



# 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

## **VLIV AKTIVNÍCH PŘÍMĚSÍ A JEJICH DÁVKOVÁNÍ NA CHRL VE STÁŘÍ 28 A 90 DNŮ.**

EFFECT OF ACTIVE INGREDIENTS, AND THEIR DOSING TO CHRL 28,90 DAYS OF AGE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

DIPLOMA THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Monika Kodešová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.**

**BRNO 2017**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T020 Stavebně materiálové inženýrství
Pracoviště	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Monika Kodešová
Název	Vliv aktivních příměsí a jejich dávkování na CHRL ve stáří 28 a 90 dnů.
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Vedoucí ústavu

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA  
Děkan Fakulty stavební VUT

## **PODKLADY A LITERATURA**

Odborné zahraniční i tuzemské časopisy, sborníky z odborných symposií a konferencí, internetové zdroje odborných publikací z daného oboru.

Diplomové práce vypracované na ÚTHD FAST Brno v období 2012 – 2015

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

V současném dopravním stavitelství se výrazně prosazují provzdušněné betony pro prostředí XF3 a XF4. Tyto betony se nejčastěji vyrábí pouze z cementu CEM I 42,5. Málo jsou využívané různé typy aktivních příměsí, které jsou výhodné jednak z ekonomického hlediska a jednak mohou i pozitivně ovlivnit trvanlivost betonů v prostředí XF4. V ČR je toto využívání zatím omezené, není k dispozici rozsáhlý soubor zkoušek a praktických zkušeností a současně některá legislativní omezení zejména z pozice ŘSD ČR.

Cílem Vaší diplomové práce bude ověřit chování betonů, u kterých bude část portlandského cementu nahrazena různými typy a množstvím aktivních příměsí. Vlivy ověřit ve stáří 28 a 90 dnů, kdy se předpokládá intenzivnější působení aktivních pucolánových či latentně hydraulických příměsí.

V experimentální části navrhnete referenční recepturu C30/37XF4 pro konzistenci S3 s optimálním provzdušněním. Dále k této receptuře navrhnete receptury, kde bude část cementu CEM I 42,5 R nahrazena různými procentuálními náhradami aktivními příměsemi. Jako aktivní příměsi použijte vysokoteplotní popílků, jemně mletou vysokopecní strusku, mikromletý vápenec, mikrosiliku a metakaolin.

Na čerstvých betonech testujte konzistenci, obsah vzduchu v ČB. Na zatvrdlých pak pevnosti v tlaku, odolnost proti CHRL a spacing – factor. Zkoušky budou dělány ve stáří 28 a 90 dnů. Rozsah práce minimálně 70 stran.

## **STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

Vedoucí diplomové práce

## **ABSTRAKT**

Tématem práce je navržení betonových záměsí s přísadami, které mají nahrazovat cement o různých dávkách, tak aby nebyly negativně ovlivněny vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů a zároveň odolávaly prostředí XF.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Beton, přísady, elektrárenský popílek, vysokopeční struska, křemičité úlety, vápenec, metakaolin, silniční beton, cementobetonový kryt

## **ABSTRACT**

Subject of this work is to design a batch of concrete with additives, which are to replace the cement of various doses so as to not adversely affect the properties of fresh and hardened concrete and simultaneously withstand the environment XF.

## **KEYWORDS**

Concrete, admixtures, fly ash, blast furnace slag, silica fume, limestone, metakaolin, road concrete, concrete pavements

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP**

Bc. Monika Kodešová *Vliv aktivních příměsí a jejich dávkování na CHRL ve stáří 28 a 90 dnů*. Brno, 2017. 89 s., 5 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

---

Bc. Monika Kodešová  
autor práce

# PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2017

---

Bc. Monika Kodešová  
autor práce

## **Poděkování**

V této části diplomové práce bych chtěla poděkovat vedoucímu své práce za poskytnuté rady a věnovaný čas panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc., za pomoc při získávání dat v praktické části děkuji panu Klímovi, Novosadovi a paní Bártové. V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za podporu během celé doby studia.



## Obsah

1.	Úvod .....	12
2.	Teoretická část .....	13
2.1.	Složení betonu.....	13
2.1.1.	Kamenivo .....	13
2.1.1.1.	Petrografie kameniva.....	13
2.1.1.2.	Granulometrie kameniva.....	14
2.1.2.	Cement.....	16
2.1.2.1.	Suroviny pro výrobu cementu .....	16
2.1.2.2.	Slinkové minerály.....	17
2.1.2.3.	Vlastnosti cementu .....	17
2.1.3.	Voda.....	18
2.1.4.	Přísady do betonu.....	19
2.1.4.1.	Plastifikační přísady.....	19
2.1.4.2.	Provzdušňovací přísady.....	21
2.1.5.	Příměsi do betonu.....	22
2.1.5.1.	Příměsi I. typu.....	23
2.1.5.2.	Příměsi II. typu.....	23
2.2.	Příměsi nahrazující portlandský cement .....	25
2.2.1.	Elektrárenské odpadní látky.....	25
2.2.1.1.	Vysokoteplotní popílek.....	25
2.2.1.1.1.	Pórová struktura .....	29
2.2.1.2.	Fluidní popílek .....	31
2.2.2.	Odpady z hutní výroby.....	31
2.2.2.1.	Vysokopeční granulovaná struska .....	31
2.2.2.2.	Struska ocelářská, vysokopeční struska, struska z elektrických pecí .....	33
2.2.3.	Křemičité úlety.....	33
2.2.4.	Metakaolin .....	34
2.2.5.	Mikromletý vápenec.....	35
2.3.	Silniční betony .....	37
2.3.1.	Rozdělení konstrukcí vozovek .....	37
2.3.1.1.	Vrstvy stabilizované cementem.....	38
2.3.1.2.	Kameniva stmelené cementem.....	38
2.3.1.3.	Válcovaný beton .....	39

2.3.1.4.	Směsí stmelných hydraulickým pojivem.....	39
2.3.1.5.	Mezerovitý beton .....	39
2.3.1.6.	Cementobetonové kryty .....	40
2.4.	Požadavky na cementobetonové kryty v ČR.....	40
2.4.1.	ŘSD – technické kvalitativní podmínky 18 .....	40
2.4.1.1.	Cement.....	41
2.4.1.2.	Kamenivo .....	41
2.4.1.3.	Záměsová voda .....	42
2.4.1.4.	Přísady .....	42
2.4.1.5.	Příměsí .....	43
2.4.1.6.	XW3.....	43
2.4.1.7.	Provzdušnění cementobetonových krytů .....	44
2.4.2.	ČSN EN 13 877 – 1 Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály .....	44
2.4.3.	Legislativa zahraničí .....	45
3.	Praktická část .....	48
3.1.	Metodika práce .....	49
3.2.	Jednotlivé složky použité v betonových záměsech .....	51
3.2.1.	Cement.....	51
3.2.2.	Kamenivo .....	51
3.2.3.	Voda.....	53
3.2.4.	Přísady .....	53
3.2.5.	Příměsí .....	53
3.2.5.1.	Vysokoteplotní popílek dětmarovice.....	53
3.2.5.2.	Vysokopeční granulovaná struska štramberk.....	54
3.2.5.3.	Jemně mletý vápenec štramberk .....	54
3.2.5.4.	Metakaolin .....	54
3.2.5.5.	Křemičité úlety .....	55
3.3.	Složení jednotlivých záměsí.....	56
3.4.	Výsledky zkoušek po 28 a 90 dnech .....	60
3.4.1.	Stanovení konzistence.....	60
3.4.2.	Stanovení obsahu vzduchu tlakovou metodou .....	63
3.4.3.	Stanovení objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu.....	65
3.4.4.	Stanovení pevnosti betonu v tlaku .....	67

3.4.5.	Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metoda a – metoda automatického cyklování .....	70
3.4.6.	Obsah vzduchu v zatvrdlém betonu .....	74
4.	Závěr .....	78
5.	Zdroje .....	82

### **Seznam tabulek:**

Tabulka 1:	Porovnání vlastností vysokoteplotního popílku s kamennou moučkou .....	27
Tabulka 2:	Shrnutí betonů pro konstrukce vozovek [44] .....	38
Tabulka 3:	Sítový rozbor – Žabčice, frakce 0-4 mm .....	51
Tabulka 4:	Sítový rozbor – Olbramovice, frakce 8-16 mm .....	52
Tabulka 5:	Průměrné složení vysokoteplotního popílku Dětmárovice [61] .....	53
Tabulka 6:	Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu .....	53
Tabulka 7:	Průměrné mineralogické složení strusky Štramberk .....	54
Tabulka 8:	Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu .....	54
Tabulka 9:	Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu .....	54
Tabulka 10:	Průměrné mineralogické složení metakaolinu .....	54
Tabulka 11:	Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu .....	54
Tabulka 12:	Průměrné mineralogické složení železato-vápenná mikrosilika .....	55
Tabulka 13:	Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu .....	55
Tabulka 14:	Označení jednotlivých záměsí a jejich specifikace .....	56
Tabulka 15:	Záměs I (referenční) .....	56
Tabulka 16:	Záměs II (10 % vysokoteplotního popílku) .....	57
Tabulka 17:	Záměs III (20 % vysokoteplotního popílku) .....	57
Tabulka 18:	Záměs IV (30 % vysokoteplotního popílku) .....	57
Tabulka 19:	Záměs V (10 % vysokopeční struska) .....	57
Tabulka 20:	Záměs VI (20 % vysokopeční struska) .....	58
Tabulka 21:	Záměs VII (30 % vysokopeční struska) .....	58
Tabulka 22:	Záměs VIII (10 % jemně mletý vápenec) .....	58
Tabulka 23:	Záměs IX (20 % jemně mletý vápenec) .....	58
Tabulka 24:	Záměs X (30 % jemně mletý vápenec) .....	59
Tabulka 25:	Záměs XI (5 % metakaolin) .....	59
Tabulka 26:	Záměs XII (10 % metakaolin) .....	59
Tabulka 27:	Záměs XIII (5 % křemičitých úletů) .....	59
Tabulka 28:	Záměs XIV (10 % křemičitých úletů) .....	60
Tabulka 30:	Naměřené hodnoty konzistence betonu ihned po zamíchání .....	61
Tabulka 29:	Sednutí kužele .....	61

Tabulka 31: Obsah vzduchu v čerstvé betonové záměsi ihned po zamíchání .....	64
Tabulka 32: Stanovení objemové hmotnosti v čerstvé betonové záměsi, v zatvrdlém betonu po 28 dnech a po 90 dnech .....	66
Tabulka 33: Stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 a 90 dnech .....	68
Tabulka 34: Zatřídění povrchů zkušebních ploch podle hmotnosti na plochu .....	72
Tabulka 35: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek .....	73
Tabulka 36: Charakteristiky vzduchu v zatvrdlém betonu (A – objem pórů, $A_{300}$ – objem účinných pórů, L – rozložení vzduchových pórů) .....	77

### Seznam obrázků:

Obrázek 1: Ideální křivky zrnitosti kameniva pro max. zrno 4 mm, 16 mm a 32 mm. Oblast 1 a 5 - nevhodná zrnitost kameniva, oblast 3 - dobrá zrnitost kameniva, oblast 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva a křivka 2 - křivka přerušené zrnitosti. [9] .....	15
Obrázek 2: Flokulovaný stav cementových částic [2] .....	19
Obrázek 3: Fázové složení minerálních příměsí v ternárním diagramu $SiO_2 - CaO - Al_2O_3$ [2] .....	24
Obrázek 4: Ukázka měření konzistence čerstvého betonu a správného a špatného sednutí .....	61
Obrázek 5: Tlakový hrnec pro zkoušku obsahu vzduchu v čerstvé betonové záměsi .....	64
Obrázek 6: Zkouška pevnosti betonu v tlaku (metakaolin 5 %) .....	68
Obrázek 7: Zkušební vzorky po zkoušce odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích zkoušek (struska 30 % a vápenec 20 %) .....	72
Obrázek 8: Příprava těles pro stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu .....	76

### Seznam grafů:

Graf 1: Metodika práce .....	50
Graf 2: Sítový rozbor – Žabčice, frakce 0-4 mm .....	52
Graf 3: Sítový rozbor – Olbramovice, frakce 8-16 mm .....	52
Graf 4: Množství záměsové vody v $1\text{ m}^3$ čerstvého betonu .....	62
Graf 5: Znázornění konzistence betonových záměsí .....	62
Graf 6: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi .....	65
Graf 7: Objemová hmotnost betonové směsi v čerstvém stavu, ve ztvrdlém stavu po 28 dnech a po 90 dnech (znázorněno $1\ 800 - 2\ 400\text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) .....	67
Graf 8: Stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 a 90 dnech .....	69

# 1. Úvod

V současné době je velký význam kladen na snižování emisí vznikajících při průmyslové výrobě, zejména při výrobě cementu, kdy je udáváno, že při výrobě 1 tuny cementu vzniká přibližně 0,6 tuny CO<sub>2</sub>. Snižování emisí je možné díky druhotným surovinám, které jsou v České republice produkovány ve velkých objemech, pro které je hledáno vhodné využití.

Některé druhotné suroviny jsou vhodné k použití do betonových směsí, které jsou používány pro zlepšení reologie čerstvé betonové směsi i vlastnosti ztvrdlých betonů. V současné době je snaha o eliminování výroby cementu, ke které by mohlo přispět i jeho částečné nahrazování příměsí. Proto je nutné stanovit optimální hodnotu, kterou by bylo možné nahradit část cementu v betonové záměsí.

Velkým spotřebitelem betonových záměsí jsou dopravní konstrukce, kde je možné, aby část použitého cementu byla nahrazena příměsí. Současná legislativa, která je definovaná ŘSD konkrétně technickým kvalitativním předpisem 18, dále jsou materiály používané pro cementobetonové kryty definované českou státní normou ČSN EN 13 877. V České republice se příměsí přidávají do betonových směsí ve směsných cementech.

Cílem práce je navržení betonových záměsí s příměsí, které mají nahrazovat cement o různých dávkách, tak aby nebyly negativně ovlivněny vlastnosti čerstvých a ztvrdlých betonů a zároveň odolávaly prostředí XF a namáhání způsobené používáním konstrukcí.

## 2. Teoretická část

V první části teoretické části je popsáno, co je beton a z čeho je složen, jaké jsou požadavky na jednotlivé složky pro výrobu betonových směsí, aby bylo dosaženo požadovaných reologických vlastností čerstvého betonu a požadovaných mechanických vlastností u ztvrdlého betonu, následuje popis jednotlivých příměsí včetně jejich vlastností i výroby. V další části je popsán silniční beton a požadavky na něj v České republice a zahraničí.

### 2.1. Složení betonu

Beton tak, jak ho známe dnes je směsí drobného a hrubého kameniva, cementu, vody, přísad i příměsí. V této kompozitní látce plní kamenivo funkci kostry s minimální mezerovitostí, další důležitou složkou je cement, který obaluje jednotlivá zrna kameniva a po přidání vody tato zrna k sobě pojí. V současné době jsou neodmyslitelnou součástí této směsi i přísady, které upravují vlastnosti čerstvého, ale i ztvrdlého betonu. Příměsí se do betonu přidávají za účelem zlepšení reologie a vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu nebo získání některých speciálních vlastností. Dalším možným důvodem k použití příměsí je možnost snížení nákladů, které s výrobou betonové směsi souvisejí tím, že se nahradí část nejnákladnější položky, tedy cementu. [1], [2], [3], [4]

#### 2.1.1. Kamenivo

Nejdůležitější složkou při výrobě betonu je kamenivo, které plní jeho nosnou funkci s minimální mezerovitostí. V betonové směsi zaujímá největší zastoupení, přibližně 75 – 80 % objemu celé směsi. Vlastnosti kameniva, které je vhodné pro výrobu betonu jsou uvedeny v ČSN EN 12 620 v Národní příloze NA 1. Kamenivo má pozitivní dopad pro beton, například lepší objemovou stabilitu, trvanlivost, pevnost, ovlivní i mrazuvzdornost a zpracovatelnost betonu. [1], [3], [5]

##### 2.1.1.1. Petrografie kameniva

Hornina je složena z minerálů, které svým podílem a vlastnostmi určují její barvu, tvrdost (určuje se Mohsovou stupnicí), trvanlivost, chemické chování, teplotní roztažnost. Důležitým prvkem, který má velký vliv na vhodnost horniny,

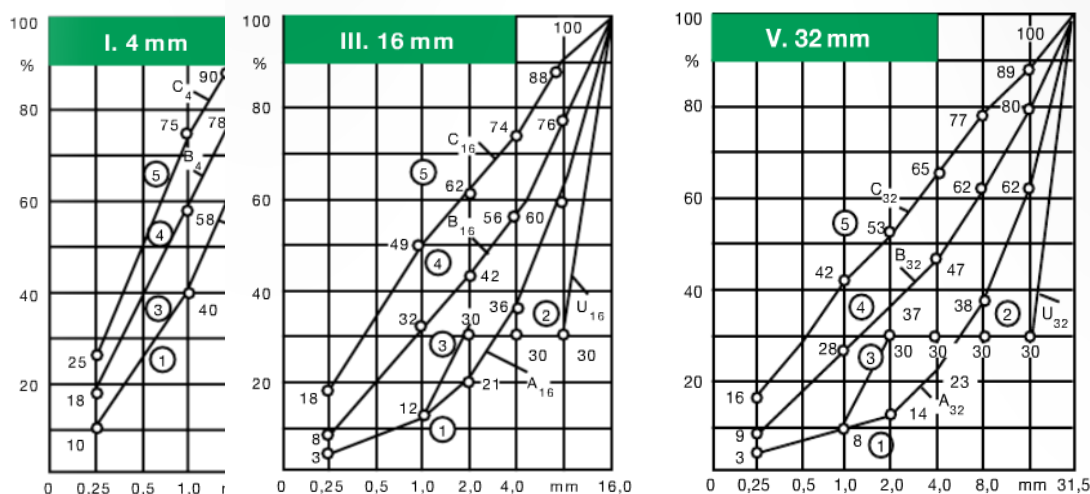
pro použití do betonu je i její původ. Horniny podle původu dělíme na magmatické (vytvořené krystalizací přirozené silikátové taveniny, dělí se na hlubinné – vyznačující makroskopicky zrnitou hmotou vlivem dlouhotrvající krystalizace; žilné se vyznačují okem patrnými krystalky minerálů, které jsou obklopené jemně zrnitou hmotou; výlevné mají makroskopicky celistvý vzhled vlivem rychlejší ochlazování magmatu na povrchu. Sedimentární horniny patří mezi nejrozšířenější skupinu, dělí se klastické, chemické a organogenní, vznikají zvětráváním, transportem částic, sedimentací, diagenézí. Metamorfované horniny vznikají přeměnou magmatických sedimentárních nebo i starších metamorfovaných hornin. Přeměna hornin je ovlivněna nejčastěji vyšší teplotou a tlakem.) V hornině je důležité i uspořádanost minerálů. Pokud je uspořádání pravidelné, má větší nebo menší vliv na štěpnost horniny, příkladem takových hornin je rula, břidlice. Pokud je v hornině víc minerálů nepravidelně uspořádaných, tím větší je pevnost horniny, příklad takto nepravidelných struktur se nalezne u čediče, žuly, dioritu, křemence. Tyto horniny s nepravidelnou strukturou uspořádání minerálů jsou nejvhodnější při použití do betonu. [3], [6], [7]

#### **2.1.1.2. Granulometrie kameniva**

Zrnitost kameniva je vyjádřena skladbou různě velkých zrn o různém tvaru tak, aby se dosáhlo co největší hutnosti. Čím vyšší hutnost skladby, tím nižší mezerovitost ve skladbě zrn. Optimální skladba se určí pomocí síťového rozboru na normalizované sadě sít, kde zrna zachycená na sítě se nazývají frakce. Normová základní řada sít se čtvercovými otvory je 0,063 – 0,125 – 0,5 – 1 – 2 – 4 – 8 – 16 – 32 – 63 – 125 mm. [1], [3], [6]

Zrnitost je dána čarou zrnitosti a pro její plynulost jsou uváděny nejčastěji tři typy křivek, které se mohou označit za ideální. Na obr. 1 jsou znázorněny příklady optimálních křivek zrnitosti pro některé frakce. Ideální čáry zrnitosti mohou být popsány rovnicemi podle Fullera, EMPA I a EMPA II. Zrnitost je závislá na třech podmínkách, které spolu souvisejí. Nejprve se přes síťový rozbor zjistí zrnitost kameniva, následně je nutné zvolit vhodnou zrnitost a posledním bodem je skladba kameniva tak, aby bylo dosaženo ideální křivky zrnitosti. Pro výpočet čáry zrnitosti je nutné znát maximální velikost zrna kameniva. Největší možné zrno kameniva k betonové směsi je ovlivněno vzdáleností mezi pruty výztuže

zmenšené o 5 mm; 1,3 násobek krycí vrstvy výztuže nebo čtvrtinou nejmenšího rozměru konstrukce betonové konstrukce. [1], [5], [6]



Obrázek 1: Ideální křivky zrnitosti kameniva pro max. zrno 4 mm, 16 mm a 32 mm. Oblast 1 a 5 - nevhodná zrnitost kameniva, oblast 3 - dobrá zrnitost kameniva, oblast 4 - ještě použitelná zrnitost kameniva a křivka 2 - křivka přerušené zrnitosti. [9]

Granulometrie je udávána křivkou, která se nazývá čarou zrnitosti. Plynulost křivky je dána podílem kameniva na síť tak, aby bylo dosaženo nejnižší mezerovitosti. Křivka zrnitosti se popisuje pomocí modulů kameniva, které vyjadřují jeho jemnost. Modul zrnitosti se zjistí pomocí síťového rozboru na normové sadě sítí. Existují dva moduly zrnitosti: k modul (číslo zrnitosti) – je součet veškerých procentních zůstatků směsi kameniva na sítích od 4 mm, který je dělený 100. Druhým je d modul (součet propadů) – je součet veškerých procentních propadů směsi kameniva pod 4 mm. Předpokladem pro dosažení stejné pevnosti betonu, díky stejnému množství vody, které je potřeba na ovlhčení povrchu kameniva, je směs se stejným modulem. Tyto moduly zároveň slouží k návrhu poměrů dvou a více kameniv o rozdílné zrnitosti. [1], [6]



### 2.1.2. Cement

Dalším důležitým komponentem betonové směsi je cement, který plní funkci pojivové složky, kdy spolu s vodou tvoří cementový tmel a po tuhnutí a tvrdnutí vznikne cementový kámen. Cement se řadí mezi hydraulické pojivo anorganického původu, které pojí plniva ve větší celky a tuhne, tvrdne, nabývá vaznost a je stabilní i pod vodou. Pro složení, specifikaci a kritéria shody cementů platí norma ČSN EN 197-1. [2], [8]

#### 2.1.2.1. Suroviny pro výrobu cementu

Mezi hlavní zástupce cementů patří portlandský cement, který je kromě hlinitanového cementu složkou všech hydraulických pojiv. Důležitým krokem výroby portlandského cementu je příprava surovinové směsi o vhodném poměru surovin potřebných k výrobě slinku. Suroviny pro jeho výrobu se dělí na základní, korigující a zušlechťující. Základní suroviny musí obsahovat vhodný poměr čtyř hlavních oxidů -  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , který je označován, jako modul. Moduly jsou poměry obsahu oxidů ve vstupní surovině. Jsou známy tři druhy modulů: silikátový modul  $M_S$  – jeho hodnota je v rozmezí 2,4 až 2,7. Cementy, které mají  $M_S$  vyšší, jsou charakterizovány pomalejším tuhnutím a odolností vůči agresivnímu prostředí. Hodnota hydraulického modulu  $M_H$  se pohybuje v rozmezí 1,9 až 2,2. Pokud je  $M_H$  vyšší než 2,4, jde o cementy se zvýšenou tvorbou alitu a trikalciualuminátu a je pro ně typické vyšší hydratační teplo a vyšší počáteční pevnosti, zároveň jsou méně odolné vůči agresivním látkám. Posledním modulem je aluminátový  $M_A$ , který je vymezen hodnotami 1,5 – 2,5. [1], [8]

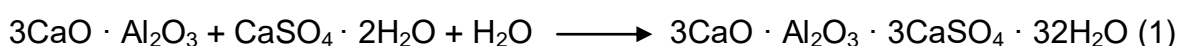
Surovinová moučka bývá složena z vápence, který je hlavním zdrojem  $\text{CaO}$ , z jílu a lupku pro získání  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Je velmi časté, že vznikající surovinová moučka nemá požadované poměry jednotlivých prvků a proto se používají korigující suroviny, kterými se dá složení upravit. Korigujícími složkami jsou křemičitý písek, pro úpravu množství  $\text{SiO}_2$ , bauxit jako zdroj  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a oxid železitý pro  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Zušlechťujícími surovinami jsou intezifikátory výpalu (snižují viskozitu taveniny, reagující tavenina se získá při nižší teplotě), mineralizátory (dokážou upřednostnit vznik jednoho minerálu během výpalu na úkor druhého) a legující přísady (zlepšují melitelnost slinku). Další složka, která

vznikla vlivem působení vysokých teplot, je skelná fáze, která může být v cementu obsažena až z 25 % a zajišťuje objemovou stálost cementu. [8], [9]

Doplňující složky nesmí zvyšovat obsah vody během zpracování cementu, nesmí snižovat odolnost betonu a ochranu výztuže vůči korozi. [9]

### 2.1.2.2. Slinkové minerály

Po získání potřebných složek k dosažení správného poměru prvků v surovinové moučce se vzniklá směs nechá vypálit v dlouhé rotační peci až na mez slnutí (při teplotě 1 250 – 1 350 °C) a následně se musí intenzivně zchladit, aby nedošlo k rozpadu C<sub>3</sub>S a C<sub>2</sub>S. Ve slinku se během výpalu vytvoří slinkové minerály: alit, který ovlivňuje nárůst počátečních pevností, dalším minerálem je belit, tento minerál má nízké počáteční pevnosti, ale konečné pevnosti jsou srovnatelné s alitem, pro belit je typické, že dosahuje nízkého hydratačního tepla, proto je hlavní složkou cementů pro výstavbu masivních konstrukcí. Trikalciumaluminát má velmi rychlý nárůst počátečních pevností, tuhne ihned po zamíchání s vodou, a proto se musí při mletí slinku přidávat regulátor tuhnutí, kterým je sádrovec. Trikalciumaluminát spolu se sádrovcem vytvoří primární ettringit (1), který zpomalí okamžitý průnik vody do jádra. Posledním slinkovým minerálem je brownmillerit, který má velmi nízké počáteční pevnosti. [2], [8]



Po zchlazení se vzniklý slinek rozemele i se síranem vápenatým, který se používá jako regulátor tuhnutí a jeho maximální obsah má být 5 – 6 %. Konečná směs je jemný prášek o měrném povrchu minimálně 220 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>. [8], [9]

### 2.1.2.3. Vlastnosti cementu

Sledované vlastnosti cementů jsou definovány v normě ČSN EN 196. Mezi důležité vlastnosti se řadí počátek a doba tuhnutí, zjišťuje se Vicatovým přístrojem a minimálně za 45 až 60 minut, běžně však až za 3 – 5 hodin, začne docházet k tuhnutí, doba tuhnutí má být maximálně 12 hodin (bývá 4 – 6 hodin). Čím více

vody v záměsi, tím se doba tuhnutí prodlužuje. Další vlastností je objemová stálost, způsobená nadměrným množstvím volného CaO, MgO a CaSO<sub>4</sub>, se prokazuje po 24 hodinách při laboratorní teplotě 20°C. Zkouší se pomocí Le Chatelierovy objímky, kdy její roztažení nesmí být větší než 10 mm. U portlandského cementu se udává objemová hmotnost 3 050 – 3 150 kg · m<sup>-3</sup> a sypaná hmotnost volně loženého cementu je v rozmezí 900 až 1 300 kg · m<sup>-3</sup>. Měrný povrch cementu bývá 250 – 400 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>, čím větší je měrný povrch cementu, tím rychleji a dokonaleji hydratuje, ale výroba takového cementu je energeticky náročná. K dokonalejší hydrataci cementových zrn je potřeba větší množství vody. Další důležitou sledovanou vlastností je hydratační teplo, které cement vyvíjí během hydratace cementových zrn. Pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku je zjišťována na cementových trámečcích o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, které jsou vyrobeny z 1 350 g normovaného písku, 450 g cementu a 225 ml vody. Pevnost v tahu a následně v tlaku se zjišťuje po 1, 7 a po 28 dnech. [6], [9], [10], [11]

### **2.1.3. Voda**

Voda použitá při výrobě betonu musí splňovat požadavky dané ČSN EN 1008. Voda v technologii betonu plní dvě funkce. Reologickou, kde díky vodě vznikne tvárný beton. Viskozitou betonu je ovlivněna plastičnost a koheze kapilárními silami. Druhou funkcí je funkce hydratační, kde spolu s cementem vytváří strukturu cementového kamene. K hydrataci cementu je potřeba minimálně 23 – 25 % vody z hmotnosti cementu. [1], [6]

V rámci výroby betonu a jeho následného zrání je tato složka dělena na vodu záměsovou, která se dávkuje při míchání čerstvého betonu a vodu ošetřovací, která je důležitá po zatuhnutí betonu, který se několik dní musí držet ve vlhkém prostředí, aby veškerá cementová zrna stihla plně zhydratovat a tím nedošlo k poškození ztvrdlého betonu vzniklými smršťovacími trhlinami. [1], [6]

Veškerá voda používaná při výrobě betonu musí splňovat kvalitativní požadavky. Použitelnost vody při výrobě závisí na zdroji. Voda může být použita pitná z vodovodního řadu, studniční, recyklovaná z uzavřeného technologického okruhu při výrobě transport betonu, maximální objemová hmotnost má být

do  $1\ 010\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . Dalšími zdroji může být průmyslová odpadní voda a mořská voda. [1], [12]

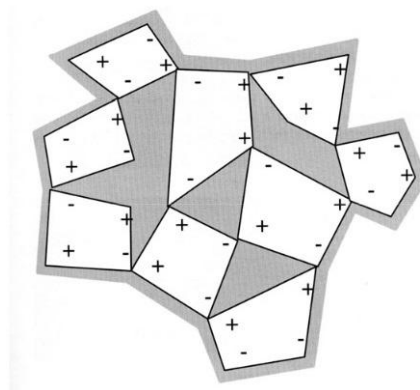
Při použití vody je kladen velký důraz na to, jaký beton bude vyráběn, jestli prostý, vyztužený nebo předpjatý. Druh betonu ovlivní sledované vlastnosti vody a jejich mezní hodnoty. Sledovanými vlastnostmi jsou barva, pH, obsah chloridů, síranů, fosforečnanů, dusičnanů, siřičků, zinku, glukózy a sacharózy, alkálií, humínové látky, oleje a tuky, detergenty, suspendované látky a zápach. [1], [12]

#### 2.1.4. Přísady do betonu

Kromě základních složek betonu jako jsou cement, kamenivo a voda patří i přísady, které jsou už považovány za běžnou součást betonové směsi. Přísady jsou chemické látky upravující reologii čerstvého betonu a následně vlastnosti ztvrdlého betonu. Přísady se využívají zejména v kapalném stavu, kdy dojde k lepšímu rozmísení ve vyráběné směsi. Přísady působí především na cement a jejich působení je závislé na druhu použitého cementu, měrném povrchu cementu, koncentraci přísady, která je vztažena na hmotnost cementu. [1], [3]

##### 2.1.4.1. Plastifikační přísady

U nás se ve větším měřítku začaly první plastifikační přísady používat v druhé polovině 50. let minulého století. Tehdy se zjistilo, že k neutralizaci nábojů na povrchu cementových zrn je možné použít určité organické molekuly, známé pro své dispergační účinky. Tím dochází k eliminaci flokulace. Na obrázku č. 2 je znázorněn flokulovaný stav cementových zrn. [2], [3]



Obrázek 2: Flokulovaný stav cementových částic [2]

Plastifikační přísady se řadí mezi chemické látky, které svým složením a principem ovlivňují reologické vlastnosti betonu a zároveň nedochází ke zhoršení ostatních vlastností betonové směsi. Ztekucující přísady se dělí jak podle složení, tak i podle kapilární aktivity, která úzce souvisí s chemickou strukturou. [13]

Přísady redukující množství vody se využívají především pro redukcii záměsové vody a tím dojde ke snižování vodního součinitele a to vede ke zvýšení pevnosti betonu v tlaku a ke zlepšení trvanlivosti. Redukce množství vody a cementu, při zachování vyhovující zpracovatelnosti, vede k eliminaci dotvarování a smrštění. Zlepšením zpracovatelnosti čerstvého betonu lze omezit intenzivních vibrací při zhutňování betonu. [1]

Z fyzikálně chemického hlediska lze tento proces popsat jako adsorbce na rozhraní tuhá látka – kapalina. Při adsorbci z kapalného prostředí se můžou povrchy zrn v betonu posuzovat ze dvou hledisek. Prvním lze celý proces přisoudit působení chemických sil nebo molekulární přitažlivosti. Druhým způsobem je možné na něj pohlížet jako na útvar s velkou plochou mezi povrchy zrn, na které může dojít k hromadění rozpuštěných přísad schopných snížení mezipovrchového napětí. Oba uvedené vlivy mohou být uplatněny v závislosti na složení, vlastnostech přísady a pevných složkách betonu. [13]

K výrazné změně fyzikálně chemických podmínek vazby molekul vody na povrchu cementového zrna dochází zejména v počátečním stádiu hydratace. Hydrofilní póly přísady, úměrné počtu adsorbovaných molekul, vážou přiměřený počet molekul vody. Tím dochází ke změně poměru mezi vodou volnou a vázanou, to je způsobeno při použití polárních přísad, dochází k redukcii odlučování vody z betonové směsi a snižuje se sklon směsi k rozměšování. [13]

Aby mohla být v betonu použita ztekucující přísada, musí splňovat nejdůležitější kritéria. Nesmí s hydratačními produkty vytvářet nerozpustné sloučeniny, které by obalovaly cementová zrna a zabraňovaly by tak další hydrataci. Musí být stabilní v zásaditém prostředí, především v přebytku  $\text{Ca}^{2+}$ . Při míchání se nesmí vytvářet mikropěna, aby nedošlo ke zvyšování pórovitosti cementového tmele. Tuhnutí cementu může pro praxi zanedbatelným způsobem ovlivňovat, pokud je nežádoucí polyfunkční princip působení. Nesmí dojít k nežádoucímu ovlivnění vlastností betonu po zatvrdnutí a ke korozivnímu působení na výztuž. [13]

Stěžejní výhodou těchto přísad je jejich výrazná redukce vody minimálně o 5 %, při dosažení stejné zpracovatelnosti nebo při zachování vodního součinitele zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu, této výhody lze využít u vodostavebních betonů, kde je potřeba dosáhnout nižší pórovitosti ztvrdlého cementového kamene. Stejný vodní součinitel s použitím ztekucujících přísad vede k úspoře cementu v betonové směsi a ta je následně vhodná pro betonáž masivních konstrukcí, protože dojde ke snížení vývinu hydratačního tepla. [3], [5]

Redukce vody má pozitivní vliv na vlastnosti ztvrdlého betonu. Beton díky eliminaci vody dosáhne nižšího množství vzduchových pórů, které vznikají vypařením vody, vzniká hutnější struktura, která má za následek vyšší objemové hmotnosti betonu a i pevnosti v tlaku. V normě ČSN EN 434-2 v Národní příloze NA 1 se uvádí, že pevnosti v tlaku u betonové směsi s použitou ztekucující přísadou mají být po 7 a 28 dnech minimálně o 10 % vyšší než pevnosti v tlaku zjištěné u referenčního betonu. [3], [14]

Upravená reologie betonu má význam i v oblasti transportbetonu a to zlepšení čerpatelnosti betonu a následně jeho zpracování. [3]

#### **2.1.4.2. Provzdušňovací přísady**

Provzdušňovací přísady se dají považovat za jeden z nejdůležitějších technologických pokroků ve stavebnictví v minulém století. Jde o chemické látky (přírodní pryskyřice, sodné soli mastných kyselin, sulfonované deriváty mastných kyselin a organické třísloviny) vytvářející stabilní uzavřené vzduchové póry, které zůstávají v betonové směsi i po jejím zatvrdnutí. Optimální průměr vzduchových bublin je 0,025 – 0,300  $\mu\text{m}$ . Póry mění pórovitou strukturu cementového tmele a výrazně ovlivňují trvanlivost betonu. Vlivem vzduchových bublin dochází k rozrušování sítě kapilár. Vzduch uzavřený v dutinách zlepšuje chování betonu proti účinkům mrazu a rozmrazování. [1], [3], [6], [15]

K získání významného množství dostatečně velkých vzduchových pórů se musí brát v úvahu faktory ovlivňující celkové provzdušnění betonu. Vliv mají velikost vodního součinitele, zpracovatelnost, podíl jemného kameniva, dávka a druh cementu, kvalita vody, teplota, vibrace, dávka provzdušňovače a způsob jeho dávkování. [6], [15]

Pozitivní nebo negativní vliv na pěnivost, povrchovou aktivitu nebo migraci bublin v betonové směsi mohou mít ionty obsažené v záměsové vodě obklopující vzduchové bubliny. Záměsová voda se neustále mění vlivem rozpouštěných látek a jejich koncentrace. Ve vodě mohou být obsaženy kationty ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) a anionty ( $\text{OH}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ). [15]

Odolnost betonu je potřeba zvýšit vůči účinkům ledu, který vzniká v kapilárách cementového kamene z důvodu přechodu kapalného skupenství vody na pevné skupenství, který je doprovázen nárůstem objemu o cca 9 %. V případě používání rozmrazovacích prostředků je potřeba zajistit odolnost betonu i proti růstu krystalů chemických solí. Při použití provzdušňovací přísady dochází k hydrofobnímu účinku, kde díky jejímu působení zůstávají póry zaplněny vzduchem. Vlivem expandující vody v kapilárách dochází ke zvýšení hydrostatického tlaku, který působí na strukturu cementového tmele a zvyšuje riziko vzniku trhlin. Pro eliminování vzniku trhlin vlivem hydrostatického tlaku se využívají právě uměle vyrobené vzduchové póry, které slouží jako pomyslný úložný prostor. [1], [6]

Požadavkem na provzdušněné betony je kromě jejich trvanlivosti během zmrazování a odmrazování především i na jejich pevnost v tlaku. Udává se, že s každým procentem vzduchu navíc v zatvrdlém betonu, se snižuje jeho pevnost v tlaku přibližně o 4 – 5 %. Minimální hodnota vzduchu v čerstvém betonu je podle normy ČSN EN 934-2 v Národní příloze NA 1 uvedena 4 – 6 objemových %. Pevnost v tlaku po 28 dnech u provzdušněného betonu nesmí klesnout o více než 25 % proti pevnostem v tlaku u referenčního betonu. [3]

### **2.1.5. Příměsi do betonu**

Příměsi jsou takové látky, které upravují reologii čerstvé betonové směsi, výsledné vlastnosti ztvrdlých betonů. Případně se využívají pro získání speciálních vlastností. Jde o anorganické látky s maximální velikostí zrn 0,125 mm s velkým měrným povrchem. Tyto práškové, jemné látky jsou buď v přírodní formě (vápeneč) nebo ve formě druhotné suroviny (elektrárenský popílek, křemičitý úlet vysokopecní struska a jiné). Dále se příměsi dělí na příměs typu I a typu II. Jelikož dávkování příměsí je mnohem vyšší než dávkování přísad, je nutné je započítat do objemové skladby betonu. [16], [17]

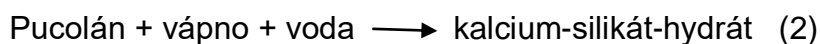
### 2.1.5.1. Příměsi I. typu

Tento typ je nazýván inertním. Příměs tohoto typu svým mineralogickým a chemickým složením netvrdnou ani po přidání budičů. Přidávají se především pro zlepšení reologických vlastností nebo zhutnění struktury betonové směsi tím, že se zvýší podíl jemných složek. Z tohoto důvodu je nutné hlídat množství záměsové vody potřebné pro smočení povrchu jednotlivých zrn. Typickými zástupci těchto příměsí je kamenná moučka, která musí vyhovovat české státní normě ČSN EN 12 620, barevné pigmenty vyhovující české státní normě ČSN EN 12 878. Na rozhraní typu I a II je mikromletý vápenec, kde jeho reaktivnost závisí na jemnosti mletí, dle normy ČSN EN 206-1 je řazen mezi inertní příměsi. [16], [17]

### 2.1.5.2. Příměsi II. typu

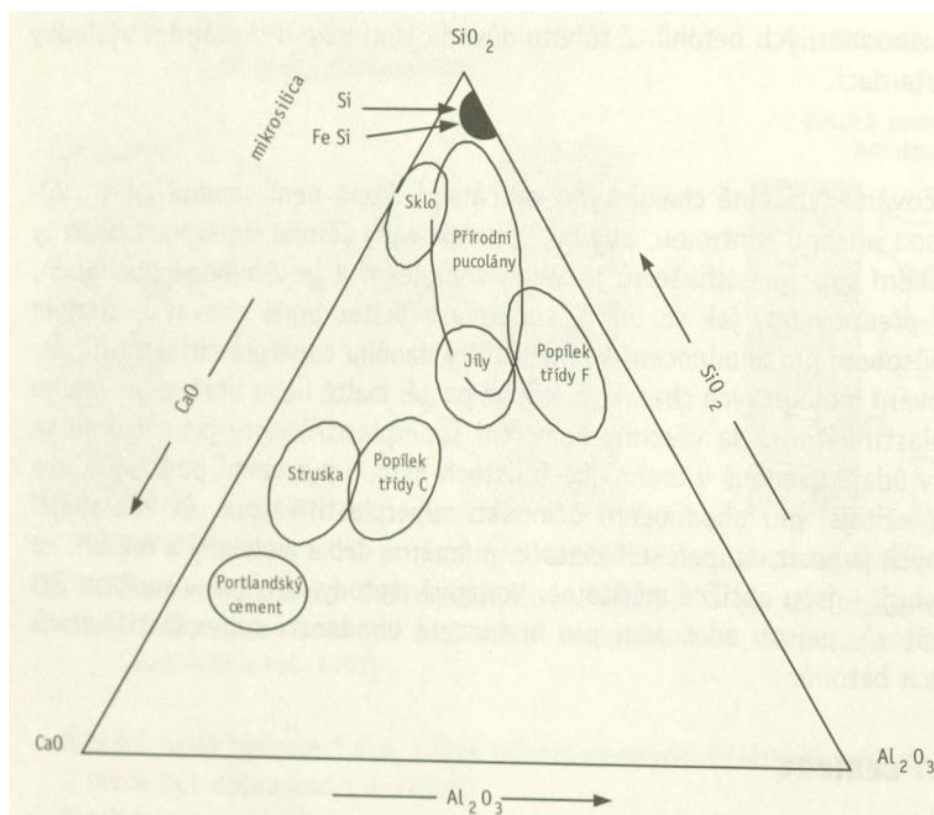
K tomuto typu se řadí materiály jako je vysokoteplotní popílek vyhovující české státní normě ČSN EN 450, nízkoteplotní popílek, granulovaná vysokopecní struska, která má předepsané složení definované v české státní normě ČSN EN 197-1. Mezi další aktivní příměsi se řadí křemičité úlety (ČSN EN 13 263), nanosilika, metakaolin a po potřebném pomletí i mikromletý vápenec. Tyto příměsi se podílí na vývinu pevností cementového tmele. Dále se dělí na pucolány a latentně hydraulické materiály, avšak ve svých technologických důsledcích jsou totožné, rozdíly jsou pouze v obsahu rozdílných minerálů. [16], [17], [18]

Pucolány jsou látky obsahující vysoké množství oxidu hlinitého a oxidu křemičitého, které samy od sebe nereagují. Aktivní oxid křemičitý reaguje s přidaným hydroxidem vápenatým a vody za vzniku nerozpustných vysokopevnostních produktů C-S-H gelů tato reakce je popsána následující rovnicí (2). Pucolány jsou děleny na umělé (popílky, mikrosilika) a přírodní (tuf, křemelina, trasy). [2], [16], [17], [19]





Reakce závisí na jemnosti mletí a obsahu skelné fáze. Čím vyšší jsou hodnoty, tím je reakce rychlejší. Během hydratace portlandského cementu dochází k uvolnění cca 20 – 30 % vápna z hmotnosti cementu. Vápno je uvolňováno v podobě  $C_2S$  a  $C_3S$ . Vznikající portlandit má jen zanedbatelný vliv na pevnost zatvrdlého betonu a naopak může způsobovat problémy s trvanlivostí, jelikož portlandit může být snadno vyluhován, což může vést ke zvýšení pórovitosti cementové matrice. Pokud se v betonu používá příměs v množství 20 – 30 % z hmotnosti cementu, tak v ideálním případě se může vzniklé vápno transformovat do C-S-H gelů, dle rovnice (2). [2]



Obrázek 3: Fázové složení minerálních příměsí v ternárním diagramu  $SiO_2 - CaO - Al_2O_3$  [2]

Pro názornost jsou příměsi zakresleny na základě chemického a fázového složení v ternárním diagramu (obrázek 3). Fázové složení minerálních příměsí se nemusí shodovat se složením, které je znázorněné v ternárním diagramu, jelikož jde ve velké míře o průmyslové produkty a jen část oxidů vznikla během vypalovacího procesu, avšak v diagramu složky odpovídají krystalickým látkám získaných pomalým chlazením směsi z těchto tří oxidů. Tímto lze vysvětlit poměrně velké plochy jednotlivých příměsí. [2], [5], [20]

Mezi výhody betonu, kde příměs nahrazuje část cementu je eliminace až snížení následků alkalicko-křemičité reakce; pomalejší uvolňování hydratačního tepla, díky nižšímu množství slinku; lepší odolnost vůči některým chemickým látkám, síranům a mořské vody; lepší odolnost vůči působení chloridů, což je důležité především pro vozovky, které jsou v zimě ošetřovány rozmrazovacími prostředky. [20]

Latentně hydraulické příměsi jsou takové látky, které k započatí reakce potřebují být aktivovány budičem. Rozlišují se budiče síranové (vytváří ettringit) a alkalické s  $\text{pH} > 7$ . [17]

S aktivními příměsmi souvisí i výpočet ekvivalentního vodního součinitele, který zohledňuje jednotlivé příměsi. Výpočet ekvivalentního vodního součinitele se provádí dle rovnice (1). [17]

$$w_k = \frac{m_v}{m_c + k \cdot m_p} \quad (1)$$

Kde je  $w_k$  – ekvivalentní vodní součinitel [-],  $m_v$  – hmotnost záměsové vody [kg],  $m_c$  – množství cementu [kg],  $m_p$  – množství příměsi [kg],  $k$  – k-hodnota závislá na použité příměsi a užitém cementu. [17]

## **2.2. Příměsi nahrazující portlandský cement**

### **2.2.1. Elektrárenské odpadní látky**

#### **2.2.1.1. Vysokoteplotní popílek**

K nejběžněji používané druhotné surovině jako alternativě cementu, se řadí vysokoteplotní popílek. Úletový elektrárenský popílek je produktem spalování uhlí v podobě velmi jemně zrnitého prášku (80 % hmotnosti částic uhlí má velikost zrn  $< 90 \mu\text{m}$ ), který je zachycován v odlučovačích z plynů topenišť. Nehořlavé minerální složky z části aglomerují na větší částice a dopadají podle druhu spalování v kapalně nebo tuhé formě na dno kotle. Vzniklý sklovitý granulát vzniká v ohništi s tavící komorou, kde teplota dosahuje  $1\,400 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $1\,600 \text{ }^\circ\text{C}$ ). „Čistá“

forma popílku vzniká oddělením od spalin zachytáváním částic soustavou vícenásobných mechanických a elektrostatických odlučovačů a filtrů. [17]

Vysokoteplotní, úletový popílek je definován jako kulovité sklovité částice charakterizované čtyřmi základními složkami, skelnou fází, oxidem křemičitým, hlinitým a železitým, které zajišťují pucolánovou aktivitu. Dalšími prvky obsažených v popílku jsou oxid vápenatý, oxid titaničitý, oxidy alkalických kovů, oxid sírový a mnoho dalších. V závislosti na obsahu CaO v popílku dochází k zatřídění popílku do jednotlivých tříd. Podle ASTM C 618 jsou popílkové děleny do dvou skupin, jako nízkovápenaté s označením F a vysokovápenaté s označením C. Pro třídu F je potřeba, aby byla splněna podmínka, že součet  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$  dal minimálně 70 %. Pro skupinu C je dáno, že součet  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{FeO}_3$  musí být minimálně 50 %, avšak někteří uvažují za třídu C i ten popílek, který obsahuje více než 10 % CaO. Podle české státní normy ČSN EN 450 je elektrárenský popílek rozdělen do čtyř skupin podle obsahu  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ . Dělení do tří skupin v kanadských normách CSA.A23 vychází z působení popílku na čerstvý a ztvrdlý cement, podle obsahu Ca. [2], [16], [19], [21], [22], [23], [24]

Jelikož asociace ASVEP uvádí, že je vyprodukováno přibližně 13 milionů tun druhotných surovin, řadí se Česká republika mezi nejvyšší producenty na světě. Je uváděno, že 71 % zaujímá popílek z klasického vysokoteplotního spalování. Přestože může vykazovat proměnlivé složení v závislosti na druhu spalovaného uhlí, typu topeniště, technickém řešení spalování případně i způsobu odlučování je již z cca 11 % využíván do betonových a cementových směsí. [2], [23], [24]

Aby vysokoteplotní popílek mohl být používán jako příměs nebo případně náhrada za portlandský cement, je nutné, aby splňoval daná kritéria, která jsou pro Českou republiku definována v české státní normě ČSN EN 450 nebo požadavky uvedené v tabulce 1, které jsou uvedeny v české státní normě zabývající se kamenivem do betonu, tedy ČSN EN 12 620. [16]

Tabulka 1: Porovnání vlastností vysokoteplotního popílku s kamennou moučkou. [16]

Vlastnost podle způsobu užití popílku	Jednotka	Pucolánová příměs druhu II	Kamenná moučka příměs I druhu
		ČSN EN 450	ČSN EN 12 620
Ztráta žíháním	% hmot.	max. 5,0 <sup>1)</sup>	-
Obsah SO <sub>3</sub>	% hmot.	max. 3,0	max. 0,8
Obsah celkové síry	% hmot.	-	1,0
Obsah chloridů v přepočtu na Cl <sup>-</sup>	% hmot.	max. 0,10	0,03 / 0,06 / 0,15 <sup>6)</sup>
Obsah volného CaO	% hmot.	max. 1,0 <sup>2)</sup>	-
Jemnost, zbytek na síť 0,045 mm	% hmot.	max. 40 <sup>3)</sup>	-
Sítový rozbor, propad na síť: 2 mm 0,125 mm 0,063 mm	%	-	100 85 – 100 70 - 100
Obsah aktivního SiO <sub>2</sub>	% hmot.	min. 25	-
Objemová stálost (roztažnost)	mm	max. 10 <sup>2)</sup>	-
Index účinnosti po 28 (90) dnech	%	min. 75 (85)	-
Měrná hmotnost (tolerance)	kg · m <sup>-3</sup>	max. ± 150 <sup>4)</sup>	-
Hmotnostní aktivita Ra <sup>226</sup>	Bq · kg <sup>-1</sup>	max. 200 <sup>5)</sup>	-

<sup>1)</sup> Na národní úrovni je povoleno používat popílky se ztrátou žíháním až do 7 % hmotnosti

<sup>2)</sup> Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého více než 1,0 % hmotnosti, ale méně než 2,5 % hmotnosti je přijatelný za předpokladu, že vyhoví požadavkům na objemovou stálost

<sup>3)</sup> Jemnost mletí popílku nesmí kolísat o více než ± 10 % z průměrné hodnoty, která je stanovena za předem dané časové období výrobcem

<sup>4)</sup> Tolerance od průměrné hodnoty uváděné výrobcem

<sup>5)</sup> Limit hodnoty stanovený vyhláškou SÚJB č. 184 / 1997 Sb.

<sup>6)</sup> Maximální hodnoty pro předpjatý, železový a prostý beton vodou rozpustných Cl<sup>-</sup> k hmotnosti celého kameniva

Na základě vlastností elektrérenských popílků je lze použít pro mnoho účelů. Pokud je popílek uvažován jako inertní příměs, slouží pak v betonové směsi jako plnivo a optimalizuje křivku zrnitosti. Tím dochází ke zlepšení zpracovatelnosti, eliminuje hrozbu segregace větších částic při dopravě a zpracování čerstvé betonové směsi. [16]

V případě, že jsou elektrárenské popílky brány jako příměs s pucolánovou aktivitou, je možné jimi nahrazovat část cementu v receptuře, aniž by byly ovlivněny konečné pevnosti betonu. Další výhodou je příznivé ovlivňování procesu tuhnutí a tvrdnutí i s vývinem hydratačního tepla a omezuje částečné smršťování betonu. Příznivě ovlivňuje odolnost vůči agresivnímu prostředí, lepší utěsnění povrchových vrstev pro vyšší odolnost proti tlakové vodě, hutnost cementového tmelu, zpomalení karbonatace povrchu ztvrdlého betonu. [16]

Elektrárenský popílek má i určitá rizika, která jsou nutná zohlednit při výběru vhodného typu této příměsi a její dávky. Ve většině případů jde o nepřekročení limitujících hodnot uvedených v tabulce (1), tedy vysoký obsah CaO, který způsobuje objemové změny jak v čerstvém, tak i ztvrdlém betonu, vznikající napětí ve vzorcích způsobuje trhliny v cementovém tmelu a tím dochází ke snížení pevností betonu. Vliv má i překročení limitu oxidu sírového, který způsobuje síranovou korozi ztvrdlého betonu a jeho objemové změny. Proces tuhnutí a tvrdnutí ovlivňuje negativně i vysoký podíl spalitelných látek, především obsah neshořelého zbytkového uhlí v popílku, v čerstvém betonu negativně ovlivňuje obsah vzduchu v provzdušněném betonu, dochází i k odlupování povrchu ztvrdlého betonu, čímž dochází ke snížení trvanlivosti betonu. Vysoký obsah chloridů zvyšuje riziko vzniku koroze uložené výztuže v betonové konstrukci. Pokud se přežene dávkování popílku v záměsi, dochází k výrazné změně reologických vlastností čerstvého betonu a dochází k bleedingu, který výrazně sníží trvanlivost ztvrdlého betonu. [16]

Nejčastěji je využíván popílek z černého uhlí, který má menší variabilitu vlastností a tím je jako příměs do betonu vhodnější. Popílky produkované v České republice obsahují maximálně 3 % CaO, což je řadí mezi křemičité popílky. Tyto popílky z černého uhlí jsou tvořeny kulovými zrny (velikost 1 až 150  $\mu\text{m}$ ) skelné fáze o velikosti přibližně totožné, jako je velikost zrn cementu. Aby mohl být cement nahrazen touto druhotnou surovinou, je důležité, aby tato příměs byla dostatečně reaktivní, to je ovlivněno obsahem  $\text{SiO}_2$ . Nárůst pevností v 28 dnech je nižší než u betonů pouze s portlandským cementem. Předpokládané výraznější nárůsty pevností nabývají mezi 28 až 90 dny. Jelikož postupně dochází k tvorbě nových hydratačních produktů, které postupně vyplňují póry vzniklé při hydrataci do 28 dnů, dochází ke zvýšení trvanlivosti betonu. Popílek, který nezreagoval, slouží jako mikroplnivo, čímž dochází k hutnější cementové matici. [16], [17]

Již v současné době jsou popílky využívány v silničním stavitelství běžně při realizaci podkladních vrstev silničních konstrukcí i ke stabilizaci zemin. V omezeném množství se popílek používá i na cementobetonové kryty. [19]

Během zrání betonu dochází k tomu, že cement s popílkem spolupůsobí. Fyzikální působení spočívá v tom, že je v záměsi obsaženo dostatečné množství pojiva. Popílek má schopnost regulovat množství cementu v betonové záměsi a tím i výsledné vlastnosti. Fyzikální působení popílku je ovlivňováno hutností matrice. V současné době, je kladen důraz na minimální objem dutin. Toho lze dosáhnout vhodnou skladbou jemných částic s vhodnou granulometrií. Dosažením hutnější betonové směsi vede ke zlepšení fyzikálních vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. [19]

Při fyzikálním působení má popílek funkci mikroskopického plniva, avšak při chemickém působení dochází k tomu, že popílek díky své pucolánové aktivitě reaguje s hydroxidem vápenatým a vodou za vzniku nerozpustných sloučenin C-S-H gelů s vysokou pevností a za přítomnosti síranů byly zjištěny fáze kalciumaluminatsulfat hydrátu. [19], [26]

V betonových záměsech je pucolánová reakce často dokazována dlouhodobým nárůstem pevností při dostatečné vlhkosti. Kdy se udává, že po 28 dnech hydratuje 5 – 15 % hmotnosti a po 180 dnech hydratuje přibližně 30 – 40 % z hmotnosti popílku. C-S-H gely vzniklé během reakce mezi popílkem a cementem mají pozitivní vliv na zjemnění a zhutnění mikrostruktury cementového kamene. [19], [26], [27]

#### **2.2.1.1.1. Pórová struktura**

V každém stavebním materiálu se vyskytuje pórová struktura. Jedinečnost betonu oproti jiným materiálům spočívá v tom, že se velikost pórů pohybuje v rozsahu od  $10^{-9}$  –  $10^{-3}$  m. Póry jsou děleny na vzduchové, gelové a kapilární a mohou být zastoupeny v různém množství. Kvalita a velikost pórů je závislá především na použitých příměsích a přísadách a typu pojiva použitého v betonových záměsech, důležitá je i hodnota vodního součinitele. U betonů s portlandským cementem se s prodlužující dobou hydratace objem pórů zmenšuje, z důvodu tvorby produktů při hydrataci. Pokud se část cementu nahradí

popílkem, dochází během hydratace k tvorbě C-S-H gelů, tyto produkty zaujímají menší objem než původní reagující látky. [19], [26]

Při nahrazování portlandského cementu elektrárenským popílkem dochází ke zvětšení celkové pórovitosti s jemným podílem pórů. Objem gelových pórů roste na úkor pórů kapilárních. Tyto gelové póry eliminují transport médií cementovým kamenem. Další významnou veličinou je takzvaný „pore blocking efekt“, který přerušuje spojitost pórové struktury. Objem kapilárních pórů je téměř neměnný, avšak některé podíly pórů se stanou neprostupnými pro transport médií. Tento efekt je nejvíce patrný v betonových směsích obsahujících latentně hydraulické látky nebo pucolánové příměsi. Produkty vzniklé hydratací těchto složek se projevují zvláště u otevřených kapilárních pórů, tím dochází k eliminaci transportu médií. [19], [26], [28]

Náhrada cementu popílkem má vliv i na odolnost proti škodlivým účinkům mrazu a rozmrazovacích prostředků. Trvanlivost betonových zkušebních vzorků závisí především na míře pórovité struktury a na obsahu vody během zmrazování. U vodou nasycených betonových vzorků dochází k tvorbě mikroskopických ledových čoček v kapilárních pórech. Porušení vzorků je ovlivňováno především rychlostí absorpce vody až po kritické nasycení, při kterém dochází k porušení betonových zkušebních vzorků, při nízkém počtu cyklů zmrazování / rozmrazování. [19], [29]

Nahrazením cementu popílkem se stejným vodním součinitelem dochází k vyšší pórovitosti, z již výše uvedených důvodů, tedy velikost produktů vzniklých v závislosti na reakci s popílkem jsou menší než produkty vzniklé u portlandského cementu. Avšak vlivem „pore-blocking efektu“ zlepšuje rozdělení velikosti pórů. Uvádí se, že z důvodu vyšší absorpce a většího objemu pórů při zkoušce po 28 dnech vede k nižší mrazuvzdornosti. V praxi dochází k namáhání mrazem u zkušebních těles s 20% náhradou portlandského cementu popílkem po více, než 28 dnech dochází jen k nepatrně vyššímu poškození mrazem. [19], [26]

### **2.2.1.2. Fluidní popílek**

Jinak nazývaný jako nízkoteplotní, kdy teplota spalování se pohybuje mezi 820 – 850 °C. Sypná hmotnost se pohybuje od 500 – 700 kg · m<sup>-3</sup>. Od klasických vysokoteplotních popílků se liší především ve výši obsahu volného vápna CaO – až 15 % z hmotnosti, oxidu sírového SO<sub>3</sub> – až 20 % z hmotnosti, dochází až k 15 % ke ztrátám žíháním. Z důvodu velkého objemu volného vápna, není dle české státní normy ČSN EN 206-1 přípustné, aby fluidní popílků byly používány v betonu. Důvodem je to, že i když teploty jsou nižší, než u klasického spalování je ve fluidních popílcích obsažen nezreagovaný CaO, který je přítomný ve formě měkce páleného vápna, které je velmi reaktivní. [17], [30]

Fluidní popílků vznikají fluidním spalováním, kdy nadrcené uhlí o velikosti cca 20 mm se do komory fluidního kotle vkládá spolu s drceným vápencem. Při fluidním spalování se rozlišují dva typy popílků. Fluidní popílek filtrový, získaný z úletu, jsou to jemné částice unášeny spalinami. Druhým typem jsou popílků fluidní ložové, jde o hrubší částice, které zůstávají ve spalovací komoře. [17], [30]

V současné době se stále hledá využití pro tento druh odpadu.

### **2.2.2. Odpady z hutní výroby**

Mezi základní konstrukční materiály se řadí materiály z oceli. Její výroba je energeticky náročná s vysokou produkcí odpadů. Nejobjemnější odpadní surovinou je struska. V hutnickém průmyslu, při výrobě oceli nebo surového železa se nelze vyvarovat vzniku strusky, ten je zapříčiněn obsahem hlušiny v kovonosných rudách, přísadkem popelovin v koksu a přísad, obsahem vyzdívky tavicího agregátu (korodované nebo erodované) a jiných nečistot. [31]

#### **2.2.2.1. Vysokopecní granulovaná struska**

Díky svým chemickým i fyzikálním vlastnostem může být struska řazena k významným druhotným surovinám. Bývala využívána v zemědělství, nebo z ní byly vyráběny dlažební kostky. V současné době je materiálově využívána především ve výrobě anorganických pojiv. Této druhotné suroviny je velké množství uloženo na haldách a hledá se pro ni využití. [31]



Hlavními složkami vysokopecní strusky jsou oxidy CaO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MnO, MgO, SiO<sub>2</sub>, oxidy železa, TiO<sub>2</sub> a BaO, další významnou složkou jsou sulfidy některé nitridy a karbonitridy, struskotvorných přísad. Vlastnosti strusky se vytváří po celou dobu přítomnosti ve vysoké peci. Z ní se dostává při odpichu, kdy je oddělitelná od kovové lázně díky její nižší hustotě. Struska ve vysoké peci dosahuje maximální teploty 1 550 °C. Fázové složení strusky je závislé jak na chemickém složení, tak i rychlosti chlazení. [31]

Během rychlého chlazení dochází ke vzniku skelné (amorfní) fáze, která je zastoupena z cca 40 % hmotnosti oxidem křemičitým. Ke zchlazení dochází, dosáhne-li struska kritické teploty, buď vlitím strusky do vody, nebo je zchlazena proudem vzduchu, kdy vzniká granulovaná vysokopecní struska. Krom skelné fáze se v granulované strusce objevují i zbytky krystalické fáze ve formě minerálu akermanitu, melilitu, merwinitu a dalších. Minimální obsah skelné fáze je minimálně 85 %. Po zchlazení strusky dochází ke mletí na specifický povrch 350 – 450 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup>. Dobře vyhašená struska má béžovou, světle žlutou nebo šedou barvu. [2], [17], [31]

Granulovaná struska je řazena mezi pucolány, což se projevuje tím, že reaguje s Ca(OH)<sub>2</sub> a vodou, přičemž dochází k tuhnutí a následnému tvrdnutí. Čím vyšší má obsah skelné fáze, tím lepší jsou hydratační schopnosti. Pro použití strusky v betonových záměsech je důležité určení její bazicity (2), tedy aby struska vykazovala zásaditý charakter, tedy  $M_z > 1$ . [17], [31]

$$M_z = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3} \quad (2)$$

Podle české státní normy ČSN EN 197-1 granulovaná struska, přidávaná do cementů, musí mít minimálně 2/3 její hmotnosti sklovitý charakter, musí vykazovat hydraulické schopnosti, minimálně 2/3 hmotnosti musí tvořit MgO, CaO, SiO<sub>2</sub> a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a musí být splněna podmínka obsahu vybraných oxidů (3). [31]

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} > 1 \quad (3)$$

### **2.2.2.2. Struska ocelářská, vysokopecní struska, struska z elektrických pecí**

Mezi další druhy hutních odpadů se řadí struska vysokopecní, která vzniká pomalým chlazením tekuté odpadové taveniny při výrobě železa na vzduchu. Dalším druhem je ocelářská struska, která vzniká při výrobě oceli a dělí se podle způsobu výroby na strusku zásaditou, která vzniká v pecích typu Siemens-Martin, jde o starší strusky. Další strusky jsou strusky z konvertorových pecí. Tyto strusky jsou hojně využívány v silničním stavitelství v krytech a podkladních stmelovaných vrstev vozovek v pozemním stavitelství. Posledním typem strusky je struska z elektrických pecí, její primární funkce je ochrana tekutého kovu před oxidací, je to tedy struska vznikající při přetavování oceli. Struska vzniká z nečistot zachycených na vsázkovém materiálu a malé množství opalem vyzdívky. [32]

Tyto strusky vykazují různé vlastnosti. Ve srovnání s vysokopecními granulovými struskami obsahují CaO, méně Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a oxidy železa. Právě díky vysokému zastoupení železa ve strusce ve formě FeO (až 30 hm. %), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (4-11 hm. %) a elementární Fe (až 10 hm. %) se snaží metalurgické závody zpracovat takovouto strusku ve svých podnicích. [31]

### **2.2.3. Křemičité úlety**

Někdy je tato příměs označována jako mikrosilika, důvodem je především to, že jsou tvořeny silikou - SiO<sub>2</sub>. Obsah SiO<sub>2</sub> kolísá v závislosti na vyráběné slitině. Množství SiO<sub>2</sub> se běžně pohybuje v rozmezí 90 % – 98 %. Tato příměs je odpadní látkou při výrobě křemíku, ferrosilicia a jiných slitin křemíku, které jsou vyráběny v obloukové elektrické peci, kde redukce křemene probíhá pomocí paliva, kdy vzniká plynný SiO<sub>2</sub>, který v horní části pece kondenzuje a oxiduje ve velmi jemných částicích SiO<sub>2</sub>, oxidace probíhá velmi rychle, takže tetraedry SiO<sub>2</sub> se nestihnou pravidelně uspořádat, aby vytvořily krystalickou siliku. [16], [17]

Strukturně jde o částice tvořené sklovitou silikou. Velikost částic se pohybuje od 0,1 μm do 1 – 2 μm a mají světle až tmavě šedou barvu. Měrný povrch křemičitých úletů se pohybuje v rozmezí 15 000 – 25 000 m<sup>2</sup> · kg<sup>-1</sup> a objemová hmotnost se pohybuje kolem 2 200 kg · m<sup>-3</sup>. Při porovnání s jinými příměsmi používaných do betonu jsou křemičité úlety specifické velmi vysokým

obsahem  $\text{SiO}_2$ , extrémní jemností a amorfním stavem. Vlastnosti mikrosiliky jsou definovány v ČSN EN 13 263. [16], [17], [33], [34]

Mikrosilika se řadí mezi vysoce reaktivní pucolány, rychlost reakce je závislá na teplotě. Výhody mikrosiliky nespočívají jen v rychlé pucolánové reakci, ale i v účinku částic, které plní i funkci plniva. Chemický vliv mají úlety i na zárodky krystalů portlanditu. Funkce plniva má vliv i na reologii a na fyzikální vlastnosti zatvrdělých betonových směsí. Výsledná matrice s křemičitým úletem je hutná ještě dřív než se vyvinou chemické vazby mezi cementem. Mikrosilika dokáže urychlit počáteční průběh hydratace, důvodem je poskytnutí krystalizačních zárodků, díky kterým se mohou hydratační produkty z roztoků rychleji vysrážet. V betonových záměsech, eliminuje možnost odmísení vody a zlepšuje čerpatelnost betonových záměsí. Díky hutné struktuře dochází ke zlepšení pevnosti betonu v tlaku, zejména mezi 7 a 28 dny. Křemičité úlety redukují poréznost cementové matrice i na rozhraní se zrny kameniva. Zvyšují odolnost vůči agresivnímu prostředí, snižují rychlost karbonatace a omezují alkalický rozpad kameniva. Velká nevýhoda křemičitých úletů spočívá v tom, že pokud bude překročena optimální dávka, která je stanovena maximálním poměrem k cementu na hodnotu  $\leq 0,11$ . Pokud dojde k překročení této hodnoty, dochází ke snížení pH a tím i ke snížení pasivace výztuže a k navýšení množství záměsové vody, udává se, že o 1 litr na 1  $\text{kg}$  křemičitých úletů. Obsah cementu by neměl klesnout o  $30 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  betonu pro stupně prostředí, které vyžadují minimální obsah cementu  $\leq 300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . [5], [16], [17], [18], [33], [34]

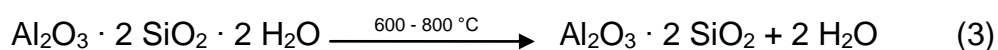
#### **2.2.4. Metakaolin**

Metakaolin se řadí mezi často využívané průmyslové materiály, jeho světová produkce převyšuje 25 mil. tun. Jde o jemnou látku bílé barvy, s malými částicemi a chemickou inertností. Metakaolin je složen ze 40 – 45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a 50 – 55 %  $\text{SiO}_2$  a oxidy obsažené ve stopovém množství  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  a  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Průměrná velikost zrn metakaolinu se pohybuje v řádu několika desetin až jednotek mikrometrů, měrný povrch příměsí bývá  $2\,000 - 20\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ . [17], [36], [37]

Díky velkému měrnému povrchu je metakaolin řazen k pucolánům, avšak jako ostatní příměsí po zreagování s vápnem má funkci mikroplniva, což vede

k eliminaci pórového systému především v kontaktní zóně mezi cementovou matricí a kamenivem. Dochází ke zlepšení mechanických vlastností betonu a zvyšuje jeho trvanlivost, především díky tomu, že obsahuje velké množství amorfního  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a amorfního  $\text{SiO}_2$ . V přítomnosti  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  a vody dochází k tvorbě pojivých hydrátů křemičitanu a hlinitanu vápenatého a hlinitokřemičitanu vápenatého. C-S-H fáze je tvořena v gelové formě, který proniká do pórů a tím dochází ke snížení pórovitosti utěsněním struktury. Tato příměs reaguje s portlanditem pozvolněji než křemičité úlety, proto vyvázání  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  trvá delší dobu. Uvádí se, že betonová směs, kde je cement nahrazen z 15 % metakaolinem je původní  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  vyvázáno na 6 – 24 % hodnoty kontrolního vzorku. [17], [37], [38], [39]

Metakaolin se neřadí mezi odpadní produkty, ale mezi účelně vyráběný produkt, který je vyráběn kalcinací kaolinitů a jiných surovin při teplotě 600 – 800 °C. (Reakce probíhající kalcinace je znázorněn chemickou rovnicí 3). Kalcinace probíhá v rotačních pecích po dobu cca jedné hodiny, pro zkrácení času kalcinace slouží fluidní kalcinace, avšak nejrychlejší metodou kalcinace se uvádí „Flash“ kalcinace, kde se čas zkrátí z minut na sekundy tím, že se surovina prudce zahřeje a následně prudce zchladí. [17], [37], [39], [40]



### 2.2.5. Mikromletý vápenec

Vápenec se řadí mezi sedimentární monominerální horniny, které obsahují více než 90 % - 95 % kalcitu. V hornině může být obsažen dolomit 10 – 50 %, ty se označují jako dolomitické, vápenec s obsahem nad 10 % nekarbonátových příměsí jsou označovány jako jílovité, písčité. [41]

Dle původu jsou vápence děleny na chemické, tyto vápence vznikají vysrážením z roztoků. Dalším druhem jsou vápence organogenní, které jsou složeny z kosterních elementů rostlin i živočichů vylučujících  $\text{CaCO}_3$ . Příkladem jsou vápence útesové, lasturnaté, korálové, rasové. K vápencům se řadí i křída (nedostatečně zpevněný až drobný, pórovitý, za mokra mazlavý a velmi jemnozrný vápenec, většinou bělavé barvy o vysokém stupni čistoty (nad 90 %  $\text{CaCO}_3$ ). K usazování těchto druhů docházelo v mělkých teplých

mořích i ve sladkovodních jezerech. Posledním druhem vápenců jsou vápence detrické (klastické), které jsou složené z jemné drti i větších úlomků organogenního karbonátu nebo starších vápenců. [41]

Dalším způsobem, jak dělit vápence je podle toho, zda prodělaly nebo neprodělaly metamorfní přeměny. Pokud nedošlo k metamorfní přeměně, označují se jako sedimentární. Vápence metamorfované se označují jako krystalické (mramory), metamorfní děj je doprovázen vlivem vyšších teplot a tlaků a postupným zánikem původních zbytků skořápek a rostlin a vzniká již sekundární, čistý zrnitý kalcit. [41]

Vápenec se z více než poloviny využívá pro výrobu pojiv (cement a vápno) Ideální pro cementářství jsou jílovité vápence až slíny, které obsahují asi 20 % jemnozrnného nerozpustného podílu. Dále je vyráběno vápno o různém stupni čistoty kalcinací přírodních vysokoprocentních mikrokrystalických vápenců. Dále je vápenec využíván jako stavební drcený kámen, dekorační kámen, struskotvorné činidlo při tavení železa, v chemickém průmyslu, v černouhelném hornictví, zemědělství a lesnictví a v uhelných elektrárnách na odsířování plynů. [41]

Vápenec používaný jako příměs do betonových směsí musí obsahovat minimálně 75 %  $\text{CaCO}_3$  a obsah jílových podílů nesmí překročit 1,2 g / 100 g. Mikromletý vápenec je na rozhraní inertních a aktivních příměsí. Podle české státní normy ČSN EN 206-1 se tato příměs řadí mezi inertní – nepodílí se na hydrataci cementu a slouží jako mikroplnivo. Jemnější zrna vápence dokáží s krystaly portlanditu zreagovat a tím dosáhnout urychlení hydratace silikátových a aluminátových fází. [17]

Z krátkodobého hlediska náhrada cementu 10 % a 20 % se v počátečních fázích projevuje urychlením hydratace, avšak z dlouhodobého hlediska dochází k hydrataci cementu pomaleji. Jedná se o hydrataci trikalciumaluminátu ( $\text{C}_3\text{A}$ ) ze slinky za vzniku kalciumkarbonátaluminát hydrátu ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaCO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ) v cementech s vyšším obsahem  $\text{C}_3\text{A}$ . Trikarbonát v pozdější fázi se může transformovat na monokarbonát, který je stabilnější. Při náhradě cementu vyšším množstvím vápence než je 20 %, dochází ke snížení pevnosti v tlaku. [17], [42], [43]

## **2.3. Silniční betony**

Materiály těchto konstrukcí jsou definovány v české státní normě ČSN 73 6123: 1994 Stavba vozovek. Cementobetonové kryty. Vozovky jsou prováděny z několika vrstev a z různého materiálu, jak z cementového betonu, tak i z asfaltbetonu. Cementobetonové kryty se podle dopravního zatížení dělí do pěti skupin, kdy za nejnáročnější jsou označovány letištní plochy a dálnice, u dalších typů vozovek náročnost klesá. [1]

Požadavky pro kvalitní vozovky jsou dobrá odolnost povrchu proti obrušování, minimální hlučnost, dobré protismykové vlastnosti. Pro snížení hluku jsou používány dvouvrstvé cementobetonové kryty, kdy horní vrstva je vymývána. Udává se, že se hladina hluku sníží o 7 dB, hloubka vymývání je 0,8 mm a vystupující zrna jsou od sebe asi 10 mm. Z technického hlediska jsou dány rozměry betonových desek, tedy jejich šířka je 4,25 m, délka dilatačního celku nemá být delší než 25násobek tloušťky desky, kdy nejmenší tloušťka je 100 mm. [1]

Důležitým krokem jsou podmínky a způsob pokládky, kdy teplota ovzduší během betonáže by se měla pohybovat od 5 do 25 °C s relativní vlhkostí 70 %. Pokud se betonuje za vyšších nebo nižších teplot, je nutné přistoupit k potřebným opatřením během betonáže a následného ošetřování. Hutnění betonu probíhá pomocí finišerů s vnitřní vibrací a nemělo by trvat déle než 30 minut, tento čas je měřen od přidání vody v míchačce po zpracování finišerem. Je nutné cementobetonový kryt po ukončení betonáže chránit, aby nedošlo k rychlému odparu vody. [1]

### **2.3.1. Rozdělení konstrukcí vozovek**

Využívání betonu ve výstavbě dopravní infrastruktury má stále stoupající tendenci. Rozlišují se na dva betony, ty které splňují platné předpisy a ty směsi, které dané předpisy nespĺňují, tyto směsi jsou stmelené hydraulickými pojivy. Dopravní konstrukce jsou děleny do několika skupin, které jsou řízeny českou státní normou ČSN EN 14 227-1. [44]

Tabulka 2: Shrnutí betonů pro konstrukce vozovek [44]

Třída pevnosti	Název technologie	OZN.
C 1,5 / 2	Stabilizace cementem	S II
C 3 / 4	Stabilizace cementem	S I
C 5 / 6	Kamenivo stmelené cementem	KSC II
C 6 / 8	Mezerovitý beton	
C 8 / 10	Kamenivo stmelené cementem	KSC I
C 12 / 15	Válcovaný beton	VB I
C 16 / 20	Podkladový beton	PB II
C 20 / 25	Podkladový beton	PB I
C 25 / 30	Cementobetonový kryt	CB III
C 30 / 37	Cementobetonový kryt	CB I a CB II

### 2.3.1.1. Vrstvy stabilizované cementem

Do první skupiny vrstvy stabilizované cementem, které jsou stmelené hydraulickým pojivem. Jde o směs kameniva o určité křivce zrnitosti, cementu a vody. Tato směs je vyráběna v zavhlé konzistenci, kdy hotová betonová záměs je na stavbu dovážena sklápěcími vozy a následně hutněna válcováním. Takovéto cementy jsou rozděleny podle pevností v tlaku do tříd C 1,5 / 2,0, dříve označována jako CS II nebo druhá třída C 3/4 pod původním označením CS I. Tato betonová směs je používána na podkladní vrstvy liniových staveb, odstavných ploch i chodníků. [44]

### 2.3.1.2. Kameniva stmelené cementem

Druhou skupinou je skupina kameniva stmelené cementem. Směs je totožná jako v předchozím případě, avšak množství vody musí odpovídat stanovené optimální vlhkosti. I v tomto případě je záměs na místo dopravována sklápěcími vozy a hutněna válcováním. Betonová směs je rozdělena do dvou tříd podle pevnosti v tlaku. První třída C 5 / 6 (původní označení KSC II) a druhá třída C 8 / 10 (původně KSC I). Použití je totožné jako u vrstev stabilizovaných cementem, tedy chodníky, odstavné plochy a podkladní vrstvy liniových staveb. [44]

### **2.3.1.3. Válcovaný beton**

Tento typ silniční konstrukce se řadí do třetí skupiny a je tak označován beton hutněný válcováním. Válcováním dochází ke snižování mezerovitosti a k vytlačování vzduchu z pórů až na hranici zhutnění 0,98. Jde o složení klasického betonu s podstatně nižším vodním součinitelem. Je nutné věnovat zvýšenou pozornost optimálnímu množství pojiva s ohledem na dodržení požadavků na pevnost v tlaku a odolnosti CHRL, dobře odstupňovaná čára zrnitosti nebo optimálnímu obsahu vody v betonové směsi. Po uložení je nejprve zavlhklá směs zhutněna finišery a následně proběhne převálcování hladkými válci. Vzhledem k tomuto uložení a následnému zhutnění je technologie využívána pro plochy s časným a velkým zatížením. Podle platné české státní normy tato směs stmelená hydraulickým pojivem – cementem je vyráběna v pevnostní třídě C 12 / 15. [44], [45]

Tento typ betonu se používá pro velmi vytížené cesty, průmyslové plochy, parkoviště, odstavné plochy. V silničním stavitelství je válcovaný beton používán jako nosná krycí vrstva pro venkovské komunikace, průmyslové plochy a vnitropodnikové komunikace. [45]

### **2.3.1.4. Směsí stmelených hydraulickým pojivem**

Podkladový beton je řazen do skupiny směsí stmelených hydraulickým pojivem. Jde o směs daného složení z drobného a hrubého kameniva, vody, cementu a přísad, kdy vodní součinitel nesmí překročit hodnotu 0,5. Uložená betonová směs je hutněna povrchovou vibrací a slouží pouze jako podklad pro další vrstvy vozovky. Dělení těchto betonu je C 16 / 20 (podkladový beton PB II) a C 20 / 25 (PB I). [44]

### **2.3.1.5. Mezerovitý beton**

Tento druh betonu je popsán jako stejnozrnný beton s předepsanou mezerovitostí, kdy kostra je tvořena z hrubého kameniva, které je obaleno a spojenou maltou z cementu, vody a případných přísad. U těchto betonů je definována jedna kladená vrstva minimální tloušťkou 100 mm a maximální tloušťkou 300 mm. Mezerovitý beton je pokládán na podkladní nebo ochrannou



vrstvu. Tyto betony jsou využívány jako podkladní vrstvy vozovek s drenážním účinkem po celé své ploše. Dále se tyto betony používají jako výplně za rubem opěrných zdí a jako výplň liniových drenáží. Tyto betony musí dosáhnout minimální pevnosti v tlaku 8 MPa při mezerovitosti 20 – 25 % při maximální hodnotě vodního součinitele 0,45. Tyto betony jsou řízeny českou státní normou ČSN 73 6124-2. [44]

### **2.3.1.6. Cementobetonové kryty**

K poslední skupině se řadí cementobetonové kryty, kde jde o provzdušněnou betonovou směs se sednutím kužele 50 – 90 mm, tedy konzistence S2. Návrh, výroba a doprava se provádí shodně s výrobou prostých betonů, kdy hutnění betonové záměsi probíhá strojově pomocí finišerů. Tyto betony jsou podle české státní normy ČSN 73 6123-1 rozřizeny do tří skupin CB I, CB II, CB III. Cementobetonové kryty jsou pokládány ve dvou vrstvách, kdy spodní je konstrukční a vrchní vrstva je obrusná). U těchto betonů je kladen důraz na odolnost betonu proti působení mrazu a chemických rozmrazovacích látek v zimě. [44]

Výzkumy provedené v posledních letech prokázaly, že trvanlivost povrchů popílkových silničních betonů a vliv popílků působící na beton obsahující kamenivo citlivé na alkálie, se ve všech kritériích (pevnost betonu v tlaku, objemová hmotnost, obsah vzduchových pórů) liší minimálně. Stěžejní výhodou pro betony s popílkem je především ekonomické a ekologické hledisko. [19], [44]

## **2.4. Požadavky na cementobetonové kryty v ČR**

### **2.4.1. ŘSD – Technické kvalitativní podmínky 18**

Beton pro silniční konstrukce je limitován předpisem 18 vydaným Ředitelstvím silnic a dálnic. V předpise jsou definovány podmínky pro možnosti použití cementu, kameniva, záměsové vody, přísad, příměsí, následují požadavky na čerstvý a ztvrdlý beton. [46]

#### 2.4.1.1. Cement

Cement je definován normami ČSN EN 206-1 a ČSN 73 2401 v případě předpjatých betonů. Betony namáhané chemickým prostředím XA2 a XA3 jsou používány cementy CEM I, kdy obsah  $C_3A$  nižší než 3 % a obsah  $Al_2O_3$  je nižší než 5 %, nebo je možné používat cementy směsné CEM III / B nebo CEM III / C, v případě, že je možné využít směsi 20 % popílku z hmotnosti cementů CEM I, CEM II – S, CEM II / A – LL, a nebo směsi s 10 % popílku z hmotnosti CEM II – T, CEM III / A. V ČSN EN 206 - 1 je definována přípustná odchylka pro vodní součinitel a obsah cementu, kdy obsah cementu by se neměl lišit v horní hranici o  $15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  a v dolní hranici by odchylka neměla být větší než  $10 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ . [46]

Požadavky na cement jsou takové, že nesmí obsahovat větší množství alkálií. Ekvivalent alkálií  $Na_2O + eq.$  je:  $Na_2O + 0,658 K_2O$ . Prostředí rozlišené podle vlhkosti působící na beton. [47]

#### 2.4.1.2. Kamenivo

Kamenivo, které by šlo použít do betonu je definováno normou ČSN EN 206-1 a ČSN EN 12 620 a jinými normami, které se týkají kameniva. Mezi speciální požadavky kameniva se řadí: kamenivo nesmí obsahovat reaktivní  $SiO_2$  i alkálie. [46]

V betonu se nesmí objevit kamenivo z horninových komplexů, které jsou známé výskytem maximálně nebo středně reaktivních hornin, nebo s nimi petrograficky příbuzné horniny, i přes to, že by průkazní zkoušky kameniva vyšly s minimální rizikovostí. Platí podmínka pro maximální obsah alkálií v CEM I 0,6 %  $Na_2O eq.$  a maximální obsah aktivních alkálií 2,5 kg  $Na_2O eq.$  na  $m^3$  betonu. [47]

Těžené ani drcené kamenivo, které je určené pro betonáž v prostředí XW, nesmí reagovat s alkáliemi obsažených v cementu, v přísadách a příměsích i v okolním prostředí. [47]

Výrobce betonů pro silniční stavby musí před zahájením výroby dle určité receptury zkontrolovat, zda certifikát používaného kameniva obsahuje potvrzení shody s požadavky české státní normy a těchto technických předpisů na kamenivo do betonu z hlediska vyloučení možnosti vzniku alkalické reakce kameniva. [47]

Mezi horniny s minimálním rizikem alkalické reakce se řadí horniny magmatické (žula, granodiorit, čedič, diabas, spilit, znělec), sedimentární (vápence bez přítomnosti rohvců, písek, štěrkopísek) i metamorfované (granulit, amfibolit, krystalický vápenec, hadec). [47]

Kamenivo obsahující do 2 % z celkového množství křemenný rohovec a jiné příbuzné křemítych hornin (mimo opál, tridymit, cristobalit) se považuje za odolné vůči alkalické reakci. [47]

Za maximálně rizikové horniny jsou považovány ty, které prokazatelně dosahují negativních zkušeností z hlediska alkalické reakce v betonu, při destrukci konkrétních staveb, kde bylo jasně definované kamenivo. [47]

Směs kameniva musí být navrhována tak, aby nedošlo k rozměšování, zejména při konzistenci S3 a S4. K tomu se dojde díky spojitě plynulé křivce. Pro pevnostní třídy betonu C 16 / 20 a vyšší smějí být použita právě ta kameniva, která mají plynulou křivku zrnitosti. U navrhovaných konstrukcí, u kterých je požadována odolnost proti působení vody, mrazu nebo CHRL, kamenivo použité u těchto betonů musí být mrazuvzdorné a musí vyhovovat ČSN EN 12 620, což musí být doloženo průkaznými zkouškami. Křivka zrnitosti u navrhované betonové směsi třídy C 30 / 37 a vyšší musí vyhovět mezím A a C. Mezi křivkami A a B by měla být křivka zrnitosti v oboru 0,125 – 4 mm, pokud navrhovaná betonová směs má za požadavky vodotěsnost, odolnost vůči chemickým rozmrazovacím látkám, lepší čerpatelnost a dobré pohledové vlastnosti. [46]

#### **2.4.1.3. Záměsová voda**

Záměsová voda se řídí českou státní normou ČSN EN 1008 a pro její použití se řídí ČSN EN 206-1. Navrhovaná betonová záměs pro prostředí XF1 – XF4 se nemohou používat recyklované vody, jelikož může obsahovat přísady nebo alkálie, které mohou nepříznivě ovlivňovat vlastnosti betonu. [46]

#### **2.4.1.4. Přísady**

Pro přísady v silničních betonech platí česká státní norma ČSN EN 934- 2 a pro zkoušení se uvádí norma ČSN EN 480 a pro použití v betonech se přísady

řídí českou státní normou ČSN EN 206-1. Vhodnost jednotlivých přísad případně jejich kombinace musí být ověřena průkaznými zkouškami, avšak přednost se dává přísadám odzkoušeným v praxi. Pokud to vyžaduje technologie stavby nebo pokud je to definováno v dokumentaci stavby, je možné použít přísady zpomalující tuhnutí a prodlužující dobu zpracovatelnosti. Nesmějí být používány zpomalovače tuhnutí na bázi odpadů z výroby sacharózy a kyseliny hydroxykarboxylové. Pro výrobu provzdušněného betonu musí být použita taková provzdušňovací přísada, která splňuje podmínky české státní normy ČSN EN 934-2. Při kombinaci provzdušňovací přísady se ztekucující přísady dochází ke snížení funkce provzdušnění, proto by se měly používat kvalitnější provzdušňovací přísady. U provzdušněných betonů by se mělo brát v úvahu i to, že 1 % objemu vzduchu obvykle snižuje pevnost o přibližně 3 % a povolené kolísání obsahu vzduchu je až + 3 % nad požadovaný minimální obsah vzduchu. U provzdušněných betonů lze dále předpokládat, že každé 1 % z objemu vzduchu ve ztuhnutém betonu znamená nahrazení jemných částic o přibližně 15 kg v 1 m<sup>3</sup>. [46]

#### **2.4.1.5. Příměsi**

Příměsi jsou anorganické a jemnozrné práškové minerály, které mají maximální zrna menší než 0,25 resp. 0,125 mm. Přidávají se z důvodu zlepšení reologie, dosažení speciálních vlastností betonu. Přidání příměsí do betonové záměsi zvyšuje množství záměsové vody. Příměsi jsou definovány českou státní normou ČSN EN 206-1. Vysokopeční struska musí svými hodnotami odpovídat příslušným shodným parametrům, zejména obsah chloridů dle české státní normy ČSN EN 450- 1 a ČSN EN 12 620. [46]

#### **2.4.1.6. XW3**

Jde o stupeň vlhkosti, týká se části betonových konstrukcí, které jsou mimo vlhké prostředí ještě dostatečně vystaveny dlouhodobému a častějšímu přísunu alkálií z vnějších zdrojů. XW3 se týká konstrukcí nebo jejich částí, které jsou vystavené působení mořské soli. Dále konstrukce průmyslových a zemědělských nebo jejich částí. Další možností jsou konstrukce vystavené prostředí podle

ČSN EN 206-1, XD1 – XD3, XS1 – XS3, XF2, XF4. Poslední variantou jsou konstrukce nebo jejich části, které jsou vystavené působení rozmrazovacích solí (letištní plochy, vozovky, konstrukce ostříkovány vodou, plochy v objektech určené k parkování vozidel, plochy pro mytí vozidel, nechráněné části mostních konstrukcí (pilíře, zdi, opěry, betonová svodidla, zákrytové římsy, protihlukové clony) které jsou ostříkovány vodou obsahující chemickou rozmrazovací látku do 15 metrů od hrany vozovky. [47]

#### **2.4.1.7. Provzdušnění cementobetonových krytů**

Pro odolnost ztvrdlých zkušebních vzorků se provádí zkouška pro stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu, kdy podle technických kvalitativních podmínek je stanoven součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů  $L = 0,24$  mm při návrhu prostředí XF2 a XF3, pro prostředí XF4 je rozložení vzduchových pórů  $L = 0,2$  mm. Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů je stanovováno českou státní normou ČSN EN 480-11. [46]

#### **2.4.2. ČSN EN 13 877 – 1 Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály**

Tato norma vychází z národních norem, ustanovení a předpisů, které jsou platné v daném státě. V případě, že neexistuje žádná evropská norma pro speciální složku betonu, která se zabývá výlučně použitím této složky do betonu, splňujícího požadavky EN 206- 1. [48]

U čerstvého betonu se vychází z norem, kterými jsou jednotlivé požadavky na složky obsažené v betonu definovány. Jak již bylo vypsáno na úvodních stránkách; cementy jsou definovány normou ČSN EN 197-1. [48]

Kamenivo do cementobetonových krytů musí splňovat požadavky definované v ČSN EN 12 620. V normě ČSN EN 13 877-1 je definováno maximální zrno kameniva odvíjející se od tloušťky cementobetonového krytu a od jeho vyztužení. V prvním případě nesmí být maximální velikost kameniva větší než  $1/3$  tloušťky vrstvy cementobetonového krytu. V druhém případě u spojitě vyztužených cementobetonových krytů nesmí být maximální velikost kameniva větší než  $1/3$  vzdálenosti mezi podélnými výztužnými prvky. [48]

Záměsová voda použitá při výrobě betonové směsi pro cementobetonové kryty vychází z normy ČSN EN 1008. [48]

Ostatní složky, které lze při navrhování betonové směsi použít, tedy přísady, příměsi a jiné materiály musí vyhovovat požadavkům uvedeným v ČSN EN 206-1. [48]

Zpracování čerstvého betonu a následně zkoušení vlastností na ztvrdlém betonu je odkázáno na normu ČSN EN 206-1 a příslušné normy jednotlivých zkoušek. [48]

Obecně, pokud neexistuje evropská norma pro určitý materiál, týkající se výlučně použití toho materiálu do cementobetonových krytů, vhodnost jeho použití musí být potvrzena, buď evropským technickým schválením, které se týká výlučně použití tohoto materiálu nebo příslušnými národními normami nebo ustanoveními platnými v místě použití betonu, které se týkají výlučně použití tohoto materiálu. [48]

### **2.4.3. Legislativa zahraničí**

V Evropě jsou pucolány do betonových záměsí přidávány formou doplňku do směsných cementů, i přesto, že jednotlivé doplňky (příměsi) jsou definovány v evropských normách, kdy například popílek je definován normou EN 450, pro vysokopecní granulovanou strusku platí norma EN 15167-1. V Severní Americe, ale i na mnoha jiných místech jsou pucolány přidávány jako samostatná složka k cementu. Výhodou tohoto přístupu je, že výrobce betonu lze nastavit konkrétní vlastnosti, jako jsou nízké hydratační teplo, odolnost vůči sulfátům, eliminování alkalicko-křemičité reakce. [49], [50], [51], [52]

V kanadských normách CSA dříve používaly přístup amerických norem ASTM, kdy rozdělují popílek podle obsahu  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ , který musí být vyšší než 70 %. To znamená, že popílký podle ASTM se řadí do třídy F, tedy mezi křemičité. V případě, že součet zmíněných sloučenin je nižší než 50 %, jsou popílký řazeny do třídy C, které mají zároveň i vyšší obsah CaO. Třída popílků F vznikla z uhlí smíchaného s jíly nebo jinými hlinitokřemičitany, avšak popílek typu C mohou také mít cementové vlastnosti, jelikož některé obsahují  $\text{C}_2\text{S}$  a/nebo  $\text{C}_3\text{A}$  a jiné minerály. Od roku je v kanadských normách CSA A3001 popílek rozdělen do tří kategorií založených na obsahu CaO. V současné době, třída F, tento

popílek může mít až 15 % CaO, druhá třída CI obsahuje 15 – 20 % CaO a třetí kategorie CH obsahuje více než 20 % CaO. Tato změna byla provedena, jelikož bylo zjištěno, že použití popílků s nízkým obsahem CaO zlepšuje jak odolnost vůči sulfátům, tak i eliminuje alkalicko-křemičitou reakci, kdy naopak popílků s vysokým obsahem CaO mají opačný účinek, tedy zhoršují odolnost vůči sulfátům a alkalicko-křemičité reakci. Klasifikace CSA CI byl vytvořen, pro některé popílků v této třídě, kdy je za potřebí chemický rozbor a ověření trvanlivosti nebo vývinu počátečních pevností. Přijmout toto rozdělení ve specifikaci ASTM C 618 selhaly. [49], [50], [51], [52]

U ASTM C 618 třídy F a u normy pro popílek EN 450 je požadováno, aby součet oxidů byl vyšší než 70 %, ale zároveň obsah reaktivního SiO<sub>2</sub> musí být vyšší než 25 % a reaktivní CaO nesmí být vyšší než 10 %. Zároveň jsou definovány limity i pro MgO, fosfor, alkálie, chloridy, SO<sub>3</sub> a volného vápna. [49], [50], [51], [53]

V současné době podle ASTM C618 jsou pevnosti v tlaku zjištěny lepší u zkušebních vzorků s 20 hmotnostních % popílků místo portlandského cementu tak, že pevnost v tlaku po 28 dnech bude minimálně 75 % a po 90 dnech bude pevnost v tlaku na hodnotě minimálně 85 %. Ve srovnání se vzorky z čistě portlandského cementu. Jakékoliv minerální plnivo mleté na stejnou velikost zrn jako jsou zrna popílků, nemá potřebně velká zrna pro urychlení hydratace, naopak takto upravená zrna slouží jako inertní příměs. Vzhledem k nedostatku uspokojivých zkušebních metod nebo na základě přijetí vhodnějších zkušebních mezí, v CSA A3001 je zkouška pevnosti a aktivita byla nepovinná. Předpokládá se, že výrobce betonu při jeho návrhu bude vycházet ze zkušeností a vlastností tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností. [49], [51], [54], [55], [56]

V Severní Americe nebyly v posledních letech standardy strusky významně změněny. Nicméně pokud je struska používána jako příměs do betonových záměsí neměl by obsah Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> víc než 11 %. Po překročení této hodnoty dochází ke snížení odolnosti vůči síranům a negativně ovlivňuje vlastnosti čerstvého betonu. Jelikož granulované strusky jsou rozemlety na prášek, kdy síran vápenatý může být přidán v průběhu tohoto procesu, s cílem optimalizovat nastavení a vývoj počátečních pevností. [57]

Kanadská norma CSA A3001 má dvě kategorie křemičitých úletů. V první kategorii jsou křemičité úlety s obsahem siliky vyšším než 85 %, ale z důvodu

omezené dostupnosti existuje druhá kategorie, ve které křemičité úlety obsahují více než 75 %  $\text{SiO}_2$ . Mikrosilika je charakteristická vysokou pucolánovou reakcí. [49]

Přírodní pucolány, které jsou zahrnuty v ASTM C618 jako třída N, jsou v Severní Americe ve stále větším zájmu, avšak s omezenou dostupností kvalitních příměsí v určitých zeměpisných oblastech. Problémem je to, že současné limity v C618 může být dosaženo u jakéhokoliv materiálu, i když je zcela inertní v cementovém systému. [49]

V některých oblastech, se již tradiční příměsí nevyrábí, ale kaolinitické a nižší stupeň kaolinitické jíly jsou hojné v mnoha částech světa, včetně, Brazílii, Indii a Číně, výzkum je podniknut na podporu využití vápence, kalcinovaný jíl, slinku směsných cementů. Bylo zjištěno, že dobré výsledky byly dosaženy s 50 % slinku, nebo méně, a jílu, která má alespoň 50 % kaolinitu. [58], [59]



### 3. Praktická část

V současném dopravním stavitelství se výrazně prosazují provzdušněné betony pro prostředí XF3 a XF4. Při výrobě těchto betonů se používají výhradně cementy CEM I 42,5 bez různých typů aktivních příměsí. Nespornými výhodami těchto příměsí jsou ekonomické hledisko a možnost kladně ovlivnit trvanlivost betonů v prostředí XF4. V ČR je takovéto využívání příměsí omezené a není k dispozici obsáhlý soubor zkoušek a praktických zkušeností.

Praktická část je rozdělena do několika úseků. První pojednává o návrhu receptury referenčního betonu C 30 / 37 pro prostředí XF4 a konzistenci S3 s optimálním provzdušněním. K této receptuře byly navrženy receptury, ve kterých byla část cementu nahrazena různými procentuálními náhradami z vybraných aktivních příměsí. Vybraný cement CEM I 42,5 R byl z 10 %, 20 % a 30 % nahrazen vysokoteplotním elektrárenským popílkem z Dětmovic, vysokopeční granulovanou struskou Štramberk a vápencem. Z 5 % a 10 % byl cement CEM I 42,5 R nahrazen metakaolinem a železato-vápenatým křemičitým úletem z OFZ Istebné.

Pro namíchání veškerých zkušebních betonových záměsí byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrý, kamenivo 0 – 4 z Žabčic a 8 – 16 z Olbramovic, přísadami ve všech betonových záměsí byla plastifikační přísada CHRYSOplast 760 a provzdušňovací přísadu CHRYSO Air A s již výše zmíněnými příměsemi.

Dalším krokem byla výroba betonové směsi a následné provedení zkoušek. Na čerstvém betonu byla zkoušena konzistence sednutím kužele podle české státní normy ČSN EN 12 350- 2, měření obsahu vzduchu tlakovou metodou podle české státní normy ČSN EN 12 350- 7 a objemová hmotnost dle české státní normy ČSN EN 12 350-6. Českou státní normou ČSN EN 12 390-2 je definována výroba a ošetřování zkušebních těles. Celkem bylo naplněno čerstvou betonovou záměsí 13 krychlí o délce hrany 150 mm.

Následným krokem bylo odformování všech vyrobených zkušebních těles po 24 hodinách a jejich uložení do zracího prostředí. 6 krychlí bylo umístěno do vodního prostředí a 7 jich bylo uloženo ve vlhkém prostředí. Po  $(28 \pm 1)$  dnech proběhly zkoušky na ztvrdlých betonových vzorcích. Na krychlích byla stanovena objemová hmotnost dle české státní normy ČSN EN 12 390-7 a následně měřena

pevnost betonu v tlaku dle české státní normy ČSN EN 12 390-3 a příprava těles na zkoušku stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metoda A – metoda automatického cyklování podle české státní normy ČSN 73 1326. Na druhé sadě vzorků byly zkoušky pro stanovení objemové hmotnosti, pevnosti betonu v tlaku a příprava těles pro stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek uskutečněny po  $(90 \pm 1)$  dnech. Po 90 dnech byla od každé záměsi přichystána jedna krychle pro přípravu vzorků pro stanovení obsahu vzduchu v zatvrdlém betonu podle české státní normy ČSN EN 480-11.

Posledním krokem bylo následné vyhodnocení naměřených hodnot.

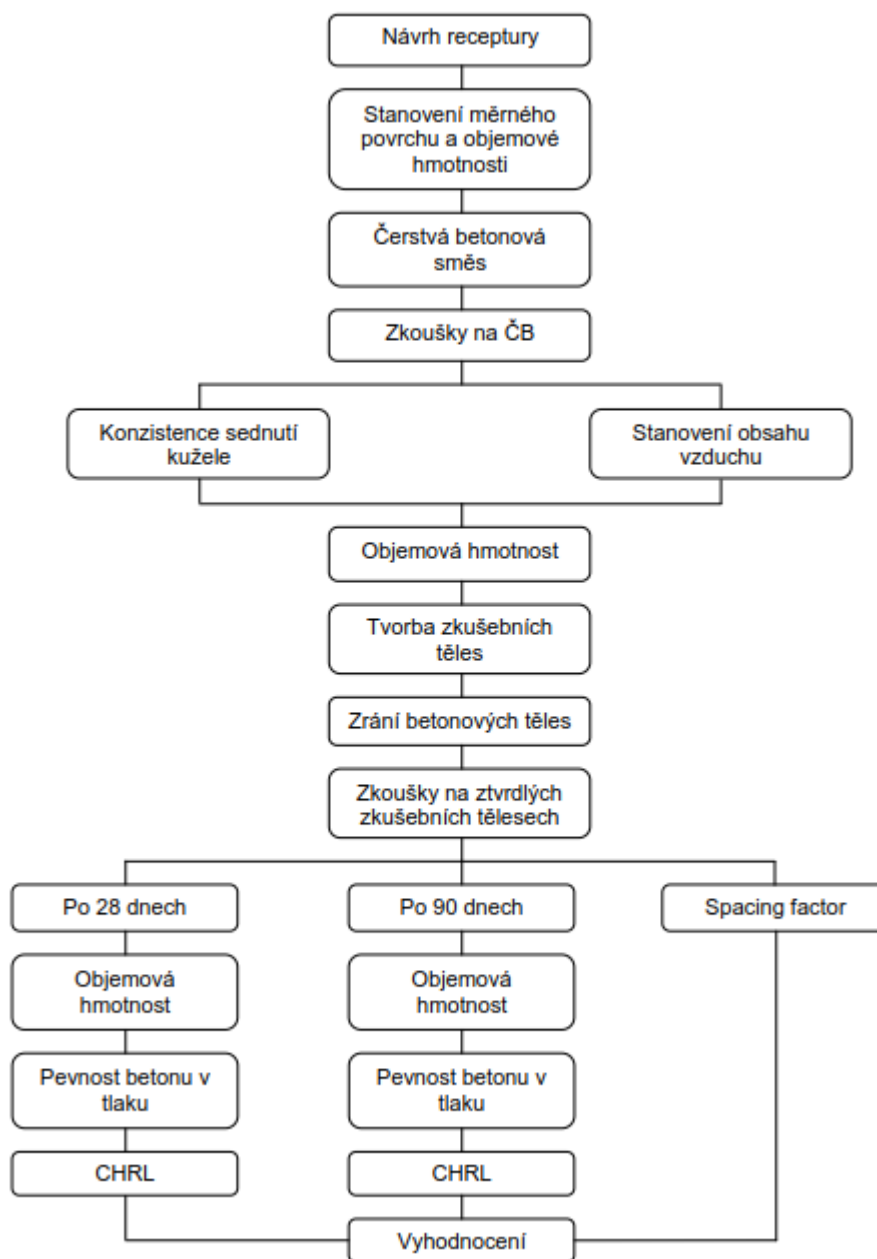
### **3.1. Metodika práce**

Po zvolení příměsí, kterými byl cement nahrazován, byly navrženy zkušební záměsi na výrobu 13 zkušebních těles, tedy 45 litrů. Dále byla pyknometricky stanovena měrná hmotnost a pomocí Blainovy metody měrný povrch příměsí. Správná receptura byla vyzkoušena na záměsech o objemu 10 litrů. Po stanovení optimálního množství provzdušňovací a plastifikační příměsi se pokračovalo v míchání jednotlivých záměsí.

Na každé z vytvořených čerstvých betonových záměsí byla stanovena konzistence sednutím kužele, obsah vzduchu a objemová hmotnost. Následně bylo vytvořeno 13 zkušebních těles (krychle o velikosti hrany 150 x 150 x 150 mm), kdy po odformování bylo 6 krychlí uloženo ve vodním prostředí a 7 krychlí ve vlhkém prostředí. Po 28 dnech byla na 3 krychlích z vodního prostředí stanovována odolnost vůči chemickým látkám během zmrazování / rozmrazování a na třech krychlích z vlhkého prostředí byla stanovena objemová hmotnost a pevnost betonu v tlaku. Tento sled zkoušek byl zopakován i po 90 dnech. Zbylá krychle od každé záměsi sloužila pro stanovení charakteristik vzduchových pórů v zatvrdlém betonu.

Získané výsledky byly zpracovány do přehledných tabulek a vyhodnoceny pomocí grafického znázornění.

## Grafické znázornění metodiky práce:



Graf 1: Metodika práce

### 3.2. Jednotlivé složky použité v betonových záměsech

Bylo vytvořeno 14 záměsí, kdy ve všech záměsech byl totožný cement, kamenivo 0 - 4 mm a 8 - 16 mm, plastifikační a provzdušňovací přísada. Každá záměs se lišila příměsí a jejím dávkováním.

#### 3.2.1. Cement

V záměsi byl použit cement CEM I 42,5 R z cementárny Mokrá, který musí vyhovovat české státní normě ČSN EN 197-1. Vlastnosti cementu jsou popsány v příloze č. 5.

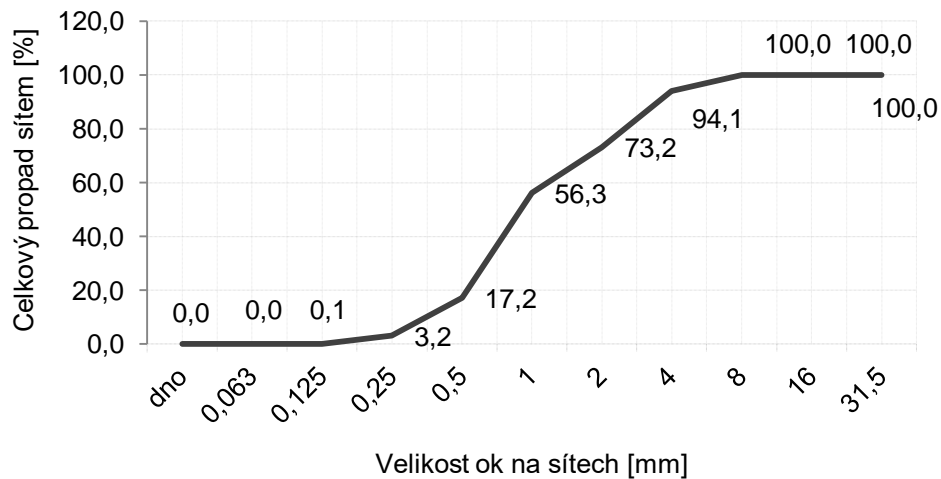
#### 3.2.2. Kamenivo

Bylo použito kamenivo 2 frakcí. První frakcí bylo těžené prané kamenivo 0 - 4 mm z Žabčic a drcené kamenivo o frakci 8 - 16 z Olbramovic. Vlastnosti obou druhů kameniv jsou popsány v příložených technických listech (příloha 3 a 4). Na obou vybraných druzích kameniva byl proveden síťový rozbor o navážce 1 200 g dle české státní normy ČSN EN 933-2.

Tabulka 3: Síťový rozbor – Žabčice, frakce 0-4 mm

Rozměry ok na sítích [mm]	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Dno
Hmotnost dílčího zbytku [g]	0,0	0,0	0,0	70,7	250,4	202,8	469,2	168,0	37,2	1,2	0,0
Dílčí zbytek na síť [%]	0,0	0,0	0,0	5,9	20,9	16,9	39,1	14,0	3,1	0,1	0,0
Celkový zbytek na síť [%]	0,0	0,0	0,0	5,9	26,8	43,7	82,8	96,8	99,9	100,0	100,0
Celkový propad sítím [%]	100,0	100,0	100,0	94,1	73,2	56,3	17,2	3,2	0,1	0,0	0,0

### Žabčice, frakce 0-4 mm

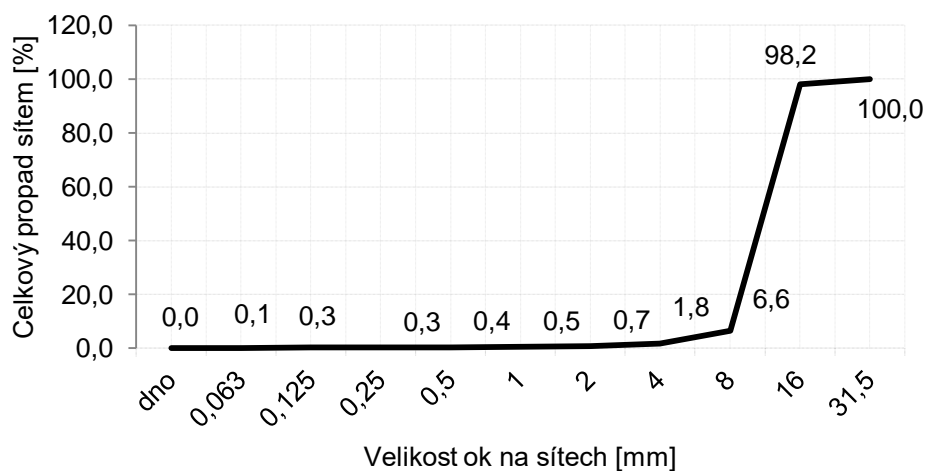


Graf 2: Sítový rozbor – Žabčice, frakce 0-4 mm

Tabulka 4: Sítový rozbor – Olbramovice, frakce 8-16 mm

Rozměry ok na sítěch [mm]	31,5	16	8	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	Dno
Hmotnost dílčího zbytku [g]	0,0	21,6	1099,2	57,6	13,2	2,4	1,2	0,09	0,23	2,4	1,2
Dílčí zbytek na sítě [%]	0,0	1,8	91,6	4,8	1,1	0,2	0,1	0,075	0,019	0,2	0,1
Celkový zbytek na sítě [%]	0,0	1,8	93,4	98,2	99,3	99,5	99,6	99,7	99,7	99,9	100
Celkový propad sítím [%]	100,0	98,2	6,6	1,8	0,7	0,5	0,4	0,3	0,3	0,1	0,0

### Olbramovice, frakce 8-16 mm



Graf 3: Sítový rozbor – Olbramovice, frakce 8-16 mm

### 3.2.3. Voda

Voda použitá při míchání betonu musí vyhovovat podmínkám stanoveným v české státní normě ČSN EN 1008. Jelikož byla použita voda z vodovodního řadu, nebylo nutné provádět zkoušky pro ověření její kvality.

### 3.2.4. Přísady

Jelikož se betonové záměsi navrhovaly pro prostředí XF4, byla navržena provzdušňovací přísada CHRYSO® Air A. Její vlastnosti jsou popsány v příložené příloze č. 1. Do každé záměsi byla přidána i ztekucující přísada pro zlepšení zpracovatelnosti betonové směsi CHRYSO® Plast 760, podrobněji popsána v příloze č. 2.

### 3.2.5. Příměsi

Bylo navrženo pět druhů příměsí, které se lišily ve svém dávkování. Zvoleny byly vysokoteplotní popílek Dětmárovice, vysokopeční granulovaná struska Štramberk, mikromletý vápenec Štramberk, tyto záměsi nahrazovaly cement z 10 %, 20 % a 30 %. Dalšími zvolenými příměsmi byl metakaolin a železato-vápenaté křemičité úlety, kterými byl cement nahrazován z 5 % a 10 %. Na jednotlivých příměsích byl stanovena objemová hmotnost a měrný povrch dle Blaina.

#### 3.2.5.1. Vysokoteplotní popílek Dětmárovice

Vzhledem k umístění elektrárny je hlavním zdrojem spalování černé uhlí z Ostravsko-karvinské pánve. 90 % z toho co elektrárna vyprodukuje, jsou popeloviny, které jsou certifikovány a dále využívány. Elektrárenský popílek musí vyhovovat požadavkům daných normou ČSN EN 450-1. [60]

Tabulka 5: Průměrné složení vysokoteplotního popílku Dětmárovice [61]

Složka	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>
Hm. %	52,40	24,20	4,00	6,40	2,80	2,80	0,10	0,30	0,40	0,00	1,00

Tabulka 6: Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu

Objemová hmotnost [g · cm <sup>-3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
2,11	3 360

### 3.2.5.2. Vysokopecní granulovaná struska Štramberk

Vybraná struska vznikla semletím vysušené vysokopecní granulované struky, která splňuje požadavky české státní normy ČSN EN 197-1. [62]

Tabulka 7: Průměrné mineralogické složení strusky Štramberk

Složka	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	S <sub>celk.</sub>
Hm. %	37,90	5,80	40,00	11,90	0,60	0,70

Tabulka 8: Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu

Objemová hmotnost [g · cm <sup>-3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
2,84	3 760

### 3.2.5.3. Jemně mletý vápenec Štramberk

Štramberský vápenec je charakteristický vysokou čistotou jurského vápence, který je jemně semlet a musí odpovídat parametrům dané normy ČSN 72 1210-20. [63]

Tabulka 9: Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu

Objemová hmotnost [g · cm <sup>-3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
2,68	2 760

### 3.2.5.4. Metakaolin

Tato účelně vyráběná surovina má rozmanité složení, které musí vyhovovat normě ČSN EN 206-1. Metakaolin vzniká při kalcinaci kaolinitu.

Tabulka 10: Průměrné mineralogické složení metakaolinu

Složka	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ti <sub>2</sub> O	MnO	Zbytek
Hm. %	51,83	3,03	39,77	1,49	0,23	stopově	0,55	0,85	0,09	stopově

Tabulka 11: Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu

Objemová hmotnost [g · cm <sup>-3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
2,47	10 170

### 3.2.5.5. Křemičité úlety

Jako předcházející metakaolin, musí křemičité úlety splňovat požadavky definované normou ČSN EN 206-1. Křemičité úlety mají velmi široké rozmezí měrného povrchu, proto je měrný povrch určen dle Blaina.

*Tabulka 12: Průměrné mineralogické složení železnato-vápenná mikrosilika*

Složka	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Cl	SO <sub>3</sub>	C	LOI
Hm. %	71,65	18,17	0,70	1,19	1,95	0,52	1,14	0,14	0,10	2,39	1,21

*Tabulka 13: Zjištěné hodnoty objemové hmotnosti a měrného povrchu*

Objemová hmotnost [g · cm <sup>-3</sup> ]	Měrný povrch [cm <sup>2</sup> · g <sup>-1</sup> ]
2,06	13 200



### 3.3. Složení jednotlivých záměsí

Tabulka 14: Označení jednotlivých záměsí a jejich specifikace

Záměs	Používané označení	Specifikace
Záměs I	Referenční	Referenční beton provzdušněný
Záměs II	Popílek 10 %	Cement v záměsí z 10 % nahrazen vysokoteplotním popílkem z Dětmovic
Záměs III	Popílek 20 %	Cement v záměsí z 20 % nahrazen vysokoteplotním popílkem z Dětmovic
Záměs IV	Popílek 30 %	Cement v záměsí z 30 % nahrazen vysokoteplotním popílkem z Dětmovic
Záměs V	Struska 10 %	Cement v záměsí z 10 % nahrazen vysokopeční struskou Štramberská
Záměs VI	Struska 20 %	Cement v záměsí z 20 % nahrazen vysokopeční struskou Štramberská
Záměs VII	Struska 30 %	Cement v záměsí z 30 % nahrazen vysokopeční struskou Štramberská
Záměs VIII	Vápenec 10 %	Cement v záměsí z 10 % nahrazen jemně mletým vápencem Štramberská
Záměs IX	Vápenec 20 %	Cement v záměsí z 20 % nahrazen jemně mletým vápencem Štramberská
Záměs X	Vápenec 30 %	Cement v záměsí z 30 % nahrazen jemně mletým vápencem Štramberská
Záměs XI	Metakaolin 5 %	Cement v záměsí z 5 % nahrazen jemně mletým metakaolinem
Záměs XII	Metakaolin 10 %	Cement v záměsí z 10 % nahrazen jemně mletým metakaolinem
Záměs XIII	Křemičitý úlet 5 %	Cement v záměsí z 5 % nahrazen železnato-vápenatým křemičitým úletem
Záměs XIV	Křemičitý úlet 10 %	Cement v záměsí z 10 % nahrazen železnato-vápenatým křemičitým úletem

Tabulka 15: Záměs I (referenční)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	375
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	158
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Provzdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33

*Tabulka 16: Záměs II (10 % vysokoteplotního popílku)*

<b>Složky</b>	<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>
CEM 42,5 R, Mokrý	337,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	162
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 10 % vysokoteplotní popílek Dětmárovice	37,5

*Tabulka 17: Záměs III (20 % vysokoteplotního popílku)*

<b>Složky</b>	<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>
CEM 42,5 R, Mokrý	300
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	167
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 20 % vysokoteplotní popílek Dětmárovice	75

*Tabulka 18: Záměs IV (30 % vysokoteplotního popílku)*

<b>Složky</b>	<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>
CEM 42,5 R, Mokrý	262,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	160
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 30 % vysokoteplotní popílek Dětmárovice	112,5

*Tabulka 19: Záměs V (10 % vysokopecní struska)*

<b>Složky</b>	<b>1 m<sup>3</sup> [kg]</b>
CEM 42,5 R, Mokrý	337,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	162
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 10 % vysokopecní struska Štramberská	37,5

Tabulka 20: Záměs VI (20 % vysokopecní struska)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	300
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	164
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 20 % vysokopecní struska Štramberk	75

Tabulka 21: Záměs VII (30 % vysokopecní struska)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	262,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	164
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 30 % vysokopecní struska Štramberk	112,5

Tabulka 22: Záměs VIII (10 % jemně mletý vápenec)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	337,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	153
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 10 % jemně mletý vápenec	37,5

Tabulka 23: Záměs IX (20 % jemně mletý vápenec)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	300
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	167
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 20 % jemně mletý vápenec	75

Tabulka 24: Záměs X (30 % jemně mletý vápenec)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	262,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	167
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 30 % jemně mletý vápenec	112,5

Tabulka 25: Záměs XI (5 % metakaolin)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	356,3
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	164
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 5 % jemně mletý metakaolin	18,7

Tabulka 26: Záměs XII (10 % metakaolin)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	337,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	173
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 10 % jemně mletý metakaolin	37,5

Tabulka 27: Záměs XIII (5 % křemičitých úletů)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrý	356,3
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	180
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Prozdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 5 % železnato-vápenatého křemičitého úletu	18,7

Tabulka 28: Záměs XIV (10 % křemičitých úletů)

Složky	1 m <sup>3</sup> [kg]
CEM 42,5 R, Mokrá	337,5
Drobné těžené kamenivo 0 – 4 mm, Žabčice	800
Hrubé drcené kamenivo 8 – 16 mm, Olbramovice	915
Voda	176
Plastifikační přísada CHRYSOplast 760	3
Provzdušňovací přísada CHRYSO Air A	0,33
Příměs: 10 % železnato-vápenatého křemičitého úletu	37,5

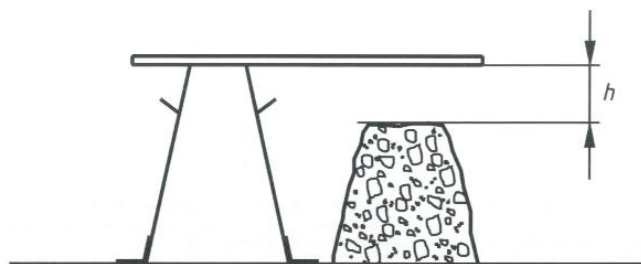
### 3.4. Výsledky zkoušek po 28 a 90 dnech

#### 3.4.1. Stanovení konzistence

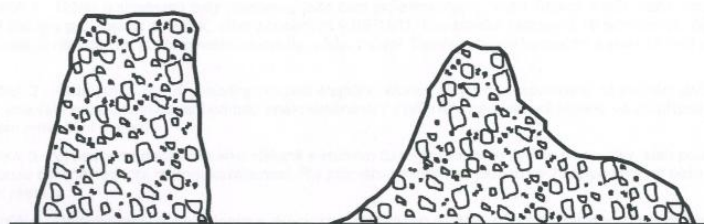
Tato zkouška byla provedena podle české státní normy ČSN EN 12 350-2., kdy se na podložku postaví Abramsův kužel, přišlápne se k podložce a naplní se ve 3 vrstvách. Každá vrstva se zhutní rovnoměrně 25 vpichy hutnicí tyčí. Druhá a třetí vrstva se zhutní přes celou výšku vrstvy tak, aby vpichy zasahovaly do předchozí vrstvy. Poslední vrstva se plní přes okraj. Odstraní se násypka, zarovná se povrch hutnicí tyčí a podložka se očistí od betonu. Kužel se přitlačí k podložce a pak se plynule svisle zvedá, doba zvedání je 2 – 5 s. Proveďte se odečtení rozdílů výšek nejvyššího bodu sednutého kužele a formy (podle obrázku 4) se zaokrouhlením na 10 mm a určí se konzistence (tabulka 29) Celá zkouška, od plnění formy až po její zvednutí, musí proběhnout do 150 s. Zkouška se provede dvakrát.

Tabulka 29: Sednutí kužele

Sednutí kužele [mm]	
S1	10 - 40
S2	50 – 90
S3	100 – 150
S4	160 – 210
S5	220 +



Obrázek 1 – Měření sednutí



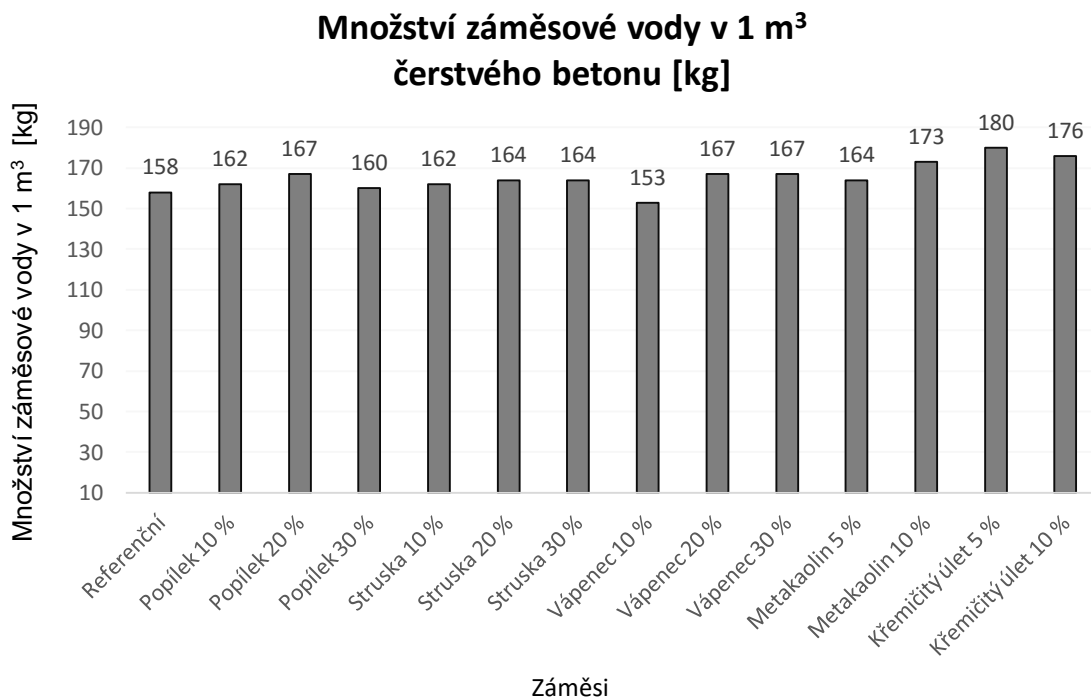
a) Správné sednutí

b) Usmyknuté sednutí

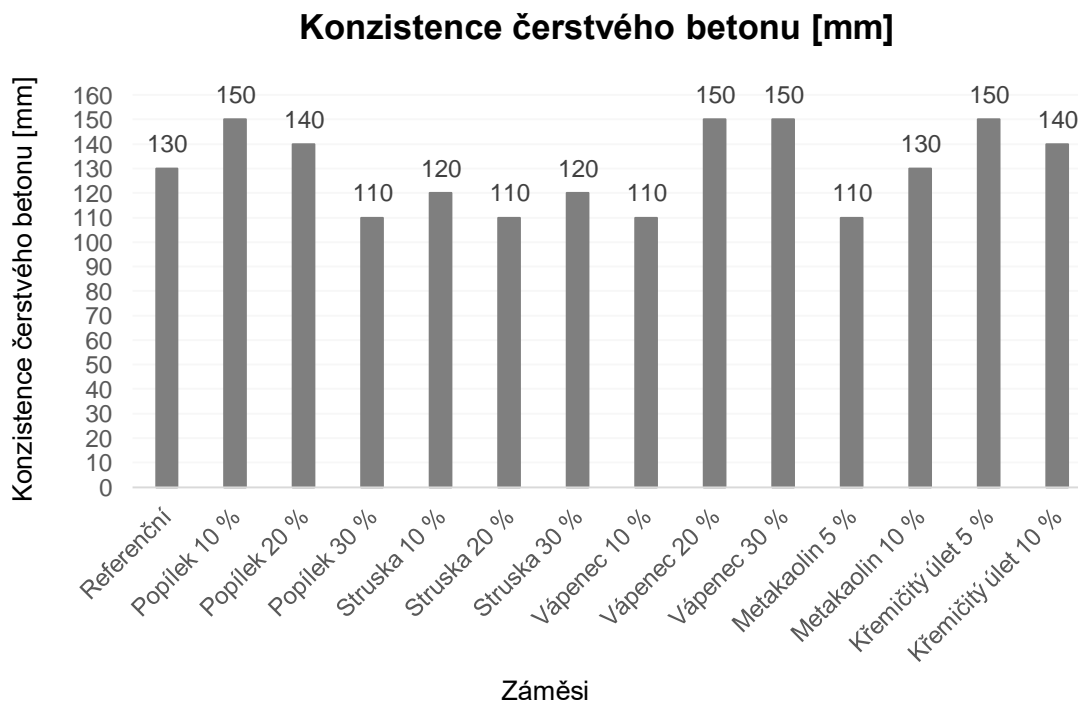
Obrázek 4: Ukázka měření konzistence čerstvého betonu a správného a špatného sednutí

Tabulka 30: Naměřené hodnoty konzistence betonu ihned po zamíchání

Označení záměsi	Množství záměsové vody v 1 m <sup>3</sup> [kg]	Sednutí kuželu ihned po zamíchání [mm]	Zařazení (podle tabulky 29)
Referenční	158	130	S3
Popílek 10 %	162	150	S3
Popílek 20 %	167	140	S3
Popílek 30 %	160	110	S3
Struska 10 %	162	120	S3
Struska 20 %	164	110	S3
Struska 30 %	164	120	S3
Vápenec 10 %	153	110	S3
Vápenec 20 %	167	150	S3
Vápenec 30 %	167	150	S3
Metakaolin 5 %	164	110	S3
Metakaolin 10 %	173	130	S3
Křemičitý úlet 5 %	180	150	S3
Křemičitý úlet 10 %	176	140	S3



Graf 4: Množství záměsové vody v 1 m<sup>3</sup> čerstvého betonu



Graf 5: Znázornění konzistence betonových záměsí

### **Vyhodnocení:**

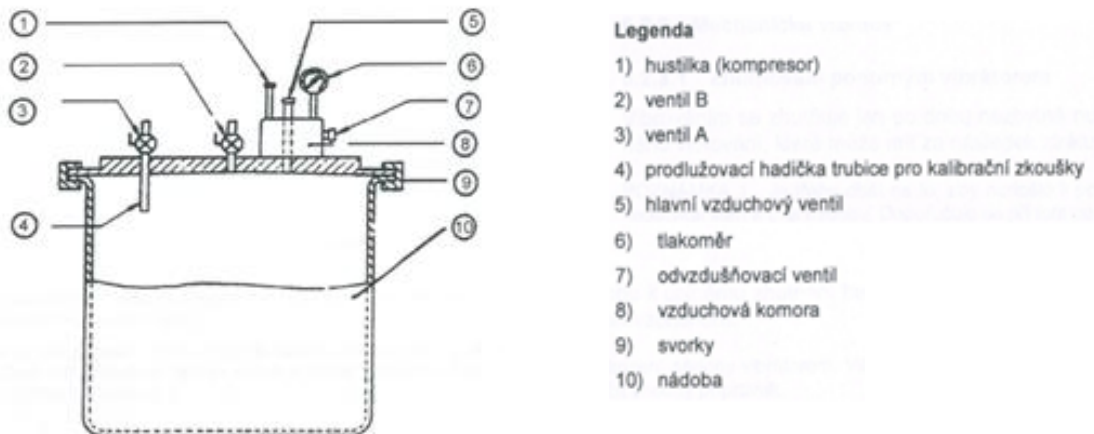
Při navrhování jednotlivých receptur bylo cílem dosáhnout konzistence čerstvé betonové směsi S3, tedy sednutí kužele v rozmezí 100 – 150 mm. Během míchání betonové směsi bylo množství vody upravováno, aby bylo dosaženo požadované konzistence. Z tohoto důvodu není možné posuzovat závislost množství použitých příměsí na reologii betonové směsi. Konzistence S3, tedy sednutí kužele v rozmezí 100 – 150 mm bylo splněno u všech míchaných záměsí.

#### **3.4.2. Stanovení obsahu vzduchu tlakovou metodou**

Tato metoda byla prováděna podle české státní normy ČSN EN 12 350 – 7, ve které je popsána nádoba i postup zkoušky. Nádoba používaná na tuto zkoušku musí být z tvrdého kovu, který nereaguje s cementovou kaší o minimálním objemu 5 litrů a poměrem průměru k výšce v rozmezí od 0,75 – 1,25. Vnitřní povrch nádoby musí být spolu s horní hranou hladce opracovány. Tato nádoba se naplní betonem ve dvou nebo třech vrstvách, kdy každá z vrstev je hutněna na vibračním stole, po co nejkratší dobu k docílení úplného zhutnění betonové směsi. Je nutné nádobu naplnit tak, aby se nemusel odstraňovat přebytečný beton. Povrch betonu v nádobě se uhladí hladítkem a příruba nádoby a víka se důkladně očistí. Po neprodyšném upevnění nádoby a víka svorkami, se uzavře hlavní ventil vzduchu a otevřou se vedlejší ventily, kdy do jednoho je vstříčkou vstříkována voda do té doby, dokud z druhého ventilu nevytéká souvislý proud čiré vody. Lehce se poklepe paličkou po nádobě, aby se odstranily vzduchové bubliny mezi betonem a nádobou. Vypouštěcí ventil se uzavře a otevře se hlavní ventil, kterým se do komory pumpuje vzduch tak dlouho, dokud ručička na tlakoměru neukáže počáteční hodnotu tlaku a pak se uzavře. Uzavře se druhý vedlejší ventil a několik sekund se vyčká, následně se otevře hlavní ventil a za ostrého poklepávání na nádobu a lehkého poklepávání na tlakoměr se odečte hodnota tlaku na tlakoměru. Před sejmutím víka se otevřou oba vedlejší ventily.

Obsah vzduchu se vyjádří v procentech zaokrouhlený na nejbližší 0,1 %.

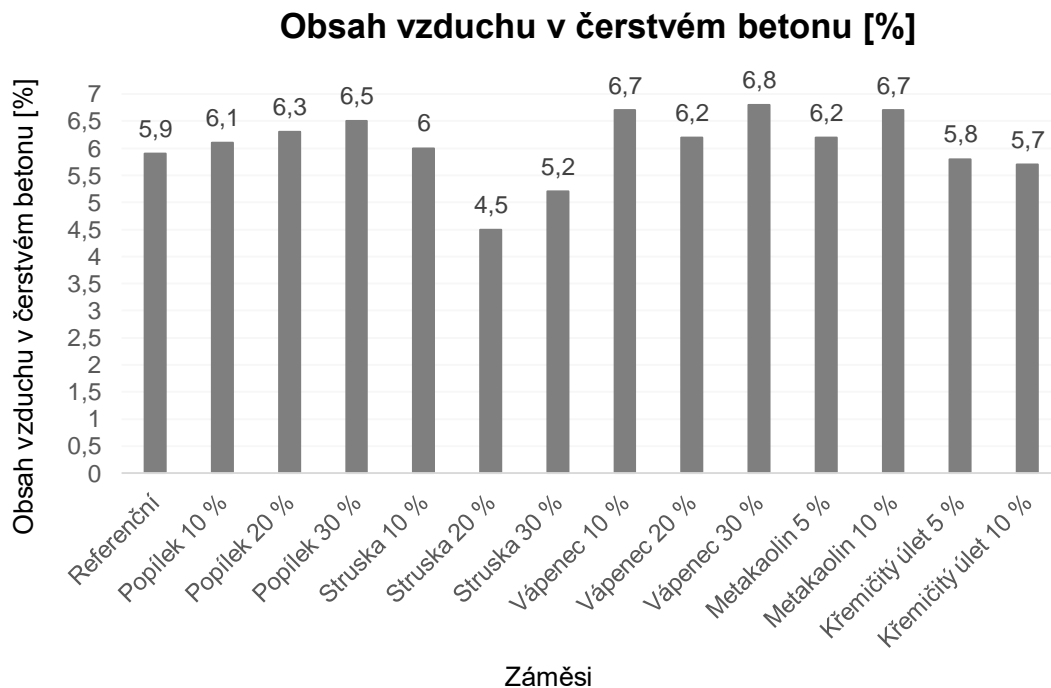




Obrázek 5: Tlakový hrnec pro zkoušku obsahu vzduchu v čerstvé betonové záměsi

Tabulka 31: Obsah vzduchu v čerstvé betonové záměsi ihned po zamíchání

Označení záměsi	Obsah vzduchu ihned po zamíchání [%]
Referenční	5,9
Popílek 10 %	6,1
Popílek 20 %	6,3
Popílek 30 %	6,5
Struska 10 %	6,0
Struska 20 %	4,5
Struska 30 %	5,2
Vápenec 10 %	6,7
Vápenec 20 %	6,2
Vápenec 30 %	6,8
Metakaolin 5 %	6,2
Metakaolin 10 %	6,7
Křemičitý úlet 5 %	5,8
Křemičitý úlet 10 %	5,7



*Graf 6: Obsah vzduchu v čerstvé betonové směsi*

### **Vyhodnocení:**

Obsah vzduchu u neprovzdušněného betonu je normou limitován do 2 %, u provzdušněných betonů je horní hranice obsahu vzduchu zvýšená a má se pohybovat od 4 – 6 %. Rozdílný obsah vzduchu v čerstvém betonu může být způsoben délkou a způsobem míchání, intenzitou hutnění. Dalším nezanedbatelným vlivem na obsah vzduchu v čerstvém betonu může mít i způsob dávkování během samotného míchání.

Do každé záměsí bylo přidáno stejné množství provzdušňovací přísady, avšak v rozmezí dané normou vyhověla polovina čerstvých betonových směsí. Druhá polovina tento požadavek mírně převyšuje, zhruba o necelé procento. Vyšší hodnoty vzduchu v betonových záměsech jsou připisovány nedostatečné době hutnění jednotlivých záměsí.

### **3.4.3. Stanovení objemové hmotnosti čerstvého a ztvrdlého betonu**

U čerstvého betonu se objemová hmotnost stanovuje podle české státní normy ČSN EN 12 350 – 6 výpočtem tak, že se nádoba známého objemu a hmotnosti naplní čerstvou betonovou směsí, zhutní se a následně se zváží.

Zjištěná hmotnost betonové směsi se vydělí objemem naplněné nádoby. Objemová hmotnost čerstvé betonové směsi se vypočte podle vztahu (4).

$$D = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (4)$$

Kde je  $D$  – objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $m_1$  – hmotnost prázdné nádoby [kg],  $m_2$  – hmotnost naplněné nádoby betonem [kg],  $V$  – objem nádoby [ $\text{m}^3$ ].

Podle české státní normy ČSN EN 12 390 – 7 lze objemová hmotnost ztvrdlého betonu stanovit třemi způsoby. Zkušební těleso, jak bylo dodáno, nasyceno vodou (alespoň 2 dny ve vodě) nebo vysušeno v sušárně. Stanovení objemu je možné buď pomocí hydrostatického vážení (ponoření zkušebního tělesa do vody); výpočtem z kontrolovaných jmenovitých rozměrů (u krychlí); nejčastějším způsobem je výpočet (5) ze změřených skutečných rozměrů, následně se tělesa postupně zvaží.

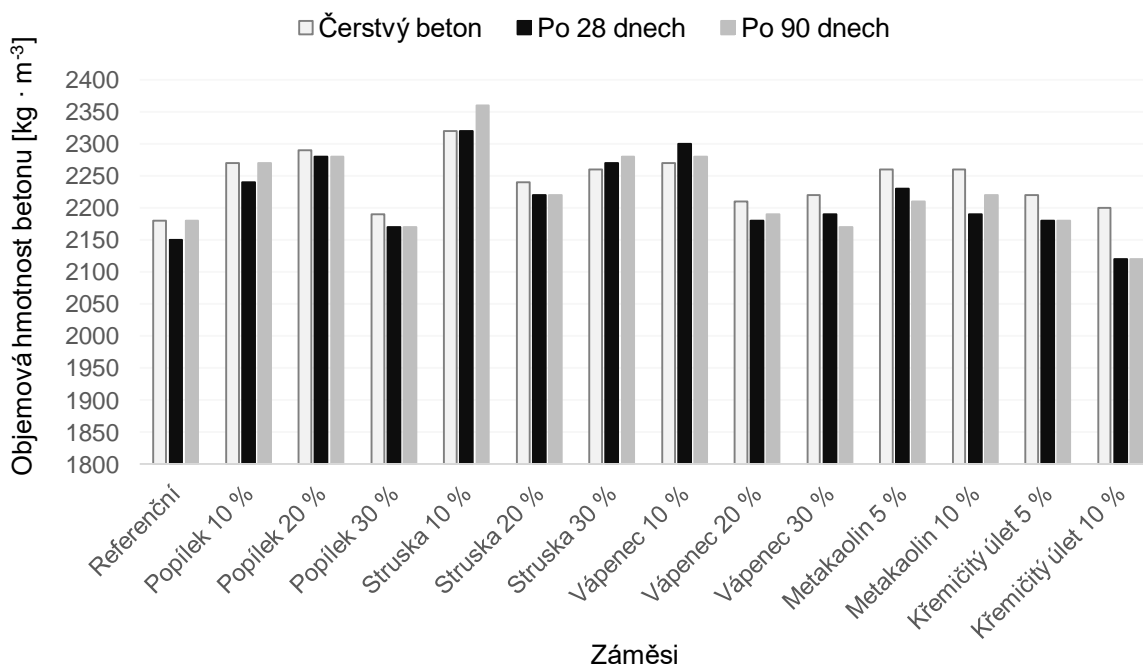
$$D = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Kde je  $D$  – objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ],  $m$  – hmotnost betonu [kg],  $V$  – objem nádoby [ $\text{m}^3$ ].

*Tabulka 32: Stanovení objemové hmotnosti v čerstvé betonové záměsi, v zatvrdlém betonu po 28 dnech a po 90 dnech*

Označení záměsi	Objemová hmotnost [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]		
	V čerstvé betonové směsi	V zatvrdlém betonu po 28 dnech	V zatvrdlém betonu po 90 dnech
Referenční	2 180	2 150	2 180
Popílek 10 %	2 270	2 240	2 270
Popílek 20 %	2 290	2 280	2 280
Popílek 30 %	2 190	2 170	2 170
Struska 10 %	2 320	2 320	2 360
Struska 20 %	2 240	2 220	2 220
Struska 30 %	2 260	2 270	2 280
Vápenec 10 %	2 270	2 300	2 280
Vápenec 20 %	2 210	2 180	2 190
Vápenec 30 %	2 220	2 190	2 170
Metakaolin 5 %	2 260	2 230	2 210
Metakaolin 10 %	2 260	2 190	2 220
Křemičitý úlet 5 %	2 220	2 180	2 180
Křemičitý úlet 10 %	2 200	2 120	2 120

## Objemová hmotnost betonové směsi v čerstvém stavu, ve ztvrdlém stavu po 28 a 90 dnech [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]



Graf 7: Objemová hmotnost betonové směsi v čerstvém stavu, ve ztvrdlém stavu po 28 dnech a po 90 dnech (znázorněno  $1\,800 - 2\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

### Vyhodnocení:

Objemová hmotnost u betonů v čerstvém a v zatvrdlém betonu dosahuje ve většině připravených záměsí přibližně stejných hodnot. Tyto nepatrné rozdíly svědčí o tom, že v betonu nebyla přebytečná záměsová voda, která by svým odpařováním tvořila vzduchové póry. U betonů s příměsí metakaolinu a křemičitých úletů je rozdíl mezi objemovou hmotností v čerstvém stavu a objemovou hmotností v zatvrdlém stavu výraznější. To znamená, že se při míchání betonu použilo víc záměsově vody, než bylo nutné. Čím vyšší obsah vzduchových pórů je obsažen v betonu, tím nižší je objemová hmotnost.

#### 3.4.4. Stanovení pevnosti betonu v tlaku

Tato zkouška byla prováděna podle normy ČSN EN 12 390-3. Nejprve se změří rozměry zkušební tělesa - rozměry tlačné plochy se pro větší přesnost měřili třikrát ve vždy na sebe kolmých směrech. Očistí se tlačné plochy desek lisu. Zkušební těleso se položí do lisu tak, aby zkouška proběhla kolmo na směr

zhutnění. Zkušební krychle se musí uložit do středu tlačné plochy spodní desky s přesností na 1 %. Zatěžovací rychlost ( $0,4 - 0,8 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) lisu je konstantní plynulá a bez nárazu až do porušení tělesa. Zaznamená se maximální zatěžovací síla, která způsobila porušení. Ideálním tvarem porušení je kónický tvar. Pevnost betonu v tlaku je uvedena následujícím vzorcem (6).

$$F_c = \frac{F}{A} \quad (6)$$

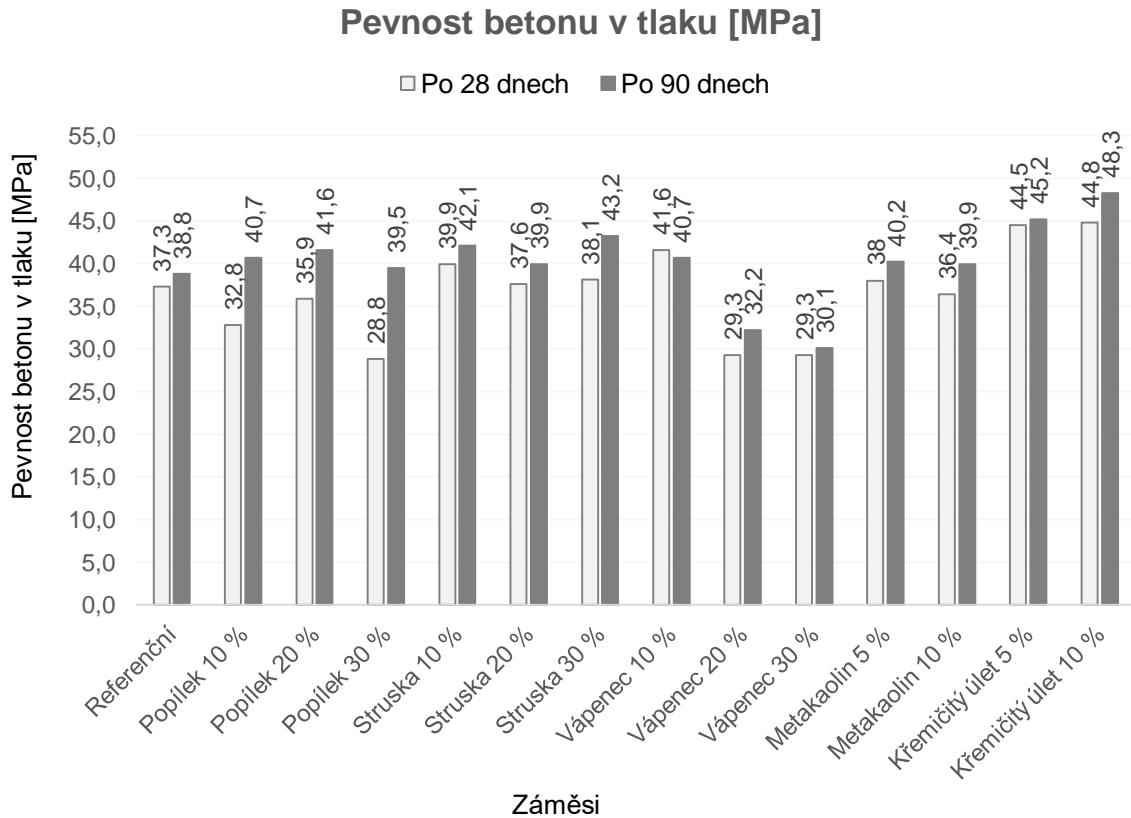
Kde je  $F_c$  – pevnost betonu v tlaku [MPa],  $F$  – maximální zatěžovací síla [N],  
 $A$  – tlačná plocha [ $\text{mm}^2$ ]



Obrázek 6: Zkouška pevnosti betonu v tlaku (metakaolin 5 %)

Tabulka 33: Stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 a 90 dnech

Označení záměsi	Pevnost betonu v tlaku [MPa]	
	po 28 dnech	po 90 dnech
Referenční	37,3	38,8
Popílek 10 %	32,8	40,7
Popílek 20 %	35,9	41,6
Popílek 30 %	28,8	39,5
Struska 10 %	39,9	42,1
Struska 20 %	37,6	39,9
Struska 30 %	38,1	43,2
Vápenec 10 %	41,6	40,7
Vápenec 20 %	29,3	32,2
Vápenec 30 %	29,3	30,1
Metakaolin 5 %	38,0	40,2
Metakaolin 10 %	36,4	39,9
Křemičitý úlet 5 %	44,5	45,2
Křemičitý úlet 10 %	44,8	48,3



**Graf 8: Stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 a 90 dnech**

#### **Vyhodnocení:**

Z výše uvedeného grafického vyjádření vyplývá, že nejvýraznější nárůst pevností mezi 28 a 90 dny je u zkušebních vzorků, které obsahují příměsí vysokoteplotního popílku a vysokopecní strusky. Kdy u vysokoteplotního popílku byl tento nárůst nejvýraznější u záměsí nahrazující 20 % cementu. U zkušebních vzorků s vysokopecní struskou dosáhly všechny zkušební vzorky po 90 dnech přibližně stejných hodnot. Nejnižší pevnosti betonu v tlaku byly zjištěny u záměsí nahrazující víc než 20 % cementu jemně mletým vápencem. Tyto rozdíly mohou být způsobeny pucolánovou aktivitou, která se u některých příměsí (vysokoteplotní popílek a vysokopecní struska) projeví právě po delší době než je 28 dnů.

### **3.4.5. Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek – metoda A – metoda automatického cyklování**

Úkolem této normy je stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek za cyklického střídání kladných a záporných teplot.

Popsané zkušební postupy v této normě platí pouze pro tělesa z cementového betonu pro kryty vozovek a pro tělesa z hutného betonu určeného pro jiné účely, je-li povrch konstrukce vystaven stejnému nebo podobnému působení chemických rozmrazovacích látek a teplot. Rozmrazovací látkou se rozumí chemická látka, jejíž roztok snižuje bod tuhnutí vody, a která se používá k odstranění nebo zamezení vzniku náledí na povrchu cementobetonových vozovek. Základní chemickou látkou se používá 3% roztok NaCl (chloridu sodného). Zkušebními tělesy pro tuto metodu jsou krychle o hraně 150 mm nebo jejich odřez mající výšku 50 mm.

Při této metodě jsou využívány cyklovací zařízení umožňující provádění cyklického zmrazování a rozmrazování podle požadavků této normy. Na dně zkušebního prostoru přístroje jsou uložena zkušební tělesa v miskách. Tyto misky musí být z nekorodujícího materiálu, umožňující ponoření zkušebních vzorků do roztoku chemické rozmrazovací látky na výšku  $(5 \pm 1)$  mm a zachycující odpad ze zkušebních povrchů. Pod dnem je umístěno chladicí a ohřívací zařízení, kde k přenosům tepla dochází pomocí vody, která je pod povrchem zkušebního prostoru přístroje. Cyklování zkušebního přístroje je dáno českou státní normou ČSN 73 1326, tedy zkušební přístroj musí povrch, tu část z celkového povrchu vzorku, která je vystavena během zkoušky přímému styku s chemickou rozmrazovací látkou nebo jejím roztokem (bez omočení ploch bočních stěn) ochladit z  $+ 20$  °C na  $- 15$  °C za dobu 45 až 50 minut. Za stejnou dobu musí dojít ke zpětnému ohřátí. Zkušební přístroj musí být uzpůsobený k tomu, aby udržoval nejnižší nebo nejvyšší teplotu po předepsanou dobu, např. 15 minut. Ve vrstvě vody na dně zkušebního přístroje jsou umístěna čidla pro měření teplot. Přístroj musí být dále opatřený počítačem cyklů.

Po rovnoměrném rozložení vzorků po dnu zkušebního prostoru přístroje. Cyklus je zaznamenáván na počítadle a po každém 25. cyklu se voda pod

povrchem zkušebního prostoru se vymění. Jeden cyklus ve zkušebním prostoru přístroje se skládá ze zchlazení zkušební plochy na  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde se na této teplotě udržuje po dobu 15 minut. Po uplynutí této doby dochází k ohřevu na teplotu  $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kde se tato teplota udržuje 15 minut. Po každém 25. cyklu přístroj automaticky přerušuje zkoušení. Po každém 25. cyklu se opatrně vyjmou vzorky ze zkušebního prostoru přístroje. Zkušební těleso se opatrně vyjme z kovové misky, do které se slabým proudem vody splaví uvolněné částice ze zkušební plochy do misky, z misky se opatrně sleje přebytečná kapalina tak, aby nedošlo k odplavování usazených odpadlých částic ze vzorku. Následně se tyto odpadlé částice slabým proudem vody přepraví do vysoušecí misky, ze které se opět opatrně sleje přebytečná kapalina a umístí se do sušárny, kde se částice vysuší do konstantní hmotnosti při teplotě  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hmotnost odpadu se uvádí na 0,1 g.

Odolnost cementového povrchu betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek je dána hmotností odpadu na jednotku plochy dle vzorce (7):

$$\rho_a = \frac{\Sigma m}{A} \quad (7)$$

Kde je  $\rho_a$  – hmotnost odpadu na jednotku plochy [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ],  $\Sigma m$  – součet všech hmotností odpadů od prvního do n-tého cyklu [g] a  $A$  – velikost zkušební plochy [ $\text{m}^2$ ], kde se rozměry stanoví s přesností měření na 1 %.

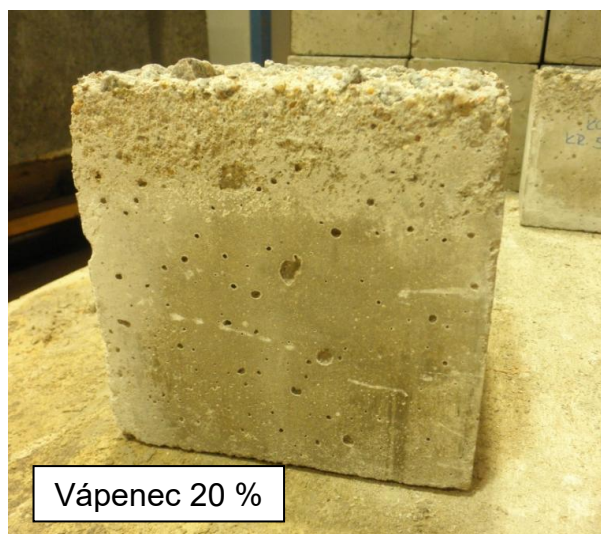
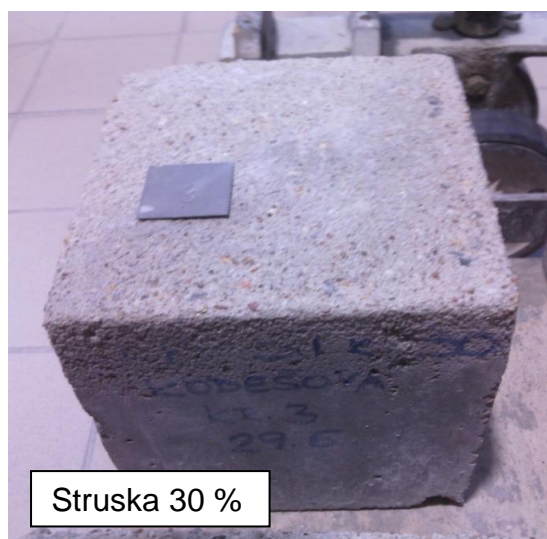
Mimo stanovení hmotnosti odpadů je možné hodnotit stav i vizuálně. Zkoušku lze ukončit buď po dosažení všech cyklů, nebo po dosažení maximální povolené velikosti odpadu na jednotku plochy.



Tabulka 34: Zatřídění povrchů zkušebních ploch podle hmotnosti na plochu

Stupeň porušení	$\rho_a$ [ $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ]	Charakter odpadu
1 - nenarušený	do 50	Velmi jemné prachovité částice do 1 mm
2 – slabě narušený	do 500	Jako u stupně 1, větší množství částic do 1 mm, podíl částic do 2 mm menší než 50 % hmotnosti odpadu
3 - narušený	do 1 000	Jako u stupně 2, podíl částic nad 2 mm přes $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
4 – silně narušený	do 3 000	Jako u stupně 2, podíl částic do 2 mm přes $500 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$
5 - rozpadlý	přes 3 000	Jako u stupně 4, podíl částic nad 4 mm více jak 20 % hmotnosti odpadu

Výsledek zkoušky odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek se udává jako číslo rozdělené pomlčkou. První část je hodnota odpadu  $\rho_a$  v  $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ , za pomlčkou je počet cyklů, při kterém bylo této hodnoty dosaženo.



Obrázek 7: Zkušební vzorky po zkoušce odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích zkoušek (struska 30 % a vápenec 20 %)

Tabulka 35: Stanovení odolnosti povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek

Označení záměsi	Odpad po 100 cyklech (28 dnů)		Odpad po 100 cyklech (90 dnů)	
	$\rho_a$ [g · m <sup>-2</sup> ]	Třída porušení	$\rho_a$ [g · m <sup>-2</sup> ]	Třída porušení
Referenční	1 313	4 – Silně narušený	1 938	4 – Silně narušený
Popílek 10 %	2 573	4 – Silně narušený	2 073	4 – Silně narušený
Popílek 20 %	1 273	4 – Silně narušený	1 323	4 – Silně narušený
Popílek 30 %	2 056	4 – Silně narušený	<b>1 184</b>	4 – Silně narušený
Struska 10 %	<b>1 048</b>	4 – Silně narušený	<b>860</b>	3 - Narušený
Struska 20 %	<b>1 185</b>	4 – Silně narušený	1 897	4 – Silně narušený
Struska 30 %	<b>701</b>	3 - Narušený	<b>510</b>	3 - Narušený
Vápenec 10 %	<b>1 004</b>	4 – Silně narušený	<b>954</b>	3 - Narušený
Vápenec 20 %	3 143	5 - Rozpadlý	2 398	4 – Silně narušený
Vápenec 30 %	3 535	5 - Rozpadlý	3 564	5 - Rozpadlý
Metakaolin 5 %	<b>412</b>	2 – Slabě narušený	<b>391</b>	2 – Slabě narušený
Metakaolin 10 %	<b>681</b>	3 - Narušený	<b>416</b>	2 – Slabě narušený
Křemičitý úlet 5 %	<b>401</b>	2 – Slabě narušený	<b>295</b>	2 – Slabě narušený
Křemičitý úlet 10 %	<b>255</b>	2 – Slabě narušený	<b>107</b>	2 – Slabě narušený

#### Vyhodnocení:

Na zkušebních tělesech byla stanovována odolnost povrchu cementového betonu proti působení vody a chemických rozmrazovacích látek. Žádný zkušební vzorek nebyl zařazen do třídy 1, tedy nenarušený. Do druhé třídy, kde předepsaný odpad je do 500 g · m<sup>-2</sup> byly zařazeny vzorky, kde cement byl nahrazen metakaolinem a křemičitým úletem. Vysoké odpady mohly být způsobeny vyšším obsahem větších vzduchových pórů, způsobené nedostatečným zhutněním čerstvého betonu. U některých záměsích došlo ke snížení hmotnosti odpadů po této zkoušce, to může být způsobeno přeměnou struktury a tím i k přerušení kapilár, kterými nemohou putovat soli do betonové struktury. Zkušební vzorky vyhoví, pokud odpad po 100 cyklech není vyšší než 1 200 g · m<sup>-2</sup> (znázorněny tučně v tabulce 35).

### 3.4.6. Obsah vzduchu v zatvrdlém betonu

Podstatou zkoušky pro stanovení charakteristik vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu je jejich zmapování, kdy na základě aproximace je možné získat přibližnou představu množství pórů v provzdušněných zkušebních vzorcích. Struktura vzduchových pórů se zjišťuje snímáním podél řady měřících přímek, vedených rovnoběžně s původním horním povrchem vzorku. Počet vzduchových pórů protnutých měřícími přímkami se zaznamená, stejně tak jako jednotlivé délky tětív. Matematická analýza zaznamenaných dat poté umožňuje popis systému vzduchových pórů z hlediska požadovaných parametrů.

Zkušební vzorky vyřezané o přibližné šířce 100 mm, výšce 150 mm a tloušťce 20 mm kolmo k hornímu povrchu zkušebního vzorku, ze středů zkoumaných těles, které jsou minimálně 7 dní ošetřovány. Následně získaný zkušební vzorek musí být za mokra broušen, dokud není rovný. Broušením za mokra se získá jemně zabroušený zkušební povrch, který se po ukončení broušení musí důkladně očistit od všech nečistot po broušení (např.: použitím vody a stlačeného vzduchu nebo vhodného jemného kartáče), avšak je nutno dbát na to, aby se nepoškodily okraje pórů. Dalším krokem je možná úprava povrchu, aby byl vytvořen lepší kontrast mezi vzduchovými póry a cementem. Takovouto úpravu je možné provést tak, že se na vyčištěný povrch nanese např. kontrastní razítkové barvivo tak, aby se nevsáklo do pórů. Natřený vzorek se umístí na 4 hodiny do sušárny při teplotě 50 °C, následně se na vysušený vzorek nanese zinková pasta a před vychladnutím vzorku se všechna přebytečná pasta odstraní. Nakonec se vzorek pokryje jemným sádrovým práškem, který se zatlačí do vzduchových pórů naplněných zinkovou pastou. Přebytečný sádrový prášek se odstraní stěrkou.

Připravený vzorek se umístí na manipulační stůl, který se skládá z plošiny, na níž spočívá zkušební vzorek a která je uložena na vodicích šroubech, pomocí nichž ji lze plynule posouvat ve dvou kolmých směrech. Pro každý zkušební vzorek je požadována minimální délka měřících přímek 1 200 mm. Jelikož je často obtížné zajistit dokonalou úpravu až úplně ke kraji zkušebního vzorku, je nutno dbát na to, aby do měření délky nebyla zahrnuta žádná poškozená plocha. Měřící přímkami musí být na zkušebním vzorku rozloženy tak, že čtyři měřící přímkami vedou přes šířku vzorku v jeho horní oblasti, kdy nejvyšší

přímky by měla být přibližně 6 mm od horního okraje a následující přímky přibližně o 6 mm od sebe. Další čtyři přímky se rozloží ve středové oblasti tak, aby od sebe byly přibližně 6 mm. Poslední soustava čtyř měřících přímek je umístěna ve spodní části zkušební vzorku, kdy nejnižší by měla být přibližně 6 mm od dolního okraje, a další následující přímky by měly být umístěné 6 mm od sebe.

Důležité je, aby během měření nebylo měněné měřítko. Během měření je nutné pohybovat se vzorkem pomocí dvou vodících šroubů, díky kterým se zajistí oddělené měření celkové délky soustavy měřících přímek přes pevné části povrchu zkušební vzorku  $T_s$  a všechny zachycené póry  $T_a$ . Součet těchto dvou hodnot dává celkovou měřenou délku  $T_{tot}$ . Je-li nutno stanovit rozdělení a/nebo obsah mikropórů, musí se zvláštním počítadlem počtu tětív vytvořených protnutím měřících přímek se vzduchovými póry zaznamenat: délka každé tětivy zaokrouhlená na nejbližších 5  $\mu\text{m}$ ; celkový počet tětív v každé třídě s použitím mezí tříd uvedených v tabulce. Tímto způsobem se všechny vyskytující se tětivy rozdělí do 28 tříd různých délek. Tuto klasifikaci pak lze použít u výpočtu odpovídajícího rozdělení vzduchových pórů. Do výpočtu se zahrnují všechny tětivy, které procházejí viditelnými póry ve ztvrdlém cementovém tmelu a mají délku mezi 0 a 4 000  $\mu\text{m}$ . Jedinou výjimkou jsou zřejmé trhliny.

### **Teoretický postup výpočtu pro stanovení součinitele prostorového rozložení vzduchových pórů:**

Výpočet objemu hmoty P

$$P = P_c + P_v + P_{př} \quad (8)$$

$$P_c = \frac{\text{obsah cementu [kg]}}{\text{měrná hmotnost cementu [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}} \cdot 100 \quad [\% \text{ obj.}] \quad (9)$$

$$P_v = 0,1 \cdot \text{obsah vody} \quad [\% \text{ obj.}] \quad (10)$$

$$P_{př} = \frac{\text{obsah přísady [kg]}}{\text{měrná hmotnost (hustota) přísady [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}} \cdot 100 \quad [\% \text{ obj.}] \quad (11)$$

Celkový obsah vzduchových pórů A

$$A = \frac{T_a \cdot 100}{T_{tot}} \quad [\%] \quad (12)$$

Celkový počet měřených tětív

$$N = \sum C_i \quad (13)$$

Měrný povrch vzduchových pórů

$$\alpha = \frac{4 \cdot N}{T_a} \quad [\text{mm}^{-1}] \quad (14)$$

Poměr mezi cementovým tmelem a vzduchovými póry

$$R = \frac{P}{A} \quad (15)$$

Součinitel prostorového rozložení vzduchových pórů

$$\text{Je-li } R > 4,342 \quad \text{pak} \quad \bar{L} = \frac{3 \cdot [1,4 \cdot (1 + R)^{\frac{1}{3}} - 1]}{\alpha} \quad [\text{mm}] \quad (16)$$

$$\text{Je-li } R < 4,342 \quad \text{pak} \quad \bar{L} = \frac{P \cdot T_{\text{tot}}}{400 \cdot N} \quad [\text{mm}] \quad (17)$$



Obrázek 8: Příprava těles pro stanovení obsahu vzduchu ve ztvrdlém betonu

Tabulka 36: Charakteristiky vzduchu v zatvrdlém betonu (A – objem pórů,  $A_{300}$  – objem účinných pórů, L – rozložení vzduchových pórů)

Záměs	A [% obj.]	$A_{300}$ [% obj.]	L [mm]
Referenční	8,89	3,42	0,116
Popílek 10 %	4,65	2,44	0,134
Popílek 20 %	3,93	0,72	0,162
Popílek 30 %	8,4	3,25	0,107
Struska 10 %	3,84	2,13	0,127
Struska 20 %	5,68	1,65	0,238
Struska 30 %	4,85	1,99	0,139
Vápenec 10 %	4,48	2,84	0,099
Vápenec 20 %	7,81	3,43	0,193
Vápenec 30 %	6,03	2,75	0,180
Metakaolin 5 %	4,77	2,22	0,134
Metakaolin 10 %	5,39	2,09	0,141
Křemičitý úlet 5 %	6,37	3,14	0,124
Křemičitý úlet 10 %	8,08	2,82	0,173

Na zkušebních tělesech byly staveny charakteristiky vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, konkrétně celkový objem pórů, objem mikroskopických pórů do 300  $\mu\text{m}$  a prostorové rozložení vzduchových pórů. Limitní hodnotou pro objem mikroskopických pórů je  $A_{300} > 1,8 \%$  a pro stanovení prostorového rozložení vzduchových pórů pro prostředí XF4 je  $L < 0,2 \text{ mm}$ .

## 4. Závěr

Cílem této práce bylo posouzení vlivu různých druhů příměsí v různém množství nahrazující cement na vlastnosti čerstvého a ztvrdlého betonu. Zvolenými příměsmi byly vysokoteplotní elektrárenský popílek, vysokopecní granulovaná struska, mikromletý vápenec, tyto příměsi nahrazovaly cement 10 %, 20 % a 30 %, dále pak křemičité úlety a metakaoliny nahrazovaly cement z 5 % a 10 %. U čerstvé betonové záměsi byly stanovovány konzistence betonu, obsah vzduchu a objemová hmotnost. U ztvrdlého betonu se po 28 a 90 dnech zkoušely tyto vlastnosti, jako objemová hmotnost, následně byla polovina vzorků odzkoušena na pevnost betonu v tlaku. Na druhé polovině vzorků byla stanovována odolnost betonu vůči působení chemických látek. Jeden zkušební vzorek byl ponechán pro stanovení prostorového rozložení vzduchových pórů a stanovení objemu účinných pórů o velikosti 300  $\mu\text{m}$ .

Úkolem bylo dosáhnout u zkoušky sednutí kužele konzistence S3, která se pohybuje v rozmezí 100 – 150 mm. V tomto rozmezí se pohybovaly veškeré namíchané zkoušené záměsi. Po stanovování konzistence byl zjišťován obsah vzduchu v čerstvé betonové záměsi. Zkouška byla prováděna v tlakovém hrnci. Dle české státní normy se uvádí, že provzdušněný beton se pohybuje v rozmezí od 4 – 6 %. Podle technických kvalitativních podmínek je povoleno kolísání o provzdušnění až o 3%. Je však nutné brát v potaz to, že každé procento vzduchu navíc v betonové záměsi vede ke snižování pevnosti betonu v tlaku až o 3 %. Veškeré druhy zkušebních betonových záměsí vyšly v rozmezí od 4,5 do 6,8 %. I přestože byla dávka provzdušňovací přísady stejná ve všech betonových záměsích, byly naměřeny výrazné rozdíly. To mohlo být způsobeno délkou a způsobem míchání, intenzitou hutnění i způsobem dávkování provzdušňovací přísady do čerstvé betonové záměsi i vlivem zpracovatelnosti.

Dalším krokem bylo stanovení objemové hmotnosti čerstvé betonové směsi. Nejnižší objemová hmotnost byla zjištěna u referenčního zkušebního vzorku, kde betonová záměs byla pouze provzdušněná. Nejvyšší objemová hmotnost čerstvé betonové směsi byla zjištěna u betonové směsi s 10 % strusky. Oproti objemové hmotnosti stanovované po 28 dnech byl největší rozdíl u betonové směsi obsahující 10 % křemičitých úletů a 10 % metakaolinu. Takovýto rozdíl může být způsoben vyšším obsahem záměsové vody, která

se během hydratace odpařila a tak vznikly póry. Po 90 dnech bylo zjištěno u některých záměsí, že došlo k nárůstu objemové hmotnosti, to může být způsobeno lepším zhutněním při výrobě a tím došlo k eliminaci vzduchových pórů ve směsi, nebo lze také předpokládat, že během zrání zkušebních vzorků došlo k růstu nových produktů, tzv. C-S-H gelů, které začaly prorůstat a tím zmenšovat vzduchové póry a rozrušovat systém kapilárních pórů. Předpokládaný vývoj nových produktů navýšil objemovou hmotnost zhruba o  $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$  u zkušebních vzorků obsahující 10 % vysokoteplotního popílku a 10 % u vysokopecní strusky a 10 % metakaolinu.

Rozrušování kapilárního systému vede k lepší odolnosti vůči působení chemických látek během zmrazování/rozmrazování. Hraniční hodnotou pro určení, jestli vzorek vyhoví nebo nevyhoví je  $1\,200 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ . Tato vlastnost je ukazatelem toho, zda zkušební betonový vzorek odolá prostředí XF. Tato zkouška je náročná na správné provedení, protože při nadměrném zvlhčování, dochází k segregaci a na povrchu zůstane pouze voda s cementem, který se snadněji rozpadá vlivem rozmrazování a zmrazování. Bohužel není definován jednotný způsob úpravy zkušebních těles, pro tuto zkoušku. Nejnižší odolnost betonu vůči působení chemických látek se prokázala po 100 cyklech u vzorků obsahující 10 % vysokoteplotního popílku (cca  $2\,500 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ ), další výrazné odpady byly zjištěny u vzorků s mikromletým vápencem o objemu 20 % a 30 % byly zjištěny odpady v průměru  $3\,500 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ . Největší přijatelný odpad po 100 cyklech byl zjištěn u zkušebních vzorků obsahující 20 % vysokopecní strusy, druhým přijatelným vzorkem jsou ty, co obsahují 10 % a 30 % vysokopecní strusky, nejnižší odpady po 100 cyklech byly zjištěny u vzorků obsahující metakaolin, kde se odpady pohybovaly v rozmezí  $400 - 700 \text{ g} \cdot \text{m}^2$  a u zkušebních vzorků obsahující křemičité úlety byly naváženy odpady od  $100 - 400 \text{ g} \cdot \text{m}^2$ . Vzhledem k výsledným hodnotám lze usuzovat, že k lepší trvanlivost betonu vůči působení chemických látek po 100 cyklech mohou dopomoci betonové záměsi obsahující vysokopecní strusku, metakaolin či křemičité úlety.

Další zkouškou bylo stanovení pevnosti betonu v tlaku po 28 a 90 dnech, kdy výrazný vliv na velikost zjištěné pevnosti má i provzdušnění betonové směsi. Pokud je ve směsi vyšší obsah vzduchu, dochází ke snižování pevnosti betonu v tlaku až o 3 % na 1 % vzduchu v betonové záměsi navíc. Po 28 dnech bylo



zjištěno, že nejnižší hodnoty pevností byly zjištěny u vzorků obsahujících 30 % vysokoteplotního popílku, 20 % a 30 % mikromletého vápence, kdy pevnosti betonu v tlaku dosáhly necelých 30 MPa. Naopak nejvyšší hodnoty byly zjištěny u vzorků obsahující strusku. V jejich případě se hodnota pohybovala v průměru 40 MPa. Předpokládá se, že u příměsí II typu, tedy pucolánů během zrání betonu dojde k navýšení pevností, důvodem je růst nových produktů, které dokážou zmenšit objem vzduchových pórů a tím zvětšit objemovou hmotnost betonové struktury. Nejvýrazněji se tyto změny projevují po 28 dnech. Nejvyšší hodnota pevnosti betonu v tlaku po 90 dnech byla zjištěna u zkušební vzorku obsahující 10 % křemičitých úletů, kde tato hodnota dosáhla téměř 50 MPa, další nejvyšší hodnoty, tedy hodnoty v průměru 40 Mpa byly zjištěny u zkušebních vzorků obsahující vysokoteplotní strusku, která je ve vzorcích zastoupena v 10 %, 20 % a 30 %. Nejnižší hodnoty pevnosti betonu v tlaku byly po 90 dnech zjištěny u zkušebních vzorků obsahující 20 % a 30 % mikromletého vápence, tedy přibližně 30 MPa.

Nízký vývin pevností u vzorku obsahující mikromletý vápenec může být způsoben tím, že podle normy ČSN EN 206 – 1 se řadí mikromletý vápenec mezi inertní příměsi, to znamená, že pokud nemá dostatečně jemná zrna, řadí se mezi mikroskopická plniva. To má za následek i to, že nedostatečná jemnost mletí vede k nedostatečnému vývinu nových produktů.

U všech zkoušených záměsí byla stanovena charakteristika vzduchových pórů ve ztvrdlém betonu, celkový objem vzduchových pórů, objem pórů o velikosti 300  $\mu\text{m}$  a prostorové rozložení pórů. Celkový obsah vzduchu u ztvrdlých zkušebních vzorků se pohybuje v širokém rozpětí od 3,84 do 8,89 obj. %. Objem mikroskopických účinných pórů  $A_{300}$  se pohybuje v rozmezí 0,72 – 3,43 obj. %. Limitní hodnotou je  $A_{300} > 1,8$  %. Této podmínce nevyhovují dva zkušební vzorky a to vzorky s 20 % vysokoteplotního popílku a 20 % vysokopecní granulované strusky. Důvod nedostatečného množství účinných pórů může vést k snížení odolnosti vůči působení chemických látek při zmrazování/rozmrzování. Ve většině případů vyšel poměr tmel:vzduchových pórů  $R > 4,342$ . Limitní hodnota pro stanovení prostorového rozložení vzduchových pórů pro prostředí XF4 je  $L < 0,2$  mm. Této hranici neodpovídá jeden vzorek, který je má cement nahrazen z 20 % vysokopecní strusky.

Ze zjištěných informací vyplývá, že mezi nejvhodnější možnosti příměsí do silničních betonů, kterými lze nahradit cement patří vysokopecní struska, metakaolin a křemičité úlety. Krom mechanických vlastností jsou v současné době sledované i jiné aspekty, kterými jsou ekologie a finanční náročnost. Jelikož je v současné době zvyšován nárok na eliminování objemu CO<sub>2</sub>, jehož největšími producenty emisí jsou průmyslové obory, zejména výroba cementu je energeticky náročná, z tohoto důvodu se hledají možnosti, jak snížit množství potřebného cementu, aniž by došlo k negativnímu ovlivnění vlastností navrhované betonové konstrukce. Z důvodu eliminování emisí je vhodné použití odpadních surovin, jako je vysokopecní struska. Je možné přistoupit k nahrazování cementu i metakaolinem i přesto, že nejde o odpadní látku. Výroba metakaolinu je méně energeticky náročná, než samotná výroba cementu. Z ekonomického hlediska jsou nejnáročnější příměsí křemičité úlety i přesto, že jde o druhotnou surovinu. Ze všech těchto hledisek se jeví jako nejvhodnější příměs vysokopecní struska.

V současné době v České republice platí technologický kvalitativní předpis vydaný ŘSD, zároveň se ohledně vlastností čerstvých a ztvrdlých betonů vychází z požadavků českých státních norem ČSN EN 206-1, následně jsou materiály cementobetonových krytů definovány českou státní normou ČSN EN 13 877 - 1. V České republice jsou příměsí používány ve směsných cementech. Pro zvýšení dávky příměsí, případně náhrady cementu těmito příměsmi je nutné provést dlouhodobou studii. Použití betonů v praxi, kde je cement částečně nahrazen, příměsmi by byla vhodné provést zkoušky týkající se dynamických vlastností a odolnost vůči mechanickému poškození.

## 5. Zdroje

- [1] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [2] AÏTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) a Českou betonářskou společnost vydalo Informační centrum ČKAIT, 2005, 320 s. ISBN 80-86769-39-9.
- [3] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 2. přepracované vyd. Bratislava: Jaga, 2007, 400 s. ISBN 978-80-8076-057-1.
- [4] KODEŠOVÁ, Monika. *Studium vlivu superplastifikačních a provzdušňovacích přísad na vlastnosti čerstvých a zatvrdlých betonů*. Brno, 2015. 59 s., Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [5] COLLEPARDI, Mario. *Moderní beton*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě (ČKAIT) vydalo Informační centrum ČKAIT, 2009, 342 s. ISBN 978-80-87093-75-7.
- [6] HELA, Rudolf. *Technologie betonu I. – přednáška*. Brno: 2012
- [7] BRDEČKOVÁ, Helena. *Geologie – přednáška*. Brno: 2010
- [8] FRIDRICHOVÁ, Marcela. *Maltoviny II – přednáška*. Brno: 2014
- [9] HILDERBERG CEMENT, *Příručka technologa*. Aktualizované vydání, 2013 [Online] [Cit. 2014-03-24] Dostupné z: <http://www.transportbeton.cz/tisk-a-media/publikace-a-prezentace.html>
- [10] PEŘKA, Lukáš. *Druhy a složení cementů podle ČSN EN 197-1: TP 2.4 : technická pomůcka k činnosti autorizovaných osob*. 1. vyd. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydává Informační centrum ČKAIT, 2011, 17 s. ISBN 978-80-87438-13-8.
- [11] ČSN EN 196 : Metody zkoušení cementu, 2005

- [12] ČSN EN 1008 : Záměsová voda do betonu – Specifikace pro odběr vzorků, zkoušení a posouzení vhodnosti vody, včetně vody získané při recyklaci v betonárnách, jako záměsové vody do betonu, 2003
- [13] SEBŮK, Tibor. *Přísady a přídavky do malt a betonů*. 2. nezměn. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1986, 160 s
- [14] ČSN EN 934 – 2 + A1 : Přísady do betonu, malty a injektážní malty – Část 2: Přísady do betonu – Definice, požadavky, shoda, označování a značení štítkem, 2012
- [15] DU, Lianxiang; FOLLIAND, K. J.; *Mechanisms of air entrainment in concrete*. Cement and Concrete Research [online]. Volume 35, Issue 8, August 2005, Pages 1463-1471. [cit. 2015-03-25]. Dostupný z WWW: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884604003369>.
- [16] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [17] *Beton: technologie - konstrukce - sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2001-. ISSN 1213-3116. Číslo výtisku 2, rok 2015. Článek: *Příměsi do betonu*. Dostupné také z: <http://www.betontks.cz/>
- [18] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. Brno: Vysoké učení technické, 1997. Učebnice. ISBN 80-214-0779-4.
- [19] 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
- [20] CHATTERJI, S., COLLEPARDI, M., MORICONI, G., *Pozzolanitic properties of natural and synthetic pozzolans: a comparative study*. ACI Publication SP 79, pp 221-233, 1983; dostupné na [www.encosrl.it/Mineral additions for Mortars and Concrete](http://www.encosrl.it/Mineral%20additions%20for%20Mortars%20and%20Concrete).

- [21] ASTM C618-12a, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete, vol. 04.02. Pennsylvania: American Society for Testing and Materials, Annual book of ASTM Standards; 2012
- [22] *Beton: technologie - konstrukce - sanace*. Praha: Česká betonářská společnost, 2001-. ISSN 1213-3116. Číslo výtisku 2, rok 2015. Článek: *Vliv popílku na vybrané vlastnosti cementových pojiv*. Dostupné také z: <http://www.betontks.cz/>
- [23] FEČKO, P. a kol., *Popílky*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2003
- [24] LUTZE, D., *vom Berg W: Příručka – Popílek do betonu: Základy výroby a použití*, nakladatelství ČEZ Energetické produkty, s. r. o., 2013
- [25] ČSN EN 12 620 + A1: Kamenivo do betonu
- [26] HÄRDTL, R.: *Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluss auf die Betoneigenschaften*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 448, Beuth Verlag, Berlin 1995
- [27] SYBERTZ, F.: *Beurteilung der Wirksamkeit von Steinkohlenflugaschen als Betonzusatzstoff*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 434, Beuth Verlag, Berlin 1993
- [28] MARSH, B. K., DAY, R. L., BONNER, D. G.: *Pore Structure Characteristics Affecting the Permeability of Cement Pastes Containing Fly-Ash*. Cement and Concrete Research 15 (1985) H. 6, S. 1027 - 1038
- [29] SETZER, M. J.: *Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, H. 280, S. 43 – 117, Beuth Verlag GmbH, Berlin 1980

- [30] KNĚZEK, Josef. *Ekologické a ekonomické zpracování průmyslových odpadních materiálů*. 4. díl, Stavební kompozity s aplikací jemnozrnných průmyslových odpadních materiálů. Brno: Výzkumný ústav stavebních hmot, 2012. ISBN 978-80-87397-05-3.
- [31] VLČEK, Jozef a Jiří FIEDOR. *Průmyslové odpady: strusky z výroby železa a oceli*. Ostrava: ECOFER, 2015. Tech-link : moduly pro oblast dalšího vzdělávání. ISBN 978-80-260-7775-6
- [32] KRESTA, František. *Druhotné suroviny v dopravním stavitelství: autoreferát habilitační práce*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2013. Vědecké publikace Fakulty stavební Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Doktorské disertační, habilitační a inaugurační spisy. ISBN 978-80-248-2984-5.
- [33] BYUNG-WAN, J., CHANG-HYUN, K., GHI-HO, JONG-BIN, P.: *Characteristics of cement mortar with nano-SiO<sub>2</sub> particles (2007)*, Construction and Building Materials, dostupné na stránkách: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S095006180600136X>
- [34] YE QUING, ZHAN ZENAN, KONG DEYU, CHEN RONGSHEN: *Influence of nano-SiO<sub>2</sub> addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume (2007)*, Construction and Building Materials, dostupné na stránkách: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061805002837>
- [35] TAFRAOUI, A. et. al.: *Metakaolin in the formulation of UHPC*, Constr Build Mater (2009), dostupné na stránkách: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0950061808000676>
- [36] ALAA, M. Rashad, *Metakaolin as cementitious material: History, scours, production and composition – A comprehensive overview*, Construction and Building Materials, Volume 41, April 2013, Pages 303-318, ISSN 0950-

0618, Dostupné ze stránek:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812009543>

- [37] LÉDL, M., Bc. *Návrh koncepce využívání mikropříměsí pro betony vysokých užitných vlastností*. Brno, 2014. 123 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc..
- [38] PAIVA, H, VELOSA, A., CACHIM, P., FERREIRA, V.M., *Effect of metakaolin dispersion on the fresh and hardened state properties of concrete*, Cement and Concrete Research, Volume 42, Issue 4, April 2012, Pages 607-612, ISSN 0008-8846, Dostupné na stránkách:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884612000063>
- [39] CASSAGNABERE, P., DIEDERICH, P., MOURET, M., SCADEILLAS, M., LACHEMI, M., *Impact of metakaolin characteristics on the rheological properties of mortar in the fresh state*, Cement and Concrete Composites, Volume 37, March 2013, Pages 95-107, ISSN 0958-9465
- [40] SVOBODA, Josef. *Encyklopedický slovník geologických věd*. Praha: Academia, 1983. Dostupné také z:  
<http://kramerius.mzk.cz/search/handle/uuid:f9658320-c9d6-11e2-a712-005056827e51>
- [41] PETRŽELKA, Josef a Václav HANUS. *Těžba a úprava silikátových surovin*. Praha: Silikátový svaz, 2013. ISBN 978-80-86821-71-9.
- [42] Guide for the the Use of Silica Fume in Concrete, Reputed by ACI Committee ACI 234 R-06
- [43] LUKÁŠ, J.: *Současné trendy ve stavebnictví, betony speciálních vlastností*, Brno 2007
- [44] TBG METROSTAV, *Směsi pro stavbu vozovek*, dostupné ze stránek:  
<http://www.tbg-metrostav.cz/produkty/smesi-pro-stavbu-vozovek/>
- [45] SPRINGENSCHMID, R., FLEISCHER, W.: *Technologie ung Anwendung von Walzbeton*. Straße und Autobahn 28 (1987) H. 11, S. 417 - 421

- [46] Technické kvalitativní podmínky 18 – ŘSD. [online]. [cit. 2016-12-04]. dostupné z: [www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1810](http://www.pjpk.cz/viewFile.asp?file=1810)
- [47] Technické kvalitativní podmínky 137 – ŘSD. [online]. [cit. 2016-12-04]. dostupné z: [http://www.pjpk.cz/TP%20137\\_1.pdf](http://www.pjpk.cz/TP%20137_1.pdf)
- [48] ČSN EN 13 877 – 1 Cementobetonové kryty - Část 1: Materiály
- [49] HOOTON, DOUGLAS, R., *Current developments and future needs in standards for cementitious materials*, Cement and Concrete Research, Volume 78, Part A, December 2015, Pages 165-177 dostupné na stránkách:  
<http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0008884615001593>
- [50] EN197-1 Cement—Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, and EN197-2, Cement—Part 2: Conformity Evaluation, CEN, European Committee for Standardization, Brussels (2011)
- [51] EN450-1 Fly Ash for Concrete. Definition, Specifications and Conformity Criteria, European Standard, CEN, European Committee for Standardization, Brussels (2012)
- [52] EN 15167-1 Ground Granulated Blast Furnace Slag for Use in Concrete, Mortar and Grout — Part 1: Definition, Specifications and Conformity Criteria, European Standard, CEN, European Committee for Standardization, Brussels (2006)
- [53] ASTM C618, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA (2012)
- [54] CSA A3000-13 Cementitious Materials Compendium, Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada (2013)
- [55] L.S. Sutter, R.D. Hooton, S. Schlorholtz, Methods for evaluating fly ash for use in highway concrete, NCHRP Report, 749, National Cooperative



Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC (2013)

- [56] B. Lothenbach, K. Scrivener, R.D. Hooton, Supplementary cementitious materials, *Cem. Concr. Res.*, 41 (2011), pp. 1244–1256
- [57] S. Ogawa, K. Yamada, H. Hirao, H. Hyoda, A. Matsui, R.D. Hooton, Sulfate resistance improvement of blended cement based on ground granulated blast furnace slag, *J. Res. Taiheiyō Cem. Corp.* (156) (2009), pp. 3–11
- [58] K.L. Scrivener, Options for the future of cement, *Indian Concr. J.*, 88 (7) (2014), pp. 11–21
- [59] M. Antoni, J. Rossen, F. Martirena, K.L. Scrivener, Cement substitution by a combination of metakaolin and limestone, *Cem. Concr. Res.*, 42 (12) (2012), pp. 1579–1589
- [60] EZEP. Elektrárna Dětmárovice. [Online] [cit. 2014-05-29] Dostupné z: <http://www.cezep.cz/detmarovice.html?id=117>
- [61] ŤAŽKÝ, M. *Vývoj konstrukčních betonů s elektrárenskými popílky*. Brno, 2014. 91 s., 5 s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
- [62] *Granulovaná vysokopecní struska SMŠ dle PN 72 2090, velmi jemně mletá*. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.kotouc.cz/produkt\\_struska.php](http://www.kotouc.cz/produkt_struska.php)
- [63] *Mletý vápenec pro fluidní kotle VFK-55/V VFK-80/V*. [online]. [cit. 2017-01-08]. Dostupné z: [http://www.kotouc.cz/produkt\\_vapenec.php?q=vapenec\\_mlety](http://www.kotouc.cz/produkt_vapenec.php?q=vapenec_mlety)

## 6. Seznam zkratk

ŘSD	Ředitelství silnic a dálnic
XW	stupeň vlhkosti
ČSN	česká státní norma
A	objem pórů [%]
A <sub>300</sub>	objem účinných pórů
L	rozložení vzduchových pórů
XF	stupeň prostředí - Střídavé působení mrazu a rozmrzávání
M <sub>S</sub>	silikátový modul
M <sub>H</sub>	hydraulický modul
M <sub>A</sub>	aluminátový modul
C <sub>3</sub> S	trikalciumsilikát (alit)
C <sub>2</sub> S	dikalcium silikát (belit)
MgO	oxid hořečnatý
ASVEP	Asociace pro využití energetických produktů
M <sub>Z</sub>	modul bazicity
CHRL	chemické rozpustné látky
XA	stupeň prostředí – chemicky agresivní látky
C <sub>3</sub> A	trikalcium aluminát
eq	ekvivalent alkálií

## 7. Seznam příloh

Příloha 1:	Provzdušňovací přísada CHRYSO®Air A
Příloha 2:	Plastifikační přísada CHRYSO®Plast 760
Příloha 3:	Kamenivo Olbramovice 8-16
Příloha 4:	Kamenivo Žabčice 0-4
Příloha 5:	Portlandský cement CEM I 42,5 R Mokrý