$  % jejich průměrné hodnoty, celá zkoušená sada trámečků se vyřadí a stanovení se opakuje. Aritmetický průměr se zaokrouhluje na 0,1 MPa.“ [20]

## **11.3. Zkoušky provedené na čerstvém betonu**

### **11.3.1. Konzistence**

„Zkouška byla provedená dle ČSN EN 12350-2: Zkoušení čerstvého betonu – Část 2: Zkouška sednutím.

### Podstata zkoušky

Čerstvý beton se zhutní ve formě tvaru kužele. Po zvednutí komolého kužele nahoru udává konzistenci betonu změřená vzdálenost, o kterou beton poklesl.

### Zkušební zařízení

- dutý komolý kužel (výška  $300 \pm 2$ , průměr dolní základny  $200 \pm 2$  mm, průměr horní základny  $100 \pm 2$  mm)
- propichovací tyč (délka  $600 \pm 5$  mm)
- násypka, pravítko, podkladní deska

### Postup zkoušení

Kužel i podkladní deska se navlhčí, kužel se položí na vodorovnou podkladní desku. Během plnění kužele musí být kužel plně přichycen k podkladní desce, například přišlápnutím dvou příložek. Kužel se plní ve třech vrstvách (pro snazší plnění se použije násypka), každá přibližně do jedné třetiny výšky kužele. Každá vrstva se zhutňuje 25 vpichy propichovací tyčí, nejlépe tak, aby tyč pronikla i do nižší vrstvy. Po zhutnění třetí vrstvy se odstraní násypka a přebytečný beton. Z podkladní desky se odstraní spadlý beton. Následně se kužel během 2 až 5 sekund rovnoměrně bez otáčení zvedne vzhůru. Po zvednutí formy se změří sednutí, jedná se o rozdíl mezi výškou formy a nejvyšším bodem sednutého zkušební vzorku. Celá zkouška od počátku plnění po zvednutí kužele musí být ukončena během 150 s. Výsledné sednutí je zaokrouhleno na nejbližších 10 mm.“ [25]

## **11.4. Zkoušky provedené na zatvrdlém betonu**

### **11.4.1. Objemová hmotnost**

„Zkouška byla provedená dle ČSN EN 12390-7: Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 7: Objemová hmotnost zatvrdlého betonu.

#### Podstata zkoušky

Objemová hmotnost zatvrdlého betonu je závislost hmotnosti tělesa ku objemu tělesa.

#### Zkušební zařízení

- posuvné měřítko
- váhy

#### Postup zkoušení

Pomocí posuvného měřítka se změří potřebné rozměry a poté se těleso zváží na laboratorních vahách. Následně proběhne výpočet dle níže uvedeného vzorce. Objemová hmotnost se po výpočtu zaokrouhluje na 10 kg/m<sup>3</sup>.

#### Výpočet objemové hmotnosti

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

D ... objemová hmotnost zkušební tělesa [kg/m<sup>3</sup>]

m ... hmotnost zkušební tělesa [kg]

V ... objem zkušební tělesa [m<sup>3</sup>]“ [26]

### 11.4.2. Pevnost v tlaku

„Zkouška byla provedená dle ČSN EN 12390-3: Zkoušení zatvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles.

#### Podstata zkoušky

Zkušební tělesa jsou zatěžována až do porušení ve zkušebním lisu. Maximální zatížení při rozdrčení tělesa je zaznamenáno a vypočítá se z něj pevnost betonu v tlaku.

#### Zkušební zařízení

- zkušební lis

#### Zkušební postup

Otřou se dotykové plochy tlačných desek lisu a odstraní se všechny zbytky písku nebo jiného materiálu z povrchu zkušebního tělesa na plochách, které budou v dotyku s tlačnými plochami. Krychle se osadí tak, aby směr zatěžování byl kolmý na směr ukládání betonu. Nastaví se konstantní rychlost zatěžování  $0,6 \pm 0,2$  MPa/s, vzorek se zatěžuje až do porušení. Poté se zaznamená maximální zatížení v kN. Pevnost v tlaku se zaokrouhlí na nejbližších 0,1 MPa.

#### Výpočet pevnosti v tlaku

$$f_c = \frac{F}{A_c} [N/mm^2] = [MPa]$$

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

$F$  ... maximální zatížení při porušení [N]

$A_c$  ... průřezová plocha zkušebního tělesa, na kterou působí zatížení v tlaku [mm<sup>2</sup>] [27]

## 12. Složení receptur malt a betonů

V cementových maltách se cement nahradil příměsí v množství 25, 35 a 50 %. Po 28 dnech se určil u všech cementových malt index účinnosti a byly zvoleny tři receptury betonů, které se poté míchaly. V první receptuře betonu byl nahrazen cement 25 % mikromletým vápencem. U dalších dvou receptur betonu se cement nahrazoval popílkem Dětmarovice, přesněji 25 a 35 %.

### 12.1. Receptury malt

Tabulka 9: Receptury malt

Receptury malt [g]	Normalizovaný písek	Voda	CEM I 42,5 R	Příměsi		
				Mikromletý vápenec	Popílek Dětmarovice	Struska Dětmarovice
REF	1350	225	450	-	-	-
MV 25	1350	225	337	113	-	-
MV 35	1350	225	292	158	-	-
MV 50	1350	225	225	225	-	-
PD 25	1350	225	337	-	113	-
PD 35	1350	225	292	-	158	-
PD 50	1350	225	225	-	225	-
SD 25	1350	225	337	-	-	113
SD 35	1350	225	292	-	-	158
SD 50	1350	225	225	-	-	225

#### 12.1.1. Postup výroby zkušebních malt a jejich zkoušení

- 1) Příprava vstupních surovin.
- 2) „Míchání zkušebních malt dle ČSN EN 196-1: Do nádoby se vnese voda a cement. Po styku vody a cementu se spustí míchání na nízkou rychlost. Po 30 s míchání se plynule po dobu dalších 30 s vsypává písek. Poté se míchání přepne na vysokou rychlost a v míchání se pokračuje dalších 30 s. Míchání se na 90 s zastaví, pomocí stěrky se setře malta, která ulpí na stěnách a spodní části nádoby a umístí se do jejího středu. V míchání se pokračuje dalších 60 s vysokou rychlostí.“ [20]
- 3) Zkoušení čerstvých malt s použitím střešovacího stolku dle ČSN EN 1015-3.
- 4) Zhotovení zkušebních těles o velikosti 40 x 40 x 160 mm: Do trojformy magneticky připevněné k vibračnímu stolku se lžící dávkuje připravená malta v první vrstvě, poté se spustí na pár vteřin vibrační stolek. Po vypnutí vibračního stolku se postup opakuje. Forma se sejme z vibračního stolku, odstraní se přebytečná malta a uhladí se povrch. Vzorky se označí štítkem.
- 5) Po 24 hodinách zrání se zkušební tělesa odformovala a uložila se do vody.
- 6) Zkoušení zatvrdlých malt.
  - Zkoušení objemové hmotnosti.
  - Zkoušení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 196-1 ve stáří 2, 7, 28, 60 a 90 dnů.

## 12.2. Receptury betonů

Tabulka 10: Receptury betonů

Receptury betonů [kg/m <sup>3</sup> ]	CEM I 42,5 R	Voda	DTK 0 - 4 mm	HTK 4 - 8 mm	HDK 8 - 16 mm	Příměsi	
						Mikromletý vápenec	Popílek Dětmarovice
REF	350	235	872	246	662	-	-
MV 25	226	235	872	246	662	124	-
PD 25	233	235	872	246	662	-	117
PD 35	166	235	872	246	662	-	184

Množství příměsi použité do betonu se vypočítá dle vzorce níže.

$$m_p = \frac{1}{I_{u28}} \cdot \varphi \cdot m_c [kg]$$

$m_p$  ... množství příměsi [kg]

$I_{u28}$  ... index účinnosti po 28 dnech [%]

$\varphi$  ... množství příměsi [%]

$m_c$  ... množství cementu použitého u referenční receptury [kg]

### 12.2.1. Postup výroby betonu a jeho zkoušení

- 1) Příprava vstupních surovin.
- 2) Míchání betonové směsi v horizontální míchačce s nuceným oběhem.
- 3) Zkoušení konzistence čerstvého betonu metodou sednutí kužele dle ČSN EN 12350-2.
- 4) Zhotovení zkušebních těles (krychle) s délkou hrany 100 mm.
- 5) Po 24 hodinách zrání se zkušební tělesa odformovala a uložila se do vody.
- 6) Zkoušení zatvrdlého betonu.
  - Zkoušení objemové hmotnosti zatvrdlého betonu dle ČSN EN 12390-7.
  - Zkoušení pevnosti v tlaku dle ČSN EN 12390-3 ve stáří 7, 28, 60 a 90 dnů.

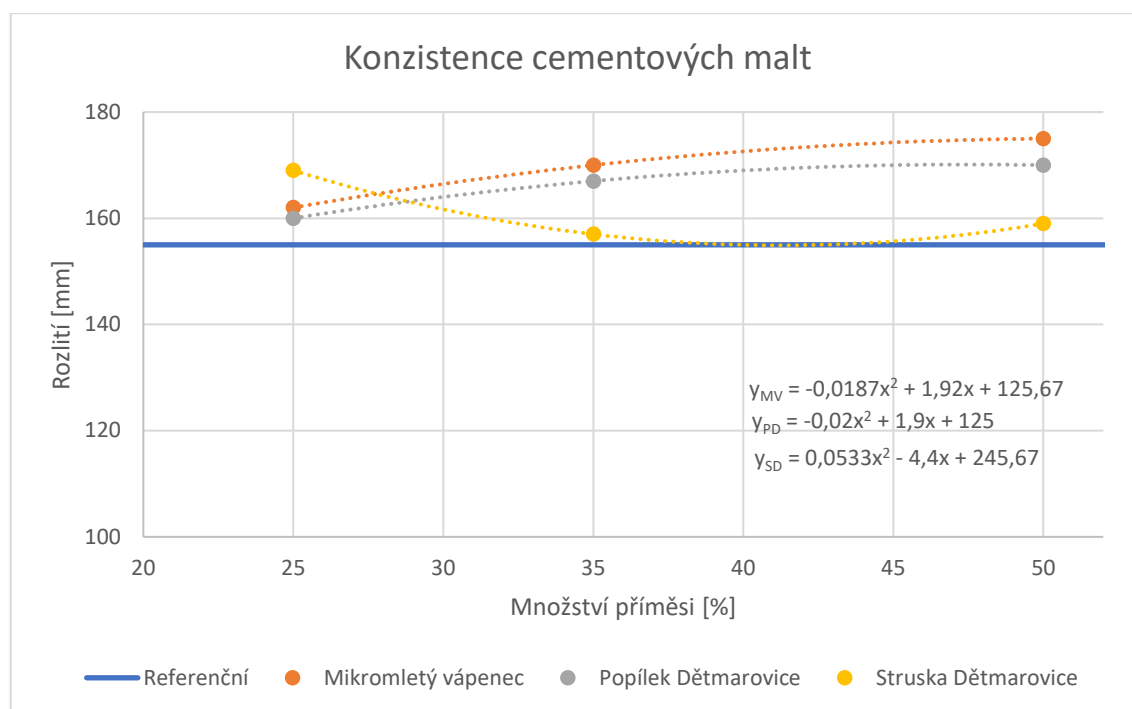
## 13. Výsledky zkoušek a jejich vyhodnocení

### 13.1. Výsledky zkoušek čerstvých malt

#### 13.1.1. Konzistence

Tabulka 11: Konzistence čerstvých malt

Receptury malt	Rozliti [mm]			
	Náhrada cementu [% hm.]			
	0	25	35	50
Referenční	155	-	-	-
Mikromletý vápenec	-	162	170	175
Popílek Dětmarovice	-	160	167	170
Struska Dětmarovice	-	169	157	159



**Graf 7: Konzistence cementových malt**

V grafu je možné vidět rozdílné konzistence všech namíchaných čerstvých malt, s náhradou cementu příměsí, ale i bez náhrady cementu (referenční malta). Díky grafu by se dalo teoreticky odečíst množství příměsi, které když nahradí cement, tak nedojde oproti referenční maltě ke změně konzistence. Mikromletý vápenec vykazuje s rostoucím množstvím příměsi i rostoucí hodnotu rozlití. Při náhradě 50 % cementu se hodnota rozlití zvýší o 20 mm (13 %). Popílek Dětmárovice vykazuje obdobné chování jako mikromletý vápenec, i zde s rostoucím množstvím příměsi roste hodnota rozlití. Při náhradě 50 % cementu se hodnota rozlití zvýší o 15 mm, což je oproti referenční maltě změna konzistence o 10 %. Pouze struska Dětmárovice při náhradě 40 % cementu dosáhne stejné konzistence, jako referenční malta. U strusky Dětmárovice můžeme sledovat, že při náhradě 25 % cementu je rozlití vyšší, než rozlití referenční malty, poté s rostoucím množstvím příměsi konzistence klesá, až do již zmíněných 40 %, kde dosahuje stejné konzistence, jako referenční malta. Při dalším zvyšování množství příměsi strusky Dětmárovice konzistence opět roste, avšak minimálně, neboť při náhradě 50 % cementu se zvýší hodnota konzistence o 4 mm, což představuje 3 %.

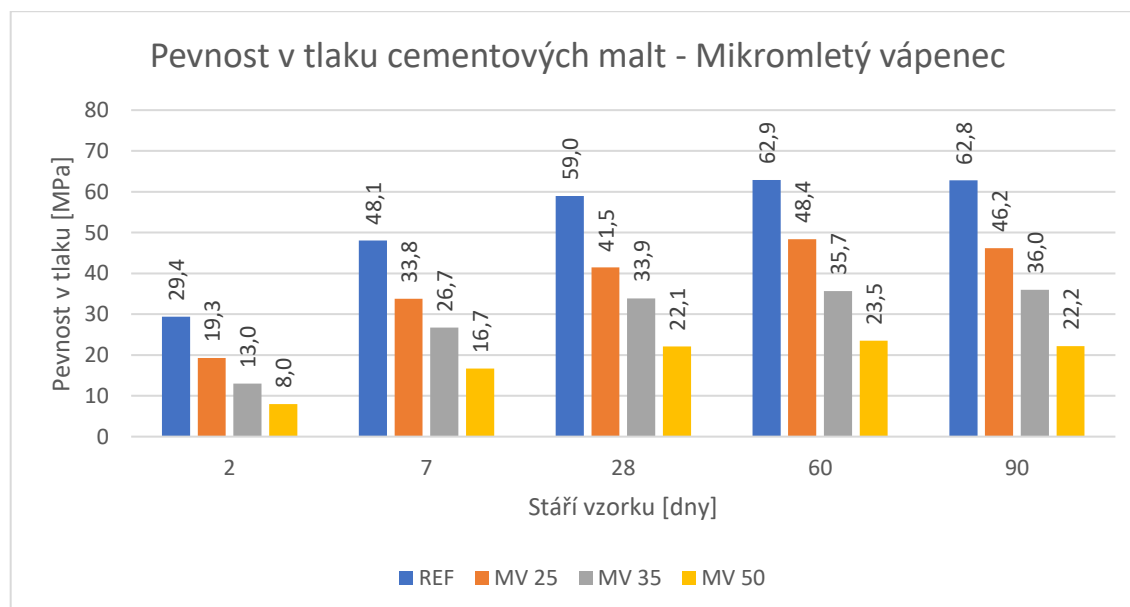
## 13.2. Výsledky zkoušek zatvrdlých malt

### 13.2.1. Objemová hmotnost a pevnost v tlaku

Tabulka 12: Objemová hmotnost a pevnost v tlaku zatvrdlých malt

Receptury malt	Náhrada cementu [%]	Pevnost v tlaku [MPa]					Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
		Stáří vzorku [dny]					
		2	7	28	60	90	
REF	0	29,4	48,1	59,0	62,9	62,8	2260
MV	25	19,3	33,8	41,5	48,4	46,2	2250
	35	13,0	26,7	33,9	35,7	36,0	2220
	50	8,0	16,7	22,1	23,5	22,2	2220
PD	25	22,4	35,8	44,2	53,9	59,9	2260
	35	16,1	28,3	39,2	47,0	55,2	2250
	50	10,4	18,0	27,2	34,8	40,9	2230
SD	25	17,0	37,1	52,8	66,8	68,2	2270
	35	13,2	29,8	49,3	61,9	63,3	2250
	50	8,3	23,0	41,7	59,7	58,7	2260

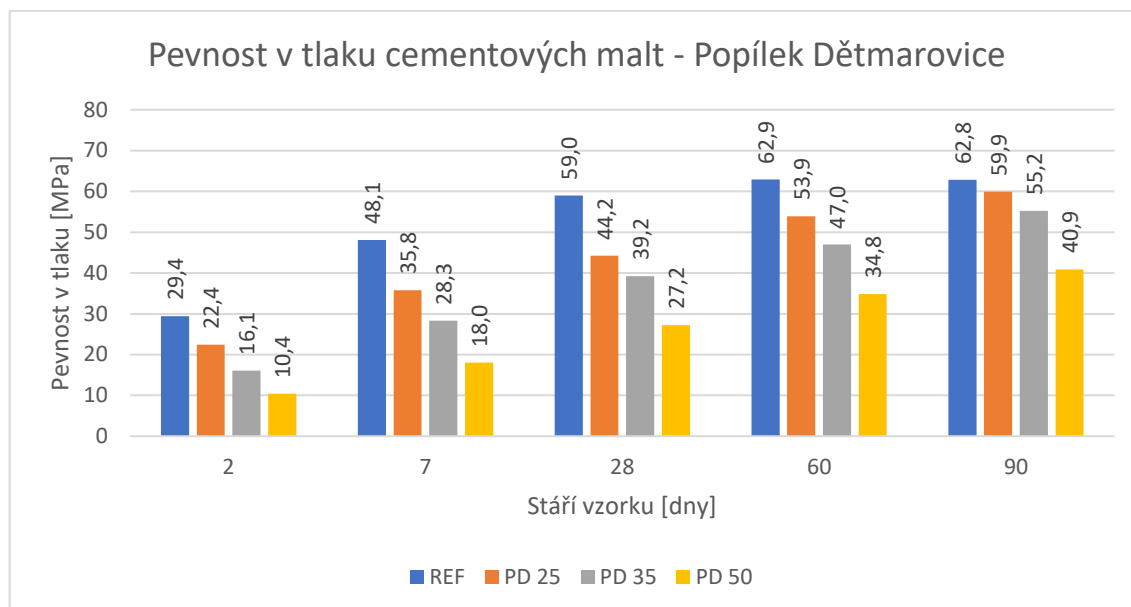
Objemová hmotnost u všech vzorků dosahuje obdobných hodnot, jako objemová hmotnost referenční receptury (2260 kg/m<sup>3</sup>). Obecně lze říci, že s rostoucím množstvím příměsi mírně klesá hodnota objemové hmotnosti. Nejnižší objemové hmotnosti dosahují záměsi MV 35 a MV 50 a to 2220 kg/m<sup>3</sup>. Jediná záměs, která přesahuje objemovou hmotnost referenční malty je záměs SD 25, která dosahuje hodnoty 2270 kg/m<sup>3</sup>.



Graf 8: Pevnost v tlaku cementových malt - Mikromletý vápenc

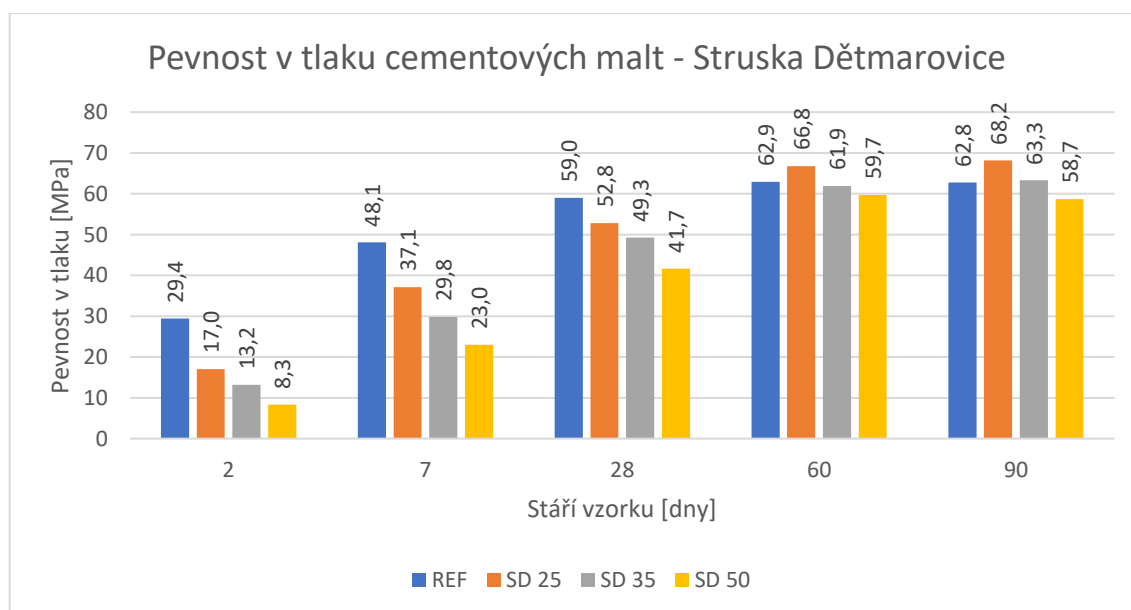
Pevnost v tlaku cementových malt s mikromletým vápencem se snižovala s přibývajícím množstvím příměsi ve vzorcích. Po 2 dnech zrání pevnosti v tlaku nemají nijak zvláště vysoké hodnoty, oproti tomu vzorky, které se zkoušely ve stáří 7 dní své pevnosti oproti pevnostem dvoudenním v záměsích MV 35 a MV 50 zdvojnásobily. U všech záměs

s příměsí mikromletého vápence dochází po 28 dnech pouze k pozvolnému nárůstu pevností. U záměsí MV 25 a MV 50 můžeme po 90 dnech oproti pevnostem po 60 dnech sledovat mírné snížení pevnosti v tlaku. Nejlepších pevností dosahovala záměs MV 25, po 60 dnech dosahovala 77 % pevnosti referenční záměsi.



**Graf 9: Pevnost v tlaku cementových malt - Popílek Dětmárovice**

Opět platí, že s přibývajícím množstvím popílku klesá pevnost v tlaku. U záměsí s popílkem můžeme sledovat, že s přibývajícím stářím vzorků se pozvolně zvyšuje i pevnost v tlaku. Po 90 dnech zrání dosahuje záměs PD 25 95% pevnosti referenční záměsi. Oproti mikromletému vápenci dosahuje pevnost v tlaku malt s popílkem výrazně lepších hodnot.



**Graf 10: Pevnost v tlaku cementových malt - Struska Dětmárovice**

Nejvyššího nárůstu pevnosti malt v tlaku u záměsí se struskou Dětmárovice si můžeme povšimnout do stáří 60 dní, poté už pevnosti v tlaku rostou velmi pomalu. Ve stáří 60 dní dosahuje záměs SD 25 106% pevnosti referenční malty. Po 90 dnech překonává pevnost referenční malty kromě SD 25 i SD 35. I u záměsí SD 50 si můžeme všimnout drobného snížení pevností v tlaku po 90 dnech oproti 60denním pevnostem. Strusku Dětmárovice můžeme označit jako nejlépe fungující příměs (z těch, které byly v BP zkoušeny), co se pevnosti v tlaku týče. I zde platí, že s rostoucím množstvím příměsí pevnost v tlaku klesá, ale rozdíly oproti mikromletému vápenci a popílku Dětmárovice nejsou tak výrazné.

### 13.2.2. Index účinnosti

Index účinnosti se vypočítá dle vzorce:

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

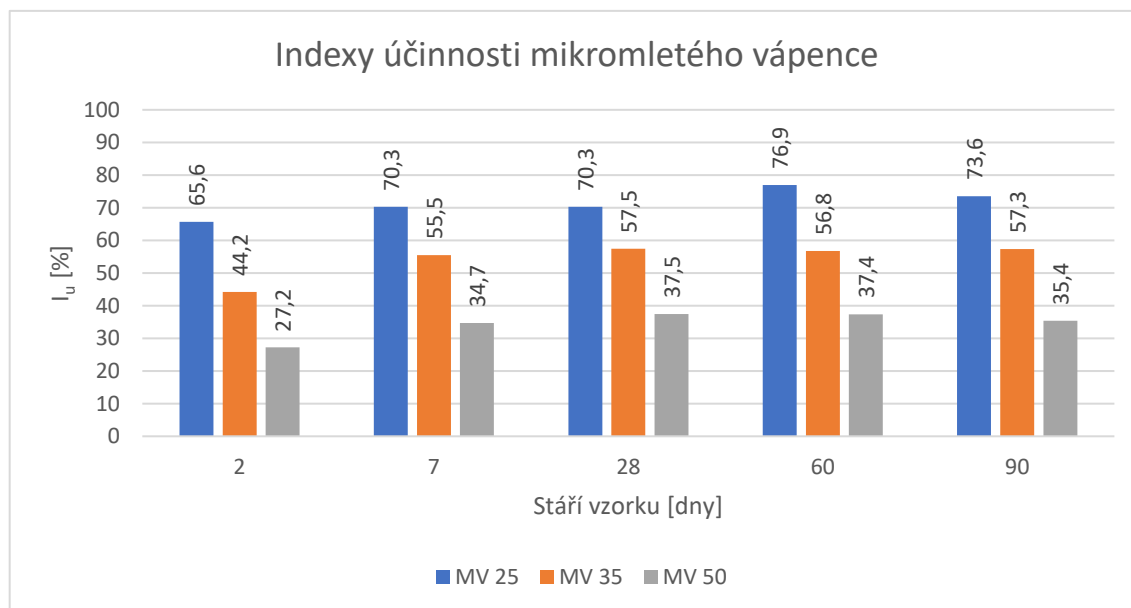
$I_u$  ... index účinnosti [%]

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

$f_{c,ref}$  ... pevnost v tlaku referenční malty (bez příměsí) [MPa]

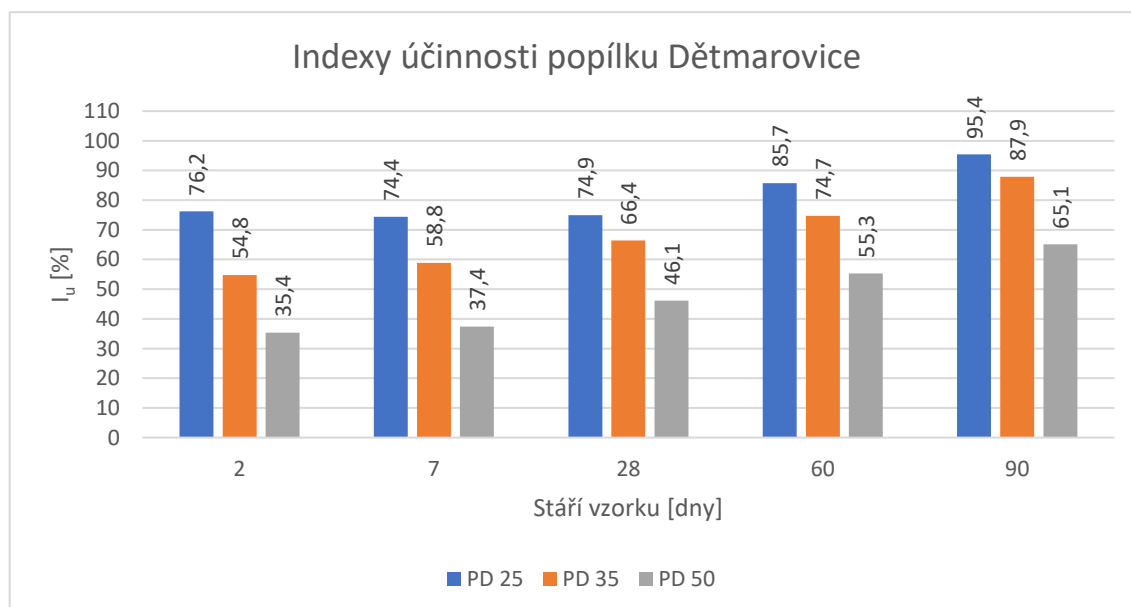
Tabulka 13: Indexy účinnosti malt s přidavkem příměsí

Receptury malt	Náhrada cementu [%]	$I_u$ [%]				
		Stáří vzorku [dny]				
		2	7	28	60	90
MV	25	65,6	70,3	70,3	76,9	73,6
	35	44,2	55,5	57,5	56,8	57,3
	50	27,2	34,7	37,5	37,4	35,4
PD	25	76,2	74,4	74,9	85,7	95,4
	35	54,8	58,8	66,4	74,7	87,9
	50	35,4	37,4	46,1	55,3	65,1
SD	25	57,8	77,1	89,5	106,2	108,6
	35	44,9	62,0	83,6	98,4	100,8
	50	28,2	47,8	70,7	94,9	93,5



**Graf 11: Indexy účinnosti pro mikromletý vápenec**

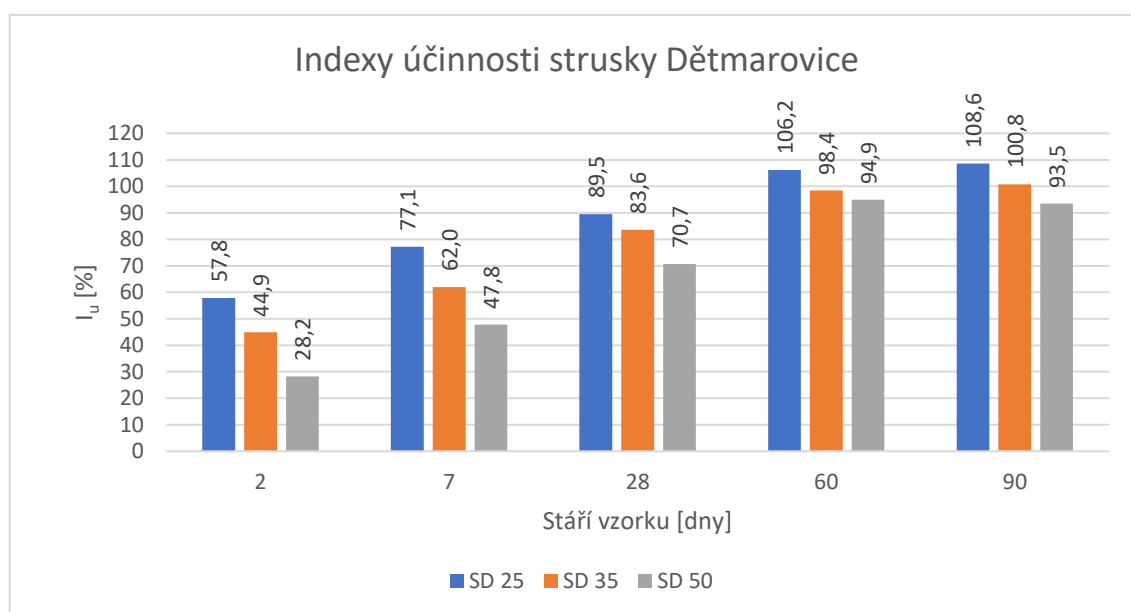
Nejvyššího indexu účinnosti dosáhl mikromletý vápenec při nejnižší, tj. 25% náhradě cementu. S rostoucím množstvím příměsi klesal index účinnosti. Naopak s přibývajícím stářím vzorku mírně rostl i index účinnosti (ve stáří 60 a 90 dnů už tato závislost u všech vzorků neplatí). Nejvyššího indexu účinnosti dosáhl MV 25 a to po 60 dnech, index účinnosti má hodnotu 76,9 %. Pro mikromletý vápenec nejsou uvedeny normativní požadavky pro index účinnosti.



**Graf 12: Indexy účinnosti pro popílek Dětmárovice**

U popílku Dětmárovice sledujeme stejný trend vývoje indexu účinnosti jako u mikromletého vápence, tj. s přibývajícím množstvím příměsi index účinnosti klesá, naopak s přibývajícím stářím vzorku index účinnosti roste. Při stáří 2 dní se index účinnosti PD 25 a PD 35 liší

zhruba o 20 %, index účinnosti u PD 25 a PD 50 po 2 dnech se liší dokonce o 40 %. S přibývajícím stářím se snižuje i rozdíl mezi jednotlivými záměsemi. Například PD 25 (95,4 %) a PD 35 (87,9 %) po 90 dnech vykazují rozdíl indexů účinnosti pouze 7,5 %. Normativní požadavek na index účinnosti pro 25% náhradu cementu příměsí po 28 dnech má vykazovat hodnotu nejméně 75 %, PD 25 dosahuje po 28 dnech hodnoty 74,9 %, tudíž požadavek nespĺňuje. Naopak normativní požadavek pro index účinnosti pro 25% náhradu cementu příměsí ve stáří 90 dní musí být minimálně 85 %, vzorek PD 25 má po 90 dnech hodnotu 95,4 %. Normativní požadavek po 90 dnech zrání by dokonce splňoval i PD 35, který má hodnotu 87,9 %.



**Graf 13: Indexy účinnosti pro strusku Dětmárovice**

I u strusky Dětmárovice je stejný trend vývoje indexů účinnosti. U strusky je index účinnosti po 2 dnech nejnižší ze všech příměsí. Naopak po 90 dnech zrání jsou indexy účinnosti ze všech tří sledovaných příměsí jednoznačně nejvyšší. U strusky jsou také rozdíly indexů účinnosti vyšší při kratší době zrání (např. 2 dny), s delší dobou zrání jsou rozdíly mezi jednotlivými záměsemi se struskou nižší. Po 90 dnech hodnotu indexu účinnosti 100 % překročila SD 25 i SD 35. Normativní požadavek na index účinnosti pro 50% náhradu cementu struskou po 7 dnech má vykazovat hodnotu nejméně 45 %, SD 50 po 7 dnech dosahuje hodnoty 47,8 %, tudíž normativní požadavek splňuje. Normativní požadavek pro index účinnosti pro 50% náhradu cementu struskou ve stáří 28 dní musí být minimálně 70 %, vzorek SD 50 dosahuje po 28 dnech indexu účinnosti 70,7 %, tudíž i zde je normativní požadavek splněn.

### 13.2.3. Stanovení funkce pevnosti

Díky výsledkům pevností zatvrdlých cementových malt v tlaku byly vytvořeny grafy závislosti pevnosti v tlaku na stáří. Pomocí aproximace byla prof. RNDr. Ing. Stanislavem Šťastníkem, CSc. Ph.D. vytvořena obecná rovnice pro stanovení pevnosti v tlaku, která je závislá na množství příměsi a na stáří vzorku.

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

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

$p$  ... množství příměsi [-]

$\tau$  ... stáří zatvrdlé malty [dny]

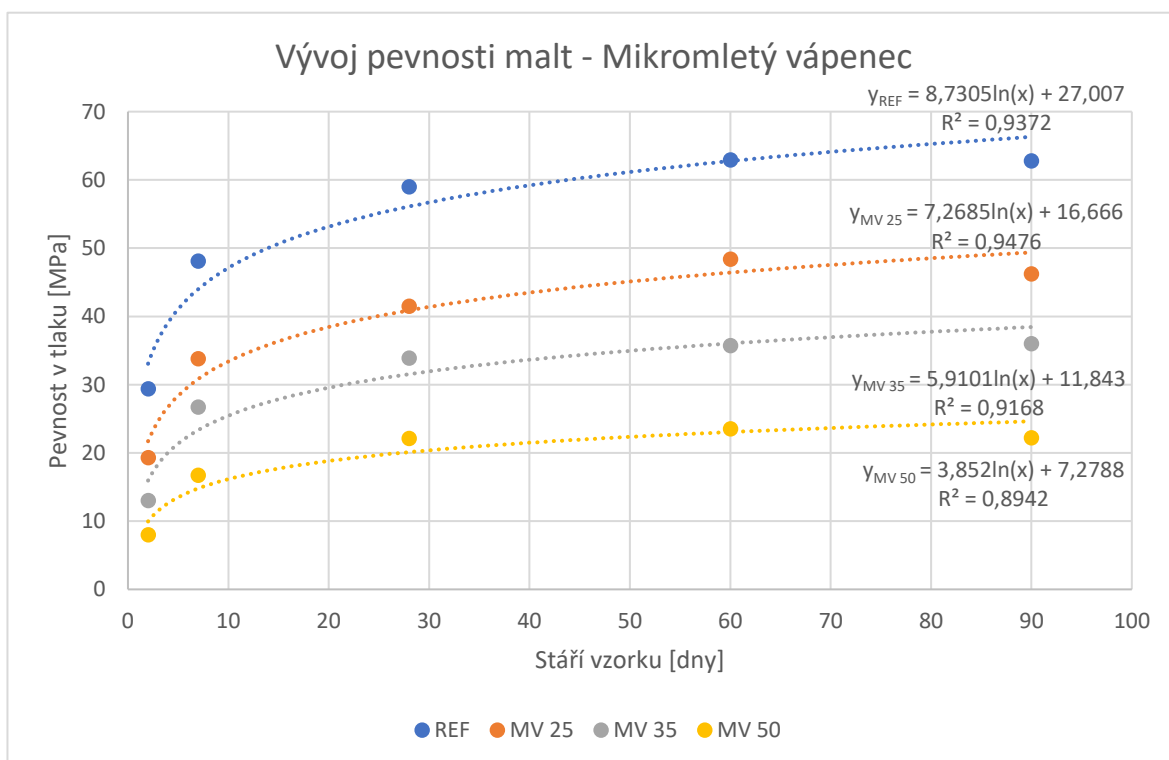
$a, b, c, d, e, f, g$  ... empiricky stanovené koeficienty [-]

Po dosazení pevnosti v tlaku a stáří malty lze z rovnice zjistit množství příměsi, která se nachází v pojivové složce a díky které bude mít malta v daném stáří požadovanou pevnost. Množství příměsi je nutné vynásobit 100, aby bylo dosaženo procentuálního zastoupení v pojivové složce.

#### Mikromletý vápenec

Rovnice pevnosti v tlaku závislá na stáří vzorku a množství příměsi pro mikromletý vápenec:

$$f_c = 26,34 - 41,95 \cdot p - 17,34 \cdot p^2 + 8,998 \cdot \ln(\tau) - 0,4542 \cdot p \cdot \tau - 0,2587 \cdot p^2 \cdot \tau + 0,001534 \cdot p \cdot \tau^2$$



Graf 14: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro mikromletý vápenec

Po dosazení stáří a množství příměsi do výše uvedené rovnice, lze vypočítat pevnosti v tlaku, kterých by měl vzorek dosáhnout.

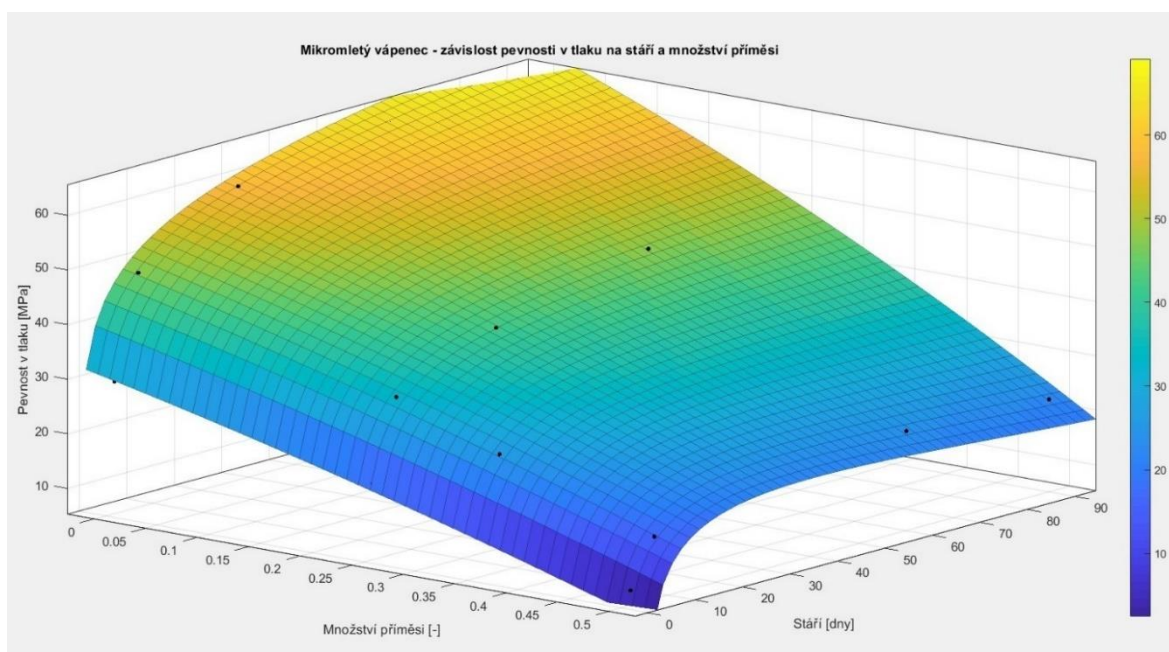
Tabulka 14: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro mikromletý vápenc

MV	p	Náhrada cementu [%]	Pevnost v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
0	0	32,6	43,8	56,3	63,2	66,8	
0,25	25	20,7	31,4	41,4	45,2	46,7	
0,35	35	15,4	25,7	34,6	36,9	37,2	
0,5	50	6,7	16,5	23,4	23,1	21,5	

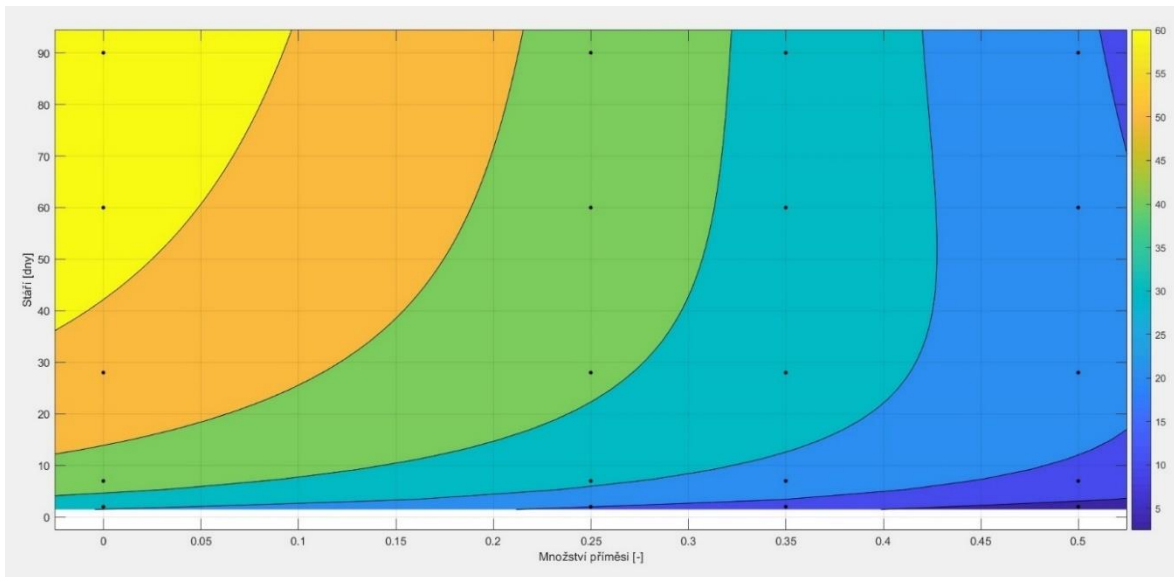
V následující tabulce jsou uvedeny odchylky vypočítaných a skutečných pevností. Pokud je hodnota v tabulce kladná, znamená to, že vypočítaná pevnost v tlaku pomocí rovnice je vyšší, než pevnost zkoušená na vzorcích.

Tabulka 15: Odchylky vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro mikromletý vápenc

MV	p	Náhrada cementu [%]	Odchylka pevnosti v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
0	0	3,2	-4,3	-2,7	0,3	4,0	
0,25	25	1,4	-2,4	-0,1	-3,2	0,5	
0,35	35	2,4	-1,0	0,7	1,2	1,2	
0,5	50	-1,3	-0,2	1,3	-0,4	-0,7	



Obrázek 5: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenc

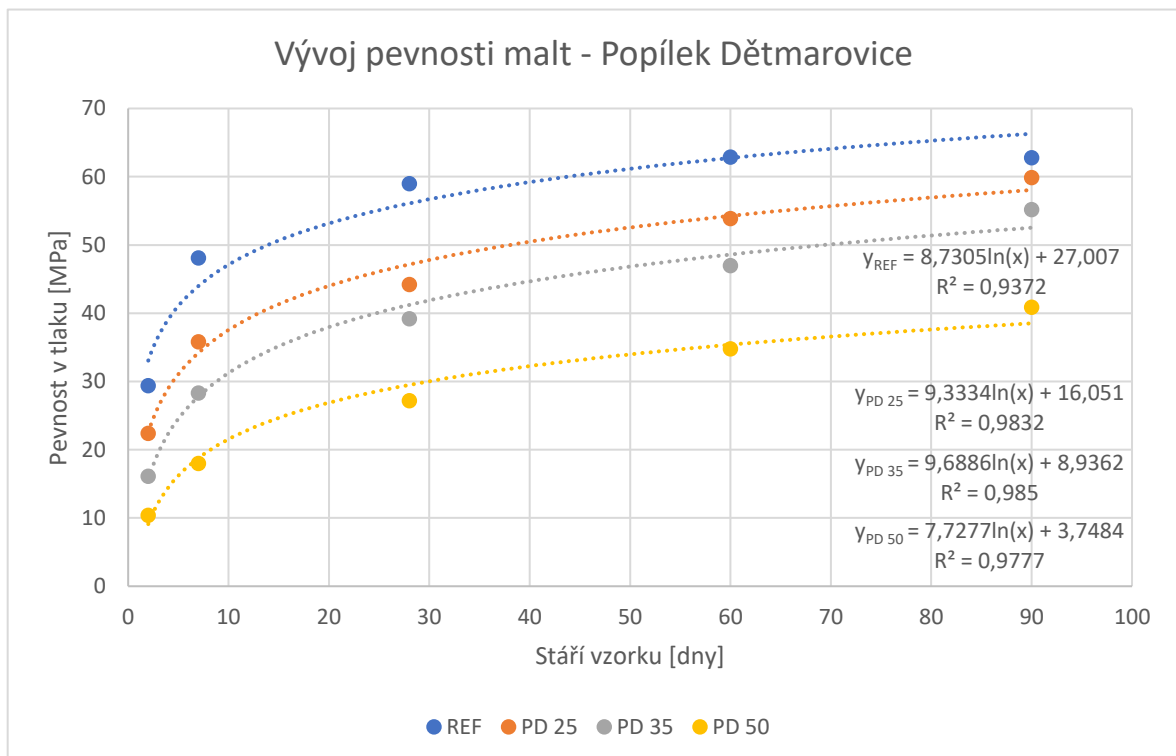


Obrázek 6: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenc

### Popílek Dětmárovice

Rovnice pevnosti v tlaku závislá na stáří vzorku a množství příměsi pro popílek Dětmárovice:

$$f_c = 27,12 - 34,32 \cdot p - 26,39 \cdot p^2 + 8,697 \cdot \ln(\tau) + 0,01552 \cdot p \cdot \tau - 0,9184 \cdot p^2 \cdot \tau + 0,00465 \cdot p \cdot \tau^2$$



Graf 15: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro popílek Dětmárovice

Po dosazení stáří a množství příměsi do výše uvedené rovnice, lze vypočítat pevnosti v tlaku, kterých by měl vzorek dosáhnout.

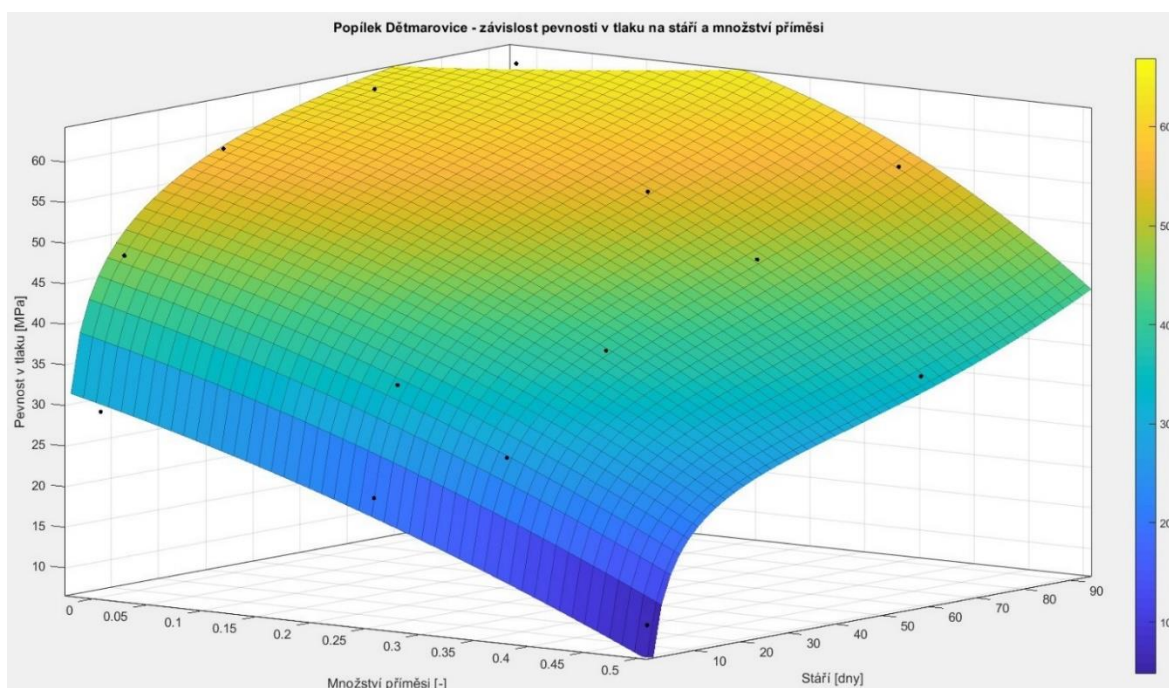
Tabulka 16: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro popílek Dětmorovice

PD	p	Náhrada cementu [%]	Pevnost v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
	0	0	33,1	44,0	56,1	62,7	66,3
	0,25	25	22,8	33,5	45,3	53,5	60,6
	0,35	35	17,7	28,1	39,1	46,9	54,5
	0,5	50	9,0	18,8	28,0	34,0	41,4

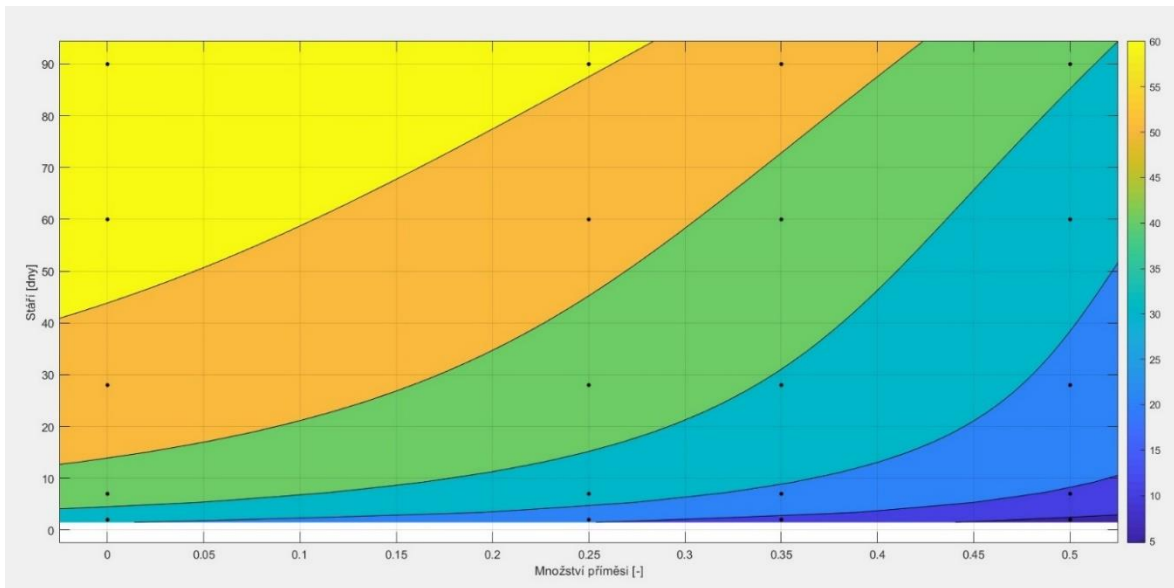
V následující tabulce jsou uvedeny odchylky vypočítaných a skutečných pevností. Pokud je hodnota v tabulce kladná, znamená to, že vypočítaná pevnost v tlaku pomocí rovnice je vyšší, než pevnost zkoušená na vzorcích.

Tabulka 17: Odchylky vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro popílek Dětmorovice

PD	p	Náhrada cementu [%]	Odchylka pevnosti v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
	0	0	3,7	-4,1	-2,9	-0,2	3,5
	0,25	25	0,4	-2,3	1,1	-0,4	0,7
	0,35	35	1,6	-0,2	-0,1	-0,1	-0,7
	0,5	50	-1,4	0,8	0,8	-0,8	0,5



Obrázek 7: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Dětmorovice

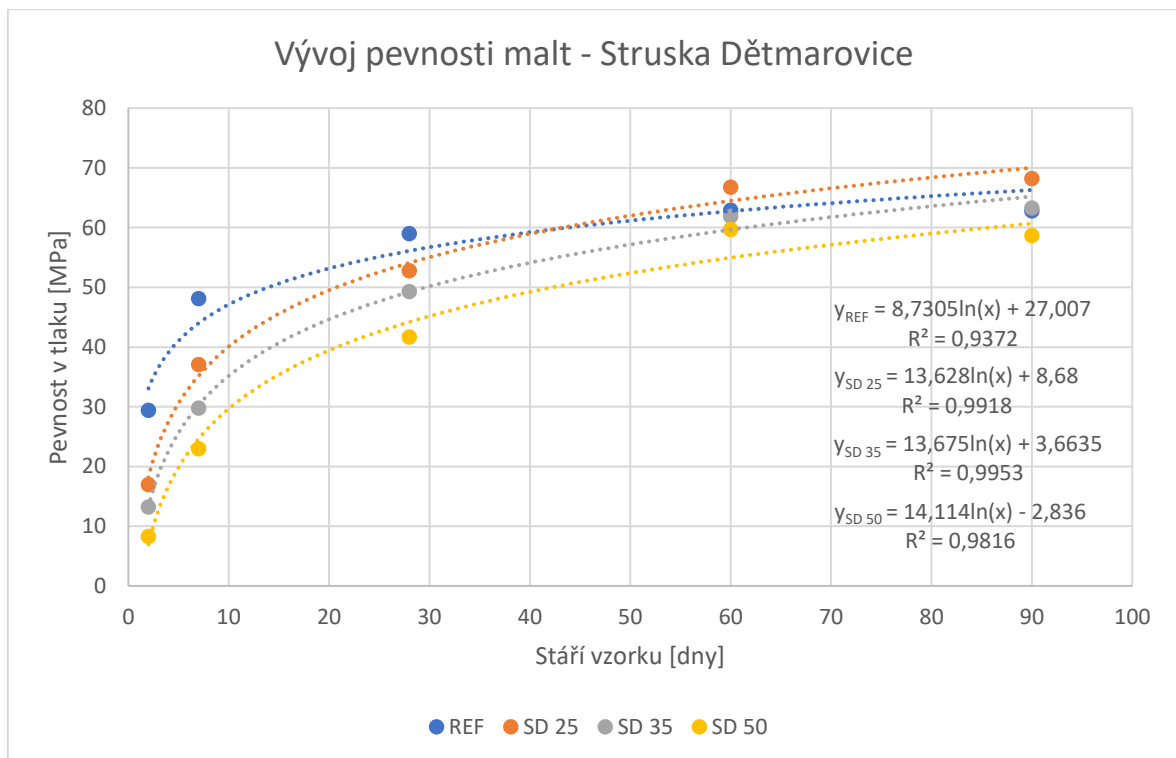


Obrázek 8: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Dětmarovice

### Struska Dětmarovice

Rovnice pevnosti v tlaku závislá na stáří vzorku a množství příměsi pro strusku Dětmarovice:

$$f_c = 25,95 - 50,66 \cdot p - 3,983 \cdot p^2 + 9,128 \cdot \ln(\tau) + 1,799 \cdot p \cdot \tau - 0,9026 \cdot p^2 \cdot \tau - 0,0107 \cdot p \cdot \tau^2$$



Graf 16: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro strusku Dětmarovice

Po dosazení stáří a množství příměsi do výše uvedené rovnice, lze vypočítat pevnosti v tlaku, kterých by měl vzorek dosáhnout.

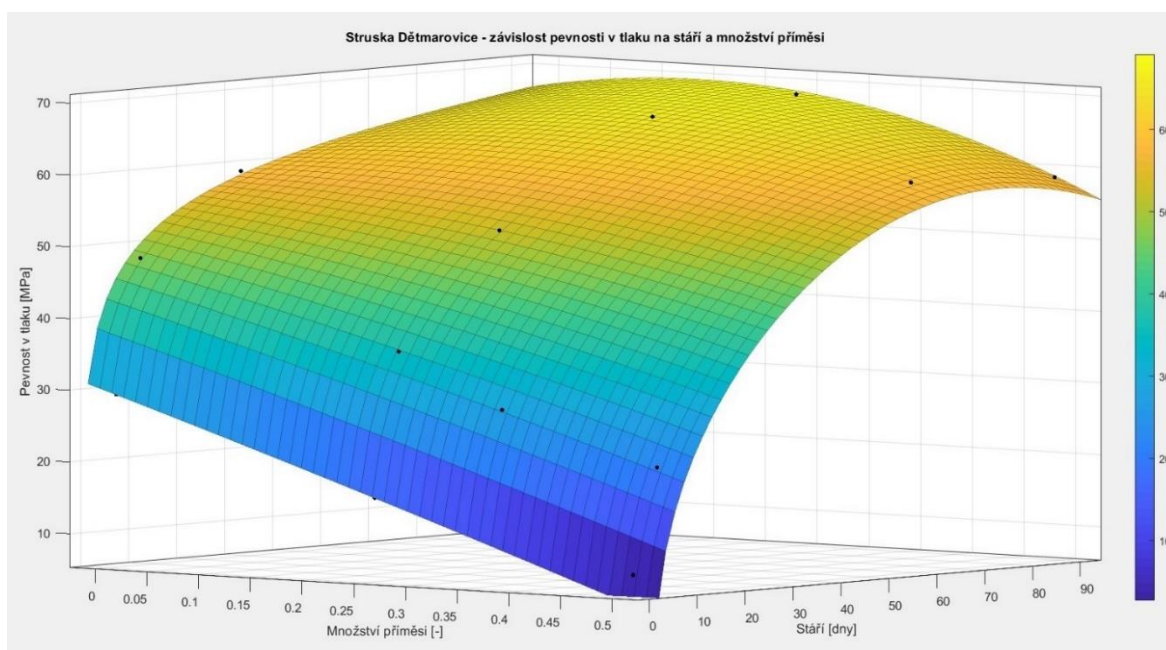
Tabulka 18: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro struku Dětmárovice

SD	p	Náhrada cementu [%]	Pevnost v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
0	0	32,3	43,7	56,4	63,3	67,0	
0,25	25	20,1	33,4	52,4	64,4	67,9	
0,35	35	15,1	28,9	49,8	62,8	65,2	
0,5	50	7,3	21,8	44,7	58,2	58,1	

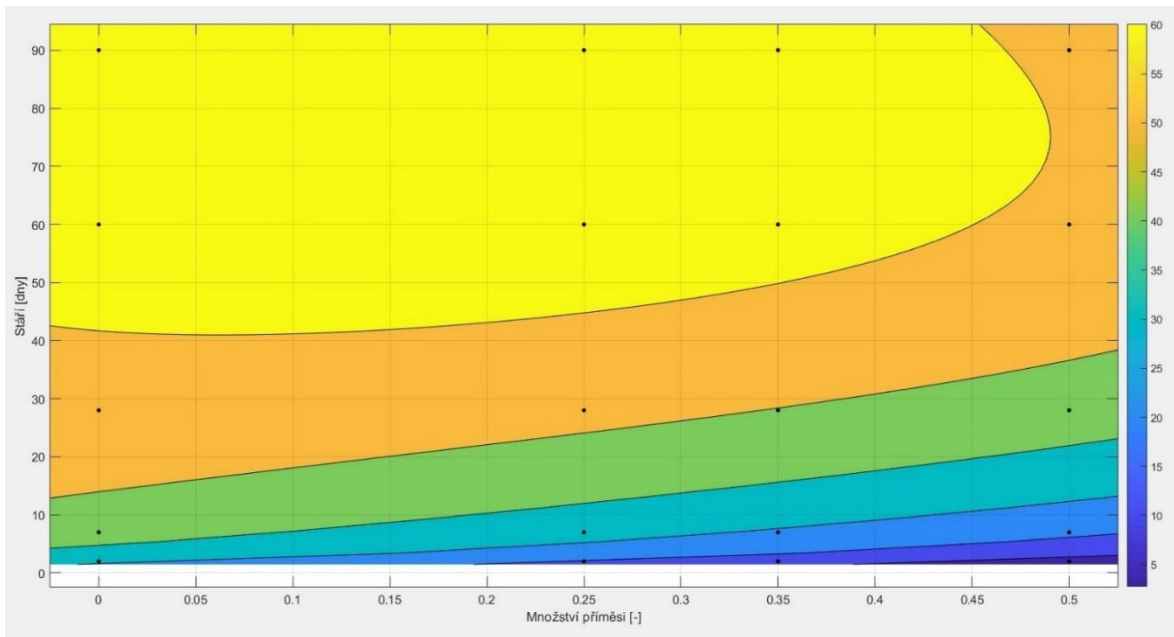
V následující tabulce jsou uvedeny odchylky vypočítaných a skutečných pevností. Pokud je hodnota v tabulce kladná, znamená to, že vypočítaná pevnost v tlaku pomocí rovnice je vyšší, než pevnost zkoušená na vzorcích.

Tabulka 19: Odchylky vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro struku Dětmárovice

SD	p	Náhrada cementu [%]	Odchylka pevnosti v tlaku [MPa]				
			Stáří vzorku [dny]				
			2	7	28	60	90
0	0	2,9	-4,4	-2,6	0,4	4,2	
0,25	25	3,1	-3,7	-0,4	-2,4	-0,3	
0,35	35	1,9	-0,9	0,5	0,9	1,9	
0,5	50	-1,0	-1,2	3,0	-1,5	-0,6	



Obrázek 9: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro struku Dětmárovice



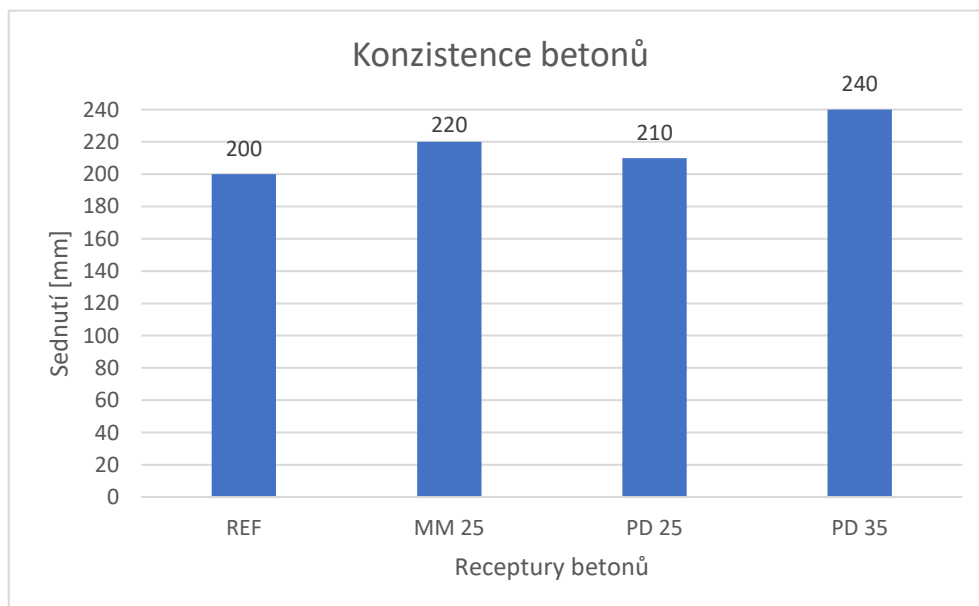
Obrázek 10: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro strusku Dětmorovice

### 13.3. Výsledky zkoušek čerstvých betonů

#### 13.3.1. Konzistence

Tabulka 20: Konzistence čerstvých betonů

Receptury betonů	Sednutí [mm]
REF	200
MM 25	220
PD 25	210
PD 35	240



Graf 17: Konzistence betonů

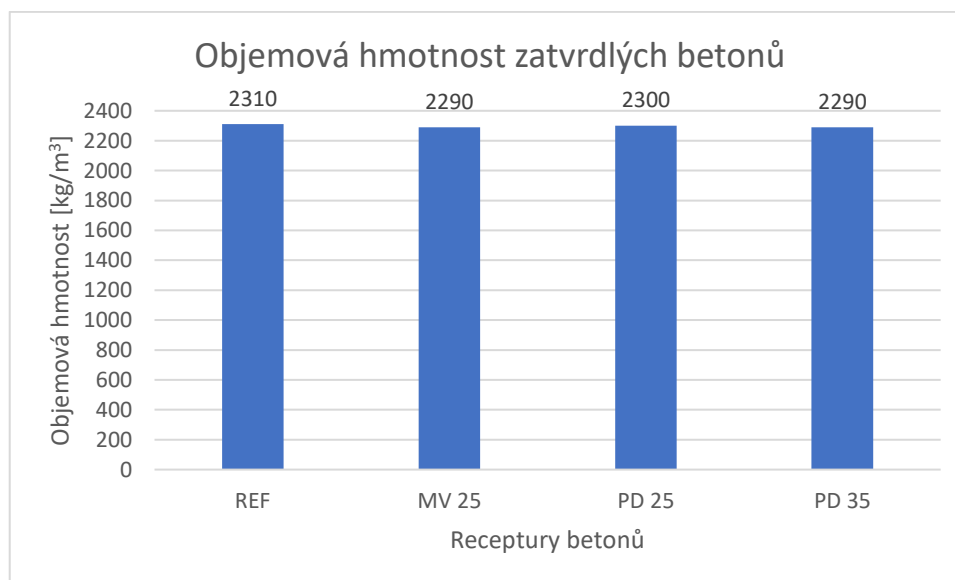
Všechny tři záměsi betonů s příměsí mají oproti referenčnímu betonu větší hodnotu sednutí. Do všech betonových záměsí bylo dávkováno stejné množství vody. PD 25 má hodnotu sednutí větší pouze o 10 mm, naopak největší rozdíl mezi referenčním betonem a betonovou záměsí s přidavkem příměsí vykazuje PD 35, jehož hodnota sednutí je o 40 mm větší. MM 25 se od konzistence referenčního betonu liší o 20 mm.

## 13.4. Výsledky zkoušek zatvrdlých betonů

### 13.4.1. Objemová hmotnost

Tabulka 21: Objemová hmotnost zatvrdlých betonů

Receptury betonů	Náhrada cementu [%]	Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]
REF	0	2310
MV	25	2290
PD	25	2300
	35	2290



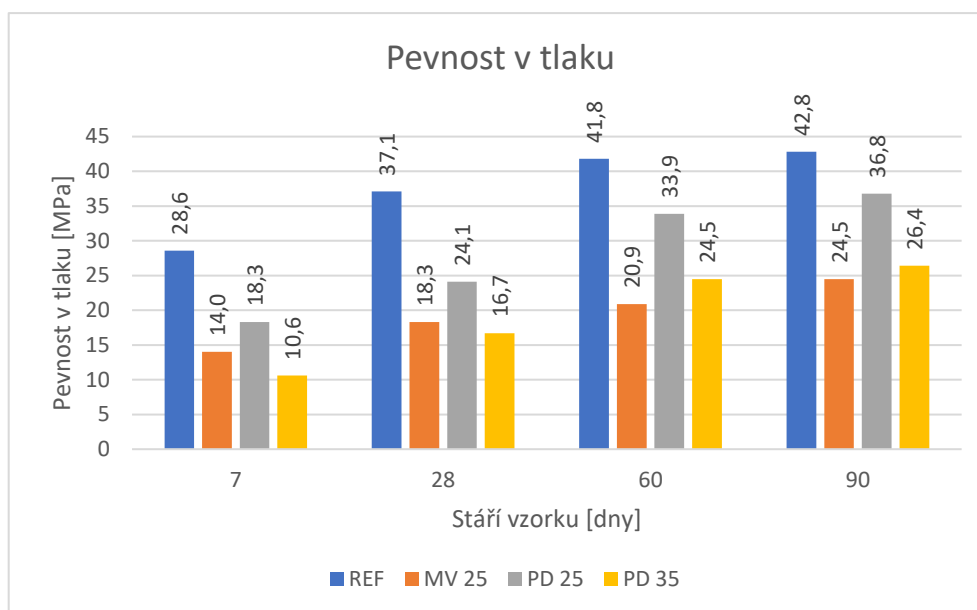
Graf 18: Objemová hmotnost zatvrdlých betonů

U všech betonových záměsí se objemová hmotnost zatvrdlých betonů pohybuje kolem podobných hodnot, referenční beton má objemovou hmotnost 2310 kg/m<sup>3</sup>. Nejnižší objemové hmotnosti dosáhly betony MV 25 a PD 35, které mají objemovou hmotnost 2290 kg/m<sup>3</sup>. Jedná se tedy opravdu o minimální rozdíly.

### 13.4.2. Pevnost v tlaku

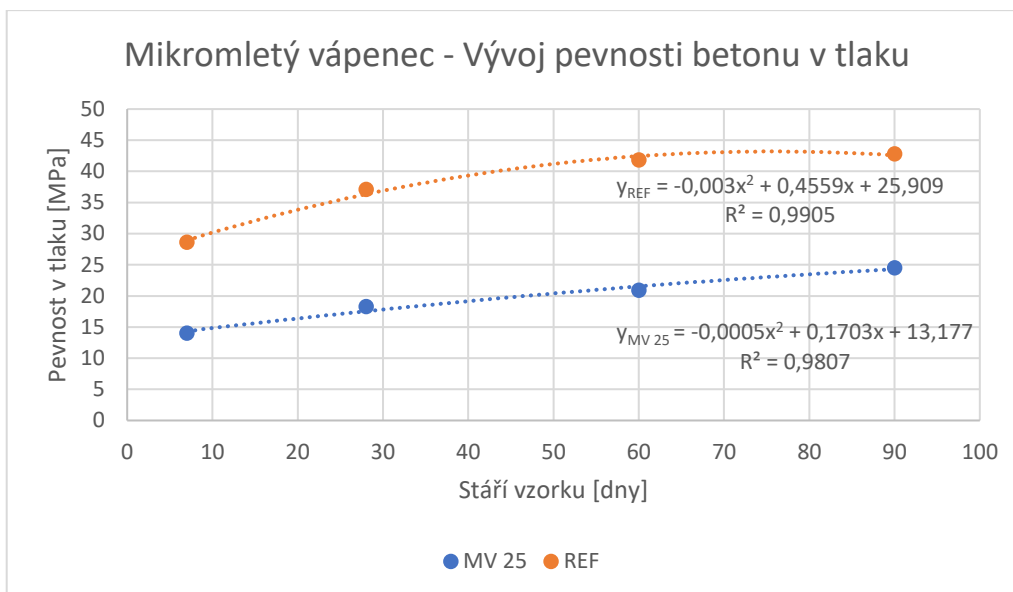
Tabulka 22: Pevnost v tlaku zatvrdlých betonů

Receptury betonů	Náhrada cementu [%]	Pevnost v tlaku [MPa]			
		Stáří vzorku [dny]			
		7	28	60	90
REF	0	28,6	37,1	41,8	42,8
MV	25	14,0	18,3	20,9	24,5
PD	25	18,3	24,1	33,9	36,8
	35	10,6	16,7	24,5	26,4



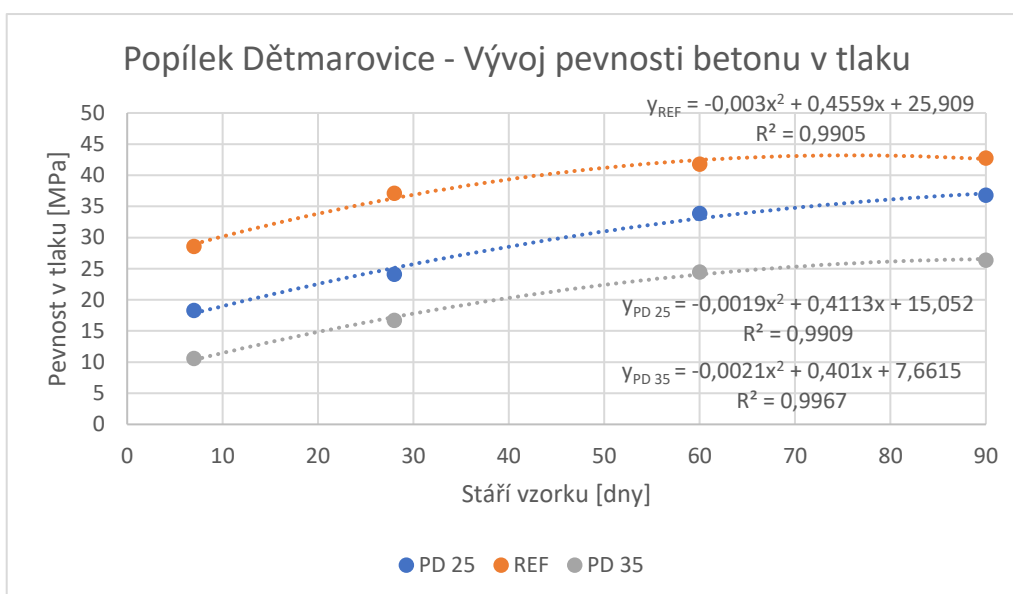
Graf 19: Pevnost betonu v tlaku

Nejvyšších pevností v tlaku dosahovala referenční záměs a poté PD 25. Po 7 i 28 dnech dosahovala záměs PD 25 asi 65% pevnosti referenční záměsi. Po 60 dnech už to bylo 81 % a po 90 dnech dokonce 86 %. Záměs MV 25 vykazuje obdobné nabývání pevností v tlaku jako PD 35.



**Graf 20: Závislost pevnosti v tlaku na stáří vzorku u mikromletého vápence**

MV 25 ve stáří 7, 28 i 60 dní dosahoval oproti REF pouze 50% pevnosti v tlaku. Po 90 dnech dosahoval MV 25 57% pevnosti v tlaku REF.



**Graf 21: Závislost pevnosti v tlaku na stáří vzorku u popílku Dětmárovice**

Obecně lze říci, že u betonů s popínkem se s rostoucím stářím vzorku zvyšovala i procentuální pevnost v tlaku vůči referenční záměsi. PD 25 vykazoval po 7 dnech 64 % pevnosti referenční záměsi, PD 35 ve stejném stáří dosahoval pouze 37 %. Po 28 dnech byla procentuální pevnost vůči REF u vzorku PD 25 opět 64 %, naopak u PD 35 se zvýšila na 45 %. Po 60 dnech se pevnost v tlaku u PD 25 zvýšila na 81 %, u PD 35 vzrostla procentuální pevnost v tlaku vůči REF na 59 %. Po 90 dnech zrání dosahovaly pevnosti v tlaku u PD 25 86 % pevnosti referenčního betonu, PD 35 dosahoval 62 % pevnosti referenčního betonu.

### 13.5. Teoretické určení $k$ -hodnoty

Pro teoretické vyhodnocení  $k$ -hodnot byly použity výsledky konzistencí a naměřené pevnosti v tlaku malt, u kterých byla část cementu (25, 35 a 50 %) nahrazena danou příměsí.  $k$ -hodnotu je vhodné stanovovat pro různou náhradu cementu příměsí a dobu zrání vzorku zvlášť.

Tabulka 23: Teoreticky určené  $k$ -hodnoty pro mikromletý vápenec

Receptury malt	$k [-]$		
	Stáří vzorku [dny]		
	7	28	90
MV 25	0,60	0,65	0,65
MV 35	0,45	0,45	0,50
MV 50	0,25	0,25	0,25

Tabulka 24: Teoreticky určené  $k$ -hodnoty pro popílek Dětmarovice

Receptury malt	$k [-]$		
	Stáří vzorku [dny]		
	7	28	90
PD 25	0,65	0,75	0,80
PD 35	0,50	0,60	0,70
PD 50	0,30	0,40	0,50

Tabulka 25: Teoreticky určené  $k$ -hodnoty pro strusku Dětmarovice

Receptury malt	$k [-]$		
	Stáří vzorku [dny]		
	7	28	90
SD 25	0,70	0,85	0,95
SD 35	0,55	0,75	0,85
SD 50	0,40	0,65	0,80

Obecně lze říci, že s rostoucí náhradou cementu příměsí dochází ke snižování  $k$ -hodnoty. Naopak s přibývajícím dobou zrání vzorků můžeme u popílku Dětmarovice i strusky Dětmarovice sledovat zvyšující se  $k$ -hodnotu. Pouze u mikromletého vápence není při delší době zrání vzorků pozorováno zlepšení  $k$ -hodnoty. Ze tří zkoušených příměsí dosahuje nejlepších výsledků struska Dětmarovice, která při 25% náhradě cementu po 90 dnech vykazuje  $k$ -hodnotu až 0,95.

## 13.6. Ekonomické přínosy náhrady části cementu příměsí

Tabulka 26: Ceny složek betonů

Složky betonu	Cena [Kč/t]
CEM I 42,5 R	3800
Voda	100
DTK 0 - 4 mm	350
HTK 4 - 8 mm	400
HDK 8 - 16 mm	410
Mikromletý vápenec	700
Popílek Dětmárovice	750

Tabulka 27: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých betonových záměsí

Složky betonu	REF		PD 25		PD 35		MV 25	
	Receptura [kg/m <sup>3</sup> ]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Receptura [kg/m <sup>3</sup> ]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Receptura [kg/m <sup>3</sup> ]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]	Receptura [kg/m <sup>3</sup> ]	Cena [Kč/m <sup>3</sup> ]
CEM I 42,5 R	350	1330	233	885	166	631	226	859
Voda	235	24	235	24	235	24	235	24
DTK 0 - 4 mm	872	305	872	305	872	305	872	305
HTK 4 - 8 mm	246	98	246	98	246	98	246	98
HDK 8 - 16 mm	662	271	662	271	662	271	662	271
Mikromletý vápenec	0	0	0	0	0	0	124	87
Popílek Dětmárovice	0	0	117	88	184	138	0	0
<b>Celková cena [Kč/m<sup>3</sup>]</b>		<b>2028</b>		<b>1671</b>		<b>1467</b>		<b>1644</b>

Dle vyhodnocení tabulky je jasné, že s rostoucím množstvím příměsí klesá cena betonu. U betonové záměsí PD 25, kde je 25 % cementu nahrazeno popílkem Dětmárovice vidíme, že cena se oproti referenčnímu betonu sníží o 18 %, při náhradě 35 % cementu popílkem Dětmárovice dochází ke snížení ceny betonu dokonce o 28 %. Záměs MV 25 je oproti referenční betonu levnější o 19 %. Jedná se tedy o velmi ekonomicky výhodné řešení, bohužel betony s příměsí nedosahují dostatečných pevností v tlaku.

Ceny jednotlivých složek betonu poskytla Skanska a.s.

# ZÁVĚR

Cílem teoretické části bylo shrnutí dosavadních poznatků o aktivních příměsích, které lze využívat jako částečné náhrady cementu v betonu. Byl shrnut především vliv aktivních příměsí na vlastnosti čerstvého a zatvrdlého betonu. Dále pak byla studována koncepce  $k$ -hodnoty.

V první kapitole bakalářské práce byly shrnuty obecné poznatky o aktivních příměsích a jejich rozdělení dle různých kritérií.

Další kapitola byla věnována první příměsi, mikromletému vápenci. V úvodu kapitoly byl obecně popsán vápenec, následoval popis mikromletého vápence jako příměsí do betonu, v další části byly popsány mechanismy působení mikromletého vápence v betonu, které dokazují, že mikromletý vápenec můžeme považovat za aktivní příměs. V poslední části této kapitoly byl popsán vliv mikromletého vápence na vlastnosti čerstvého betonu (zpracovatelnost) a vlastnosti zatvrdlého betonu (pevnost v tlaku a trvanlivost). Různé studie ohledně působení mikromletého vápence jako aktivní příměsí jsou občas protichůdné, proto je nutné mikromletý vápenec a jeho působení jako aktivní příměsí zkoumat i nadále.

V další kapitole byla popsána druhá aktivní příměs, popílek. Opět byl uveden obecný popis popílku, následně byla popsána výroba vysokoteplotního a nízkoteplotního popílku. Bylo uvedeno jeho chemické a mineralogické složení, a jeho dělení. V této kapitole byly také popsány fyzikální vlastnosti popílku, jeho normativní požadavky, které uvádí norma ČSN EN 450-1. V poslední části této kapitoly byly shrnuty poznatky o vlastnostech betonu s popílkem. V čerstvém betonu byla popsána především zpracovatelnost, v zatvrdlém betonu byly popsány následující vlastnosti: pevnost v tlaku, trvanlivost a vznik trhlin.

Třetí popisovanou aktivní příměsí byla vysokopecní struska. Jako u výše uvedených příměsí byla struktura kapitoly následující: obecný popis strusky, její výroba, její chemické a mineralogické složení, fyzikální vlastnosti a normativní požadavky, které uvádí norma ČSN EN 15167-1. Poslední část kapitoly se věnovala vlastnostem betonu s přídavkem vysokopecní strusky (zpracovatelnost, pevnost v tlaku).

Pátá kapitola se věnovala portlandskému směsnému cementu. Jako první byla uvedena definice cementu, následovalo dělení portlandských směsných cementů, poté byl uveden vliv aktivních příměsí na vlastnosti portlandských směsných cementů a betonů z nich vyrobených.

Šestá kapitola byla věnována indexu účinnosti. Byla uvedena definice indexu účinnosti, dále byly uvedeny normativní požadavky na index účinnosti pro popílek (dle ČSN EN 450-1)

a pro vysokopecní strusku (ČSN EN 15167-1). Normativní požadavek indexu účinnosti pro mikromletý vápenec není v žádné z českých technických norem uveden.

Závěr teoretické části byl věnován koncepci  $k$ -hodnoty. Byl zde uveden její princip, metoda výpočtu  $k$ -hodnoty, doporučení pro její používání. Koncepce  $k$ -hodnoty byla popsána i dle ČSN EN 206+A2, kde byly uvedeny konkrétní hodnoty  $k$ -hodnoty pro popílek, granulovanou vysokopecní strusku a křemičitý úlet třídy 1. Pro mikromletý vápenec  $k$ -hodnota opět není uvedena. Dále bylo popsáno využití  $k$ -hodnoty při navrhování betonů. V závěru bylo uvedeno pohlížení na koncepci  $k$ -hodnoty, možnosti jejího předefinování a souvislosti  $k$ -hodnoty a indexu účinnosti.

Cílem praktické části bylo posouzení vlivu příměsí na konzistence čerstvých malt a betonů. Dále bylo cílem stanovit indexy účinnosti pro mikromletý vápenec, popílek a vysokopecní strusku a pokusit se určit  $k$ -hodnoty pro dané příměsi.

Hlavním zkoumaným parametrem byla konzistence čerstvých malt. U mikromletého vápence s rostoucím množstvím náhrady cementu příměsí dochází ke zvyšování konzistence čerstvé malty. Křivka konzistence mikromletého vápence dle provedených zkoušek neprotíná křivku konzistence referenční záměsi, tudíž při použití mikromletého vápence, jako částečné náhrady cementu, a zachování vodního součinitele nedosáhneme nikdy stejné konzistence, jakou vykazuje referenční záměs. Receptury malt obsahující popílek Dětmarovice vykazují obdobné chování, jako vykazuje mikromletý vápenec. I zde nikdy nedosáhneme stejné konzistence, jako u referenční malty. Pouze struska Dětmarovice při náhradě 40 % cementu dosáhne stejné konzistence, jakou má referenční malta. Sledování konzistence u čerstvých betonů potvrdilo trend, který vykazovaly čerstvé malty. I zde, s rostoucím množstvím příměsí, jako náhrady cementu, dochází ke zvyšování konzistence.

Hodnoty indexů účinností potvrzují trend, že s rostoucím množstvím náhrady cementu příměsí dochází ke snížení těchto hodnot. Naopak u většiny vzorků s rostoucím stářím vzorku se hodnoty indexů účinností zvyšují, avšak u mikromletého vápence dochází k poklesu indexů účinností ve stáří 90 dnů, oproti 60 dnům. U příměsí mikromletého vápence dosáhla nejvyššího indexu účinnosti záměs MV 25 po 60 dnech, index účinnosti dosahuje hodnoty 76,9 %. Pro mikromletý vápenec nejsou uvedeny normativní požadavky pro index účinnosti. U popílku Dětmarovice dosáhla nejlepšího indexu účinnosti záměs PD 25 po 90 dnech a to hodnoty 95,4 %. Normativní požadavek na index účinnosti pro 25% náhradu cementu příměsí po 28 dnech má vykazovat hodnotu nejméně 75 %, PD 25 dosahuje po 28 dnech hodnoty 74,9 %, tudíž požadavek nesplňuje. Naopak normativní požadavek pro index účinnosti pro 25% náhradu cementu příměsí ve stáří 90 dní musí být minimálně 85 %, vzorek PD 25 má po 90 dnech hodnotu 95,4 %, tento požadavek by splňovala dokonce i záměs PD 35, která má index účinnosti 87,9 %. U strusky je index

účinnosti po 2 dnech nejnižší ze všech příměsí. Naopak po 90 dnech zrání jsou indexy účinnosti ze všech tří sledovaných příměsí jednoznačně nejvyšší. Po 90 dnech hodnotu indexu účinnosti 100 % překročila SD 25 i SD 35. Normativní požadavek na index účinnosti pro 50% náhradu cementu struskou po 7 dnech má vykazovat hodnotu nejméně 45 %, SD 50 po 7 dnech dosahuje hodnoty 47,8 %, tudíž je normativní požadavek splněn. Normativní požadavek pro index účinnosti pro 50% náhradu cementu struskou ve stáří 28 dní musí být minimálně 70 %, vzorek SD 50 dosahuje po 28 dnech indexu účinnosti 70,7 %, tudíž i zde je normativní požadavek splněn.

Pro vyhodnocení  $k$ -hodnot byly použity výsledky konzistencí a pevností v tlaku malt, u kterých byla část cementu (25, 35 a 50 %) nahrazena jednou ze tří sledovaných příměsí.  $k$ -hodnotu je vhodné stanovovat pro různou náhradu cementu příměsí a dobu zrání zvlášť. Hodnoty teoreticky odvozených  $k$ -hodnot jsou v tabulkách uvedeny pro všechny tři příměsí s třemi různými náhradami cementu, a to pro stáří vzorků 7, 28 a 90 dnů. Obecně lze říci, že s rostoucí náhradou cementu příměsí dochází ke snižování  $k$ -hodnoty. Naopak s přibývajícím dobou zrání vzorků můžeme u popílku i strusky sledovat zvyšující se  $k$ -hodnotu. Tento trend nevykazuje pouze mikromletý vápenec, u kterého není při delší době zrání vzorků pozorováno zlepšení  $k$ -hodnoty.

Nezávisle na době zrání bych pro záměs MV 25 navrhla  $k=0,60$ , pro MV 35 hodnotu  $k=0,45$  a pro MV 50  $k=0,25$ .

U popílku Dětmárovce bych  $k$ -hodnotu stanovila bez ohledu na dobu zrání vzorku následovně. U záměsi PD 25 bych stanovila  $k=0,75$ , pro PD 35  $k=0,60$  a pro PD 50  $k=0,40$ . Pro beton s cementem CEM I podle ČSN EN 197-1 je povolena  $k$ -hodnota 0,4.

U příměsí strusky Dětmárovce by  $k$ -hodnoty bez ohledu na stáří vzorku byly následující: SD 25 ( $k=0,85$ ), SD 35 ( $k=0,75$ ) a SD 50 ( $k=0,65$ ). Pro beton obsahující cement CEM I podle ČSN EN 197-1 a mletou granulovanou vysokopecní strusku podle ČSN EN 15167-1 se doporučuje  $k$ -hodnota 0,6.

Výše uvedené  $k$ -hodnoty vychází pouze z mého teoretického odhadu.

Poslední částí praktické části bakalářské práce bylo posouzení ekonomického přínosu, při částečné náhradě cementu příměsí, pro vytvoření betonu. Ekonomický přínos náhrady cementu mikromletým vápencem (25 %) a popílkem (25 a 35 %) je nepopíratelný, cena popílku (především protože se jedná o VEP) je mnohonásobně příjemnější než cena cementu. Velký je také ekologický přínos, neboť při výrobě cementu uniká do ovzduší značné množství  $\text{CO}_2$  a popílek se vyrábí jako vedlejší energetický produkt, při spalování uhlí. Bohužel betony, u kterých byla část cementu nahrazena příměsí nedosahují po 28 dnech deklarovaných pevností (37 MPa). Nejblíže se k deklarované pevnosti 37 MPa po 28 dnech přiblížil beton s popílkem s náhradou cementu 25 %, dosahuje pevnosti v tlaku 24,1 MPa, což je pouze 65 % požadované pevnosti.

# SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HELA, Rudolf. PŘÍMĚSI DO BETONŮ. *Beton TKS* [online]. 2015, 2015(2), 4-10 [cit. 2022-05.-16]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2015-2-04-primesi-do-betonu/>
- [2] ŠTĚRBA, Alain. PŘÍMĚSI DŘÍVE A NYNÍ, ČÁST 1. *Beton TKS* [online]. 2011, 2011, 2011(6), 20-27 [cit. 2022-05.-16]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/clanky/2011-6-20-primesi-drive-a-nyni-cast-1/>
- [3] TĚHLÍK, Vladimír, Radovan NEČAS a Dana KUBÁTOVÁ. Vápenec jako základní kámen maltovin. : *Výzkumný ústav stavebních hmot a. s.* [online]. 89-100 [cit. 2022-05.-16]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-vt-vapence.pdf>
- [4] 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. 2022-05-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075
- [5] 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. 2022-05-17]. ISSN 09500618. Dostupné z: doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119
- [6] *Popílek a jeho použití do betonu: Vyhovující nové betonářské normě ČSN 206-1* [online]. [cit. 2022-05.-17]. Dostupné z: [https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek\\_a\\_jeho\\_pouziti\\_do\\_betonu.pdf](https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/06/popilek_a_jeho_pouziti_do_betonu.pdf)
- [7] ČSN EN 450-1. *Popílek do betonu: Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013.
- [8] ŠPAK, Matej, Igor HALAŠA, Martin ŠUSTER a Oto VOJTECHOVSKÝ. Informácie o používaní popolčeka do betónu. *Betón Racio* [online]. 2012, 1-34 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: [http://betonracio.sk/wp-content/uploads/ediciaBR/popolcek\\_info\\_2012.pdf](http://betonracio.sk/wp-content/uploads/ediciaBR/popolcek_info_2012.pdf)
- [9] ČSN EN 197-1. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.

- [10] BENSCHIEDT, N. a Rudolf HELA. *Příručka Popílek v betonu: základy výroby a použití*. Hostivice : ČEZ Energetické produkty vydává pro ASVEP, 2013. ISBN 978-80-260-4226-6.
- [11] MÁŠA, Jiří. *Betony s elektrérenskými popílkami pro prostředí XF3 a XF4* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z:  
[https://www.vut.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=179537](https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=179537).  
Bakalářská práce. VUT, Fakulta stavební. Vedoucí práce Rudolf Hela.
- [12] YUKSEL, Isa. Blast-furnace slag. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete* [online]. Elsevier, 2018, 2018, 361-415 [cit. 2022-05-18]. ISBN 9780081021569. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-102156-9.00012-2
- [13] DROCHYTKA, Rostislav a Pavla MATULOVÁ. *Lehké stavební látky: Modul M01* [online]. Brno, 2006.
- [14] HUSSAIN, Faisal, Inderpreet KAUR a Amir HUSSAIN. Reviewing the influence of GGBFS on concrete properties. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2020, 32, 997-1004 [cit. 2022-05-18]. ISSN 22147853. Dostupné z:  
doi:10.1016/j.matpr.2020.07.410
- [15] GAZDIČ, Dominik, Marcel FRIDRICHOVÁ a Jan NOVÁK. *Využití vysokopecní strusky a přírodního anhydritu k přípravě struskosíranového pojiva* [online]. In: . s. 140-146 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/uploads.mangoweb.org/shared-prod/svcement.cz/uploads/2016/07/sd2008-prednaska-dg-struskosiranove-pojivo.pdf>
- [16] PAL, S.C, A MUKHERJEE a S.R PATHAK. Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete. *Cement and Concrete Research* [online]. 2003, 33(9), 1481-1486 [cit. 2022-05-19]. ISSN 00088846. Dostupné z: doi:10.1016/S0008-8846(03)00062-0
- [17] SONG, H a V SARASWATHY. Studies on the corrosion resistance of reinforced steel in concrete with ground granulated blast-furnace slag—An overview. *Journal of Hazardous Materials* [online]. 2006, 138(2), 226-233 [cit. 2022-05-19]. ISSN 03043894. Dostupné z: doi:10.1016/j.jhazmat.2006.07.022
- [18] ČSN EN 15167-1. *Mletá granulovaná vysokopecní struska pro použití do betonu, malty a injektážní malty: Část 1: Definice, specifikace a kritéria shody*. Praha: Český normalizační institut, 2006.
- [19] ŠÁDKOVÁ, Kateřina. *Strusky a popílkami jako alternativní hydraulická pojiva pro užití v dopravním stavitelství* [online]. Praha, 2020 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z:  
<https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/88916/F1-BP-2020-Vokalova-Katerina-BP%20Sadkova.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Bakalářská práce. ČVUT, Fakulta stavební. Vedoucí práce Jan Valentin.

- [20] ČSN EN 196-1. *Metody zkoušení cementu: Část 1: Stanovení pevnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [21] PD CEN/TR 16639:2014. *Use of k-value concept, equivalent concrete performance concept and equivalent performance of combinations concept*. London: British Standards Institution, 2014.
- [22] ČSN P 73 2404. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda: Doplnující informace*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [23] ČSN EN 206+A2. *Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [24] ČSN EN 1015-3. *Zkušební metody malt pro zdivo: Část 3: Stanovení konzistence čerstvé malty (s použitím střešacího stolku)*. Praha: Český normalizační institut, 2000.
- [25] ČSN EN 12350-2. *Zkoušení čerstvého betonu: Část 2: Zkouška sednutím*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [26] ČSN EN 12390-7. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [27] ČSN EN 12390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu: Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2020.
- [28] DE SCHUTTER, G., P. DE PAUW, N. REYBROUCK a R. CASPEELE. Toward absolute durability performance criteria: preliminary case study of a sea lock. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* [online]. 2015, 5(1-2), 23-34 [cit. 2022-05-24]. ISSN 2165-0373. Dostupné z: doi:10.1080/21650373.2015.1077755
- [29] HELA, Rudolf. *Technologie betonu: Modul M01*. Brno, 2005. Dostupné také z: <https://docplayer.cz/11678646-Vysoke-ueni-technicke-v-brn-fakulta-stavebni-technologie-betonu-modul-m01-bj-04-technologie-betonu-i.html>
- [30] GEMRICH, Jan a Stanislava ROLLOVÁ. Portlandské směsné cementy – cesta k udržitelnému rozvoji. *Beton TKS* [online]. 2021, 2021, (1), 4-14 [cit. 2022-05-25]. Dostupné z: <https://www.ebeton.cz/wp-content/uploads/2021-1-04.pdf>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Výroba vysokoteplotního elektrárenského popílku [1] .....	19
Obrázek 2: Výroba nízkoteplotního popílku [1].....	19
Obrázek 3: Schéma první části praktické části.....	40
Obrázek 4: Schéma druhé části praktické části.....	40
Obrázek 5: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec .....	59
Obrázek 6: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro mikromletý vápenec .....	60
Obrázek 7: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Dětmárovice .....	61
Obrázek 8: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro popílek Dětmárovice .....	62
Obrázek 9: 3D grafické znázornění funkce pevnosti pro strusku Dětmárovice .....	63
Obrázek 10: 2D grafické znázornění funkce pevnosti pro strusku Dětmárovice .....	64

## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Typické chemické složení křemičitého popílku [8] .....	20
Tabulka 2: Zastoupení nejdůležitějších minerálů v popílku z černého uhlí [8] .....	21
Tabulka 3: Normativní požadavky na popílek [7].....	22
Tabulka 4: Chemické složení vysokopeční strusky [15] .....	26
Tabulka 5: Normativní požadavky pro strusku [18].....	27
Tabulka 6: Sítový rozbor vzorku DTK 0 - 4 mm, Žabčice .....	41
Tabulka 7: Sítový rozbor vzorku HTK 4 - 8 mm, Žabčice .....	42
Tabulka 8: Sítový rozbor vzorku HDK 8 - 16 mm, Olbramovice.....	42
Tabulka 9: Receptury malt .....	50
Tabulka 10: Receptury betonů .....	51
Tabulka 11: Konzistence čerstvých malt .....	51
Tabulka 12: Objemová hmotnost a pevnost v tlaku zatvrdlých malt .....	53
Tabulka 13: Indexy účinnosti malt s přísávkem příměsí .....	55
Tabulka 14: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro mikromletý vápenec .....	59
Tabulka 15: Odchyly vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro mikromletý vápenec.....	59
Tabulka 16: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro popílek Dětmárovice.....	61
Tabulka 17: Odchyly vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro popílek Dětmárovice .....	61
Tabulka 18: Pevnosti v tlaku vypočítané z rovnice pevnosti pro strusku Dětmárovice.....	63
Tabulka 19: Odchyly vypočítaných pevností v tlaku od skutečných pevností v tlaku pro strusku Dětmárovice .....	63
Tabulka 20: Konzistence čerstvých betonů .....	64
Tabulka 21: Objemová hmotnost zatvrdlých betonů.....	65
Tabulka 22: Pevnost v tlaku zatvrdlých betonů .....	66
Tabulka 23: Teoreticky určené k-hodnoty pro mikromletý vápenec.....	68
Tabulka 24: Teoreticky určené k-hodnoty pro popílek Dětmárovice .....	68
Tabulka 25: Teoreticky určené k-hodnoty pro strusku Dětmárovice .....	68
Tabulka 26: Ceny složek betonů .....	69
Tabulka 27: Ekonomické vyhodnocení jednotlivých betonových záměsí .....	69

## SEZNAM GRAFŮ

Graf 1: Křivka zrnitosti vzorku DTK 0 - 4 mm, Žabčice .....	41
Graf 2: Křivka zrnitosti vzorku 4 - 8 mm, Žabčice .....	42
Graf 3: Křivka zrnitosti vzorku HDK 8 - 16 mm, Olbramovice .....	43
Graf 4: Granulometrie mikromletého vápence.....	44
Graf 5: Granulometrie popílku Dětmárovice .....	44
Graf 6: Granulometrie strusky Cemex Dětmárovice .....	45
Graf 7: Konzistence cementových malt.....	52
Graf 8: Pevnost v tlaku cementových malt - Mikromletý vápenec.....	53
Graf 9: Pevnost v tlaku cementových malt - Popílek Dětmárovice.....	54
Graf 10: Pevnost v tlaku cementových malt - Struska Dětmárovice .....	54
Graf 11: Indexy účinnosti pro mikromletý vápenec.....	56
Graf 12: Indexy účinnosti pro popílek Dětmárovice .....	56
Graf 13: Indexy účinnosti pro strusku Dětmárovice .....	57
Graf 14: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro mikromletý vápenec .....	58
Graf 15: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro popílek Dětmárovice.....	60
Graf 16: Vývoj pevnosti malt závislých na stáří vzorku pro strusku Dětmárovice.....	62
Graf 17: Konzistence betonů.....	64
Graf 18: Objemová hmotnost zatvrdlých betonů .....	65
Graf 19: Pevnost betonu v tlaku .....	66
Graf 20: Závislost pevnosti v tlaku na stáří vzorku u mikromletého vápence.....	67
Graf 21: Závislost pevnosti v tlaku na stáří vzorku u popílku Dětmárovice .....	67