

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

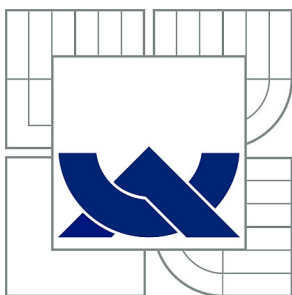
BETONY NA BÁZI TUHÝCH ZBYTKŮ Z FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE  
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

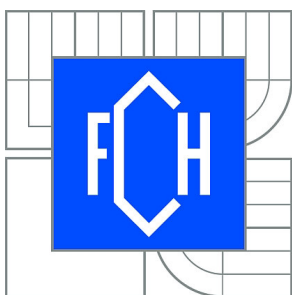
Bc. MICHAELA DARAKEVOVÁ

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA CHEMICKÁ  
ÚSTAV CHEMIE MATERIÁLŮ

FACULTY OF CHEMISTRY  
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE

# BETONY NA BÁZI TUHÝCH ZBYTKŮ Z FLUIDNÍHO SPALOVÁNÍ

CONCRETES BASED ON SOLID RESIDUES FROM FLUIDIZED BED COMBUSTION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MICHAELA DARAKEVOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. TOMÁŠ OPRAVIL, Ph.D.

BRNO 2015



Vysoké učení technické v Brně  
**Fakulta chemická**  
Purkyňova 464/118, 61200 Brno 12

## Zadání diplomové práce

Číslo diplomové práce:	<b>FCH-DIP0863/2014</b>	Akademický rok: <b>2014/2015</b>
Ústav:	Ústav chemie materiálů	
Student(ka):	<b>Bc. Michaela Darakevová</b>	
Studijní program:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (N2820)	
Studijní obor:	Chemie, technologie a vlastnosti materiálů (2808T016)	
Vedoucí práce	<b>Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.</b>	
Konzultanti:	Ing. Jiří Másilko, Ph.D.	

### Název diplomové práce:

Betony na bázi tuhých zbytků z fluidního spalování

### Zadání diplomové práce:

Popílký z fluidního spalování se liší především vysokým obsahem volného vápna a přítomností anhydritu a dalšími složkami, které jsou schopny se účastnit reakcí po smíchání s vodou. Pro toto složení, lze předpokládat u těchto materiálů hydraulické vlastnosti. Testy na pastách a maltách již prokázaly, že tomu tak je. Tato diplomová práce se bude zabývat přípravou betonů na bázi fluidních popílků a hodnocením jejich vlastností. Cílem práce bude připravit beton či betony na bázi tuhých zbytků fluidního spalování, které budou splňovat parametry běžně používaných betonů na bázi portlandského cementu.

### Termín odevzdání diplomové práce: 11.5.2015

Diplomová práce se odevzdává v děkanem stanoveném počtu exemplářů na sekretariát ústavu a v elektronické formě vedoucímu diplomové práce. Toto zadání je přílohou diplomové práce.

-----  
Bc. Michaela Darakevová  
Student(ka)

-----  
Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.  
Vedoucí práce

-----  
prof. RNDr. Josef Jančář, CSc.  
Ředitel ústavu

V Brně, dne 30.1.2015

-----  
prof. Ing. Martin Weiter, Ph.D.  
Děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato práce je zaměřena na možnosti využití druhotných surovin z energetického průmyslu ve stavebnictví, konkrétně v betonových aplikacích, kde jako hlavní suroviny pojivové části kompozice jsou použity tuhé zbytky fluidního spalování – filtrové i mleté ložové. Cílem této práce je připravit beton nebo betony na bázi tuhých zbytků z fluidního spalování uhlí, které budou buď splňovat, nebo se budou alespoň blížit svými parametry běžně používaným betonům na bázi portlandského cementu.

Experimentální část je dělena do několika kapitol, nejprve jsou uvedeny výsledky analýz vstupních surovin, a to tuhých zbytků fluidního spalování, portlandského cementu a vápenného hydrátu. Další kapitoly popisují návrhy alternativních pojiv, betonů, jejich charakterizaci a testování. Sledovány byly především měnící se vlastnosti připravených betonů při změnách poměru pojiv a kameniva. Při testech byly hodnoceny především mechanické vlastnosti a fázové složení.

## **ABSTRACT**

The work is focused on the possible use of secondary raw materials of the energy industry in the construction industry, particularly in concrete applications, where as the main raw material of the binder composition are used solid fluidized bed combustion residues - filter and ground. The aim of this work is to prepare concrete or concretes based on solid residues from fluidized bed combustion, that will fulfill or at least approximately approach by their parameters to commonly used concretes based on portland cement.

The experimental part is divided into several chapters, at first the results of analyzes of feedstock and solid residues from fluidized bed combustion, portland cement and calcium hydroxide. Other chapters describe proposals for alternative binders, concrete, characterization and testing. Mainly were observed changing properties of the prepared concretes by changing the ratio of binders and aggregates. In tests were evaluated mainly mechanical properties and phase composition.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Beton, cement, fluidní popílek, superplastifikátory

## **KEYWORDS**

Beton, concrete, fluid fly ash, superplasticizers

Darakevová, M. *Betony na bázi tuhých zbytků z fluidního spalování*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta chemická, 2015. 91 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Tomáš Opravil, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracovala samostatně a všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citovala. Diplomová práce je z hlediska obsahu majetkem Fakulty chemické VUT v Brně a může být využita ke komerčním účelům jen se souhlasem vedoucího diplomové práce a děkana FCH VUT.

.....  
podpis studenta

## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěla bych tímto poděkovat svému vedoucímu Ing. Tomáši Opravilovi, Ph.D. za trpělivost, ochotu, připomínky a odborné rady při konzultacích, a také Ing. Jiřímu Másilkovi, Ph.D. za pomoc při vyhodnocování XRD analýz. Dále bych ráda poděkovala projektu Centra materiálového výzkumu na FCH VUT v Brně, CZ.1.05/2.1.00/01.0012, za jehož podpory tato diplomová práce vznikla.

## Obsah

<b>1 Úvod</b> .....	<b>8</b>
<b>2 Teoretická část</b> .....	<b>9</b>
<b>2.1 Beton</b> .....	<b>9</b>
2.1.1 Složky betonu.....	9
2.1.1.1 Pojivo - Cement.....	9
2.1.1.2 Pojivo - Vápno.....	12
2.1.1.3 Kamenivo.....	13
2.1.1.4 Voda pro výrobu betonu.....	14
2.1.2 Přísady do betonu.....	16
2.1.2.1 Plastifikátory a superplastifikátory.....	16
2.1.2.2 Pro vzdušňující přísady.....	18
2.1.2.3 Stabilizační přísady.....	18
2.1.2.4 Přísady zpomalující tuhnutí.....	18
2.1.2.5 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí.....	18
2.1.2.6 Těsnící přísady.....	18
2.1.3 Příměsi do betonu.....	19
2.1.4 Výroba betonu.....	19
2.1.4.1 Dávkování.....	19
2.1.4.2 Míchání.....	19
2.1.4.3 Doprava.....	20
2.1.4.4 Ukládání a zhutňování čerstvého betonu.....	20
2.1.4.5 Ošetření betonu.....	20
2.1.5 Dělení betonů.....	20
2.1.5.1 Dle druhu použitého plniva.....	20
2.1.5.2 Dle stupně vlivu prostředí.....	20
2.1.5.3 Dle konzistence čerstvého betonu.....	21
2.1.5.4 Dle způsobu dopravy čerstvého betonu.....	21
2.1.5.5 Dle způsobu uložení čerstvého betonu do konstrukce.....	22
2.1.5.6 Dle způsobu zpracování čerstvého betonu.....	22
2.1.5.7 Dle objemové hmotnosti ztvrdlého betonu.....	22
2.1.5.8 Dle pevnostních tříd ztvrdlého betonu.....	23
2.1.5.9 Dle způsobu využití ztvrdlého betonu v konstrukci.....	24
2.1.5.10 Dle zvláštních požadavků na funkci betonu.....	24
2.1.6 Druhy betonů.....	24
2.1.6.1 Železový beton.....	24
2.1.6.2 Předpjatý beton.....	24
2.1.6.3 Vodostavební beton.....	25
2.1.6.4 Beton s rozptýlenou výztuží.....	25
2.1.6.5 Vozokový beton.....	25
2.1.6.6 Živičné betony.....	25
2.1.6.7 Těžký beton.....	25
2.1.6.8 Vysokopevnostní betony (HSC).....	25
2.1.6.9 Samozhutnitelný beton (SCC).....	26
2.1.6.10 Lehký beton.....	26

<b>2.2</b>	<b>Spalování uhlí.....</b>	<b>26</b>
2.2.1	Roštové kotle.....	26
2.2.2	Práškové kotle .....	26
2.2.2.1	Výtavné kotle.....	27
2.2.2.2	Granulační kotle .....	27
2.2.3	Fluidní kotle .....	27
2.2.4	Vysokoteplotní spalování.....	30
2.2.4.1	Hlavní procesy probíhající při vysokoteplotním spalování.....	30
2.2.5	Fluidní spalování .....	31
2.2.5.1	Hlavní procesy probíhající při fluidním spalování .....	31
<b>2.3</b>	<b>Popílký .....</b>	<b>32</b>
2.3.1	Vysokoteplotní popílký .....	32
2.3.1.1	Vápenatý popílek.....	33
2.3.1.2	Křemičitý popílek .....	33
2.3.2	Fluidní popílký .....	33
2.3.2.1	Hrubý ložový popel .....	34
2.3.2.2	Jemný popílek z elektrických odlučovačů.....	34
<b>3</b>	<b>Experimentální část.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Použité chemikálie a suroviny.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2</b>	<b>Příprava testovacích směsí.....</b>	<b>35</b>
<b>3.3</b>	<b>Metody .....</b>	<b>36</b>
3.3.1	Rentgenová difrakční analýza .....	36
3.3.2	Skenovací elektronová mikroskopie (SEM) .....	37
3.3.3	Analýza velikosti částic pomocí dynamického rozptylu světla .....	38
3.3.4	Stanovení počátku a konce tuhnutí dle Vicata .....	39
3.3.5	Stanovení objemové hmotnosti .....	39
3.3.6	Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu .....	40
3.3.7	Objemová stálost .....	40
<b>3.4</b>	<b>Analýza vstupních surovin.....</b>	<b>40</b>
3.4.1	Laserová analýza vstupních surovin .....	41
3.4.2	XRD analýza vstupních surovin.....	41
3.4.3	Světelná a skenovací mikroskopie vstupních surovin.....	42
<b>4</b>	<b>Výsledky a diskuze .....</b>	<b>44</b>
<b>4.1</b>	<b>Vliv přídatku různých druhů superplastifikátoru – testy na pastách.....</b>	<b>44</b>
<b>4.2</b>	<b>Vliv přídatku fluidního ložového mletého popílku na vlastnosti alternativních betonů</b>	<b>46</b>
4.2.1	Testy na pastách .....	46
4.2.2	Testy na maltách.....	48
4.2.3	Testy na betonech.....	51
<b>4.3</b>	<b>Vliv přídatku fluidního filtrového popílku na vlastnosti alternativních betonů .....</b>	<b>54</b>
4.3.1	Testy na pastách .....	55
4.3.2	Testy na maltách.....	57
4.3.3	Testy na betonech.....	60

<b>4.4</b>	<b>Vliv přídavku fluidního filtrového popílku a vápenného hydrátu na vlastnosti alternativních betonů.....</b>	<b>63</b>
4.4.1	Testy na pastách .....	64
4.4.2	Testy na maltách.....	66
4.4.3	Testy na betonech.....	68
<b>5</b>	<b>Závěr.....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>Přílohy.....</b>	<b>79</b>

# 1 Úvod

Beton, dříve definovaný jako umělý kámen, je možné považovat za kompozitní materiál, který je složen z cementu, hrubého a drobného kameniva, vody, příměsí a přísad. Beton na bázi portlandského cementu lze díky jeho vlastnostem, jako jsou minimální nároky na údržbu, nízká cena a vysoká životnost, začlenit mezi univerzální stavební materiál se všestranným použitím, mezi které je možné zařadit různá použití v pozemním a inženýrském stavitelství, ale i v drobném stavebnictví. Beton se s výhodou používá všude tam, kde uplatníme jeho pevnost, stálost a trvanlivost. Právě oblast stavebnictví, konkrétně výroba stavebních hmot a dílců je jednou z oblastí možného využití průmyslových odpadních materiálů, mezi které lze zařadit tuhé zbytky z vysokoteplotního a fluidního spalování.

Odpadní materiály jsou ve formě druhotných surovin přínosné z technologického, environmentálního i ekonomického hlediska. Používají se buď jako náhrada klasické (primární) suroviny, nebo se vnášejí do technologie cíleně, a to díky svým mimořádným vlastnostem (chemické a fázové složení), které mohou zlepšit parametry výsledné stavební hmoty oproti použití suroviny primární. Využití některých druhů produktů spalování umožňuje snižovat obsah cementu v betonech, aniž by to negativně ovlivnilo jejich pevnost. Produkce cementu představuje značnou ekologickou zátěž díky vysokým emisím oxidu uhličitého. V případě cementu je tedy žádoucí nahradit energeticky náročný portlandský slínek vhodnými sekundárními surovinami, produkovanými energetickým a metalurgickým průmyslem. Nižší spotřeba slínku pak přispívá ke snižování objemu emisí oxidu uhličitého.

Snahou vyspělých států je snaha o co nejefektivnější využití těchto velkoobjemově produkovaných odpadních materiálů jako sekundárních surovinových zdrojů. Tuhé zbytky z fluidního spalování nejsou v současné době dostatečně využívány, přestože jejich mezeroční produkce má již několik let stoupající charakter. V České republice se v současné době využívá cca 10 - 15 % produkovaných fluidních popílků.

Cílem této diplomové práce bude prověřit možnosti přípravy betonů na bázi tuhých zbytků z fluidního spalování. Připravený beton by měl splňovat parametry klasických betonů na bázi portlandského cementu, běžně používaného ve stavebnictví.

Aby bylo možné určit optimální nahrazení některých složek betonových směsí surovinami druhotnými, bude nezbytné provést větší množství zkoušek pevností v tlaku a pevností v tahu za ohybu pro pasty, malty a následně betony a nakonec se snažit zjištěné mechanické vlastnosti co nejvíce vylepšit.

## 2 Teoretická část

### 2.1 Beton

Beton je materiál ze směsi cementu, hrubého a drobného kameniva a vody, s přísadami a příměsemi nebo bez nich, který získá své vlastnosti hydratací cementu.

- Čerstvý beton – beton, který je zcela zamíchán a je ještě v takovém stavu, který umožňuje jeho zhutnění zvoleným způsobem.
- Ztvrdlý beton – beton, který je v pevném stavu a má již určitou pevnost.
- Typový beton – beton, pro který jsou výrobci specifikovány požadované vlastnosti a doplňující charakteristiky betonu a výrobce zodpovídá za dodání betonu vyhovujícího požadovaným vlastnostem a doplňujícím charakteristikám.
- Normalizovaný beton – beton, jehož složení je předepsáno v normě platné v místě použití betonu. [1]

Výhodou betonu je dobrá tvarovatelnost, odpovídající použitému bednění a možnost recyklace. Proto je beton vhodný pro různá použití v pozemním, inženýrském stavitelství, ale i v drobném stavebnictví, i když třeba pouze jako základ pro stavbu, uskutečňovanou ze zcela odlišných stavebních hmot. Beton je pevný a trvanlivý. Zpravidla se používá v kombinaci s výztuží různého druhu. [2]

#### 2.1.1 Složky betonu

Základní složky betonu tvoří cement, kamenivo a voda. Doplňkovými složkami jsou přísady a příměsi.

Složky betonu nesmí obsahovat škodlivé látky v takovém množství, které by ohrozilo trvanlivost betonu nebo by bylo příčinou koroze výztuže a musí být vhodné pro daný účel použití betonu. Obecně vhodná složka nemusí vyhovovat pro každý typ a složení betonu pro zamýšlený účel jeho použití. [3]

Pro výrobu betonu vyhovujícího ČSN EN 206 – 1 je dovoleno použití jen těch složek betonu, u kterých byla prokázána vhodnost pro specifické použití. [4]

##### 2.1.1.1 Pojivo - Cement

Cement je hydraulické pojivo, tj. jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Po zatvrdnutí zachovává svoji pevnost a stálost také ve vodě. [5]

Účinnými složkami cementu jsou sloučeniny  $CaO$  s  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$ , popřípadě jiné sloučeniny podobného typu. Podle chemického hlediska (převažující aktivní složky) možno rozdělit různé druhy cementů do tří skupin:

1. křemičitanové cementy, jejichž nejvýznamnějším zástupcem je cement portlandský,
2. hlinitanové cementy, s převahou hlinitanů vápenatých,
3. jiné cementy, např. železitanový, chromitanový a další. [6]

#### Suroviny

Suroviny na výrobu cementu se dělí na hlavní a pomocné. Mezi hlavní suroviny patří vápenec, hydraulické složky (břidlice, jíly, hlíny) a některé přísady (železná ruda a kyzové výpalky). Přísady jsou přidávány jen v malých množstvích, ale zúčastňují se též tvorby slínku.

Pomocné suroviny slínek netvoří, ale buď ulehčují jeho vývin – mineralizátory (např. kazivec), usměrňují některé vlastnosti cementu – usměrňovače (např. sádrovec, chlorid vápenatý) nebo ulehčují mletí, či snižují spotřebu paliva. [7]

Slínek nemá obsahovat více než 6 hmot. %  $MgO$ , neboť tato složka je příčinou rozpínání po ztuhnutí cementu, a tím snížení pevnosti. Dále škodí přítomnost  $P_2O_5$ ,  $PbO$ ,  $ZnO$  aj., při větším množství i alkalické oxidy a sírany. [6]

### Tabulka 1

Chemické složení cementu [8]

Parametr	Zastoupení složek (%)								
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$MgO$	$Fe_2O_3$	$SO_3$	$Na_2O$	$K_2O$	Z.Ž*
Cement	20,13	4,37	64,30	2,27	3,71	1,99	2,27	0,31	2,44

\* ztráta žháním

### Složení surovinové směsi

K správnému sestavení cementářské suroviny byly navrženy a dlouhodobě v průmyslové praxi ověřeny hydraulické moduly, zahrnující hlavní oxidy, tzn.  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$ . Je nutné si však uvědomit, že vedle dodržení správných hodnot jednotlivých modulů kvalitu vyráběného cementu ovlivňují další činitele, kterými jsou např. způsob tepelného zpracování a rychlost chlazení slínku, kvalitativní i kvantitativní zastoupení kovových a dalších oxidů a jiné faktory.

Pomocí empirických pravidel – tzv. modulů je možno řídit nejen složení suroviny, ale rovněž chemickou a fázovou skladbu vyráběného slínku. [9]

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (1)$$

Silikátový modul

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3} \quad (2)$$

Hlinitanový modul

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3} \quad (3)$$

Stupeň sycení vápnem [9]

$$S_S = \frac{100CaO}{2,8SiO_2 + 1,65Al_2O_3 + 0,35Fe_2O_3} \quad (4)$$

### Druhy cementu

Podle normy ČSN 197 – 1 se výrobky souboru cementů pro všeobecné použití rozdělují do pěti hlavních tříd:

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

Složení každého z výrobků pro všeobecné použití musí být v souladu s tabulkou 5. [10]

**Tabulka 2**

27 výrobků skupiny cementů pro všeobecné použití dle ČSN EN 197 – 1 [10]

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (druhy pro všeobecné použití)		Složení (poměry složek podle % hmotnosti) <sup>a</sup>			
			Hlavní složky			Doplňující složky
			Slínek			
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95-100			0-5
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80-94	6-20	Vysokopecní struska (S)	0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90-94	6-10	Křemičitý úlet (D) <sup>b</sup>	0-5
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80-94	6-20	Přírodní pucolán (P)	0-5
		CEM II/B-P	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-Q	80-94	6-20	Přírodní kalcinovaný pucolán (Q)	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	21-35		0-5
	Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	80-94	6-20	Křemičitý popílek (V)	0-5
		CEM II/B-V	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-W	80-94	6-20	Vápenatý popílek (W)	0-5
		CEM II/B-W	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	6-20	Kalcinovaná břidlice (T)	0-5
		CEM II/B-T	65-79	21-35		0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	6-20	Vápenec (L)	0-5
		CEM II/B-L	65-79	21-35		0-5
		CEM II/A-LL	80-94	6-20	Vápenec (LL)	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	21-35		0-5
	Portlandský směsný cement <sup>c</sup>	CEM II/A-M	80-88	12-20	S+D+P+Q+V+W +T+L+LL	0-5
CEM II/B-M		65-79	21-35	0-5		
CEM III	Vysokopecní cement	CEM III/A	35-64	36-65	Vysokopecní struska (S)	0-5
		CEM III/B	20-34	66-80		0-5
		CEM III/C	5-19	81-95		0-5
CEM IV	Pucolánový cement <sup>c</sup>	CEM IV/A	65-89	11-35	D+P+Q+V+W	0-5
		CEM IV/B	45-64	36-55		0-5
CEM V	Směsný cement <sup>c</sup>	CEM V/A	40-64	18-30	S+(P+Q+V) <sup>d</sup>	0-5
		CEM/B	20-38	31-49		0-5

- a Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek.
- b Obsah křemičitého úletu je omezený do 10 %.
- c Hlavní složky v portlandských směsných cementech CEM II/A-M a CEM II/B-M, pucolánových cementech CEM IV/A a CEM IV/B a ve směsných cementech CEM V/A a CEM V/B mimo slínku musí být deklarované v označení cementu.
- d Směsný cement obsahuje 18 – 30 resp. 31 – 49 % S + 18- 30 resp. 31 – 49 % P+Q+V.

### 2.1.1.2 Pojivo - Vápno

Vápno je technický název pro  $CaO$  o různém stupni čistoty. Jako maltovina se vyrábí rozkladem přírodních vápenců při takové teplotě, aby produkt byl schopen dostatečně rychlé hydratace na  $Ca(OH)_2$ , který je pak hlavní aktivní složkou tohoto pojiva.

Všeobecně se rozlišují dva hlavní druhy vápna pro stavební účely:

- 1) Vzdušní vápno, které má vysoký obsah  $CaO$  a popřípadě malý obsah  $MgO$ . U kvalitních druhů je součet těchto hlavních složek vyšší než 85 hmot. %. Vápno obsahující více než 7 %  $MgO$  se označuje jako dolomitické.
- 2) Hydraulické vápno, jež vzniká z méně čistých vápenců s obsahem nad 10 % tzv. hydraulických složek, tj.  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$ .

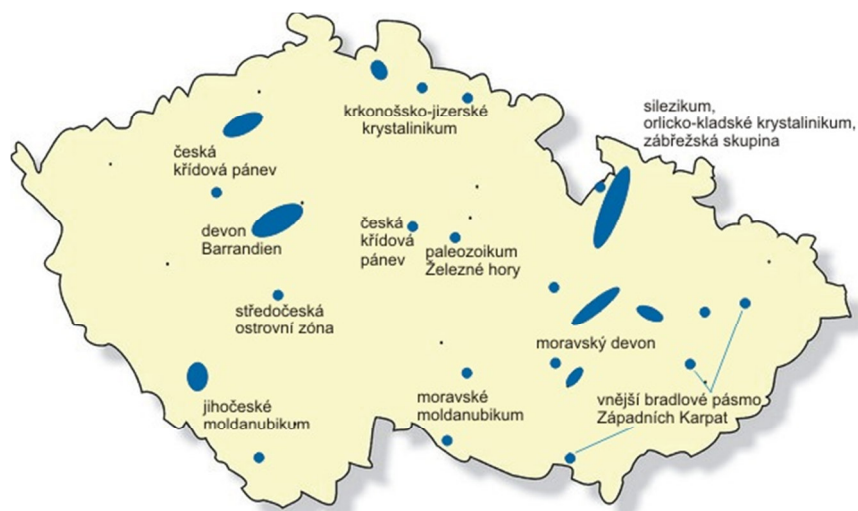
Jak vyplývá z názvů, první typ vápna tuhne a je stálý pouze na vzduchu, zatímco druhý typ se zpevňuje i pod vodou za tvorby nerozpustných produktů. [6]

### Suroviny

Hlavní mineralogickou složkou vápence je kalcit event. dolomit. Vápence s obsahem dolomitu nad 10 hmot. % se označují jako dolomitické.

Nečistoty jsou ve vápencích buď jemně rozptýlené, anebo tvoří heterogenní inkluze. Nejčastějšími doprovodnými oxidy jsou  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  a  $Fe_2O_3$ . Při klasifikaci vápenců k výrobě vápna se obvykle uvádí poměr  $CaO$  k těmto složkám (hydraulický modul), který u středně hydraulického vápna má hodnotu 3 až 6. Obsah  $CaCO_3$  ve vápenci nemá být nižší než 75 hmot. %. Podle obsahu barvicích oxidů, zejména  $Fe_2O_3$ , vzniká vápno bílé nebo zbarvené. Požadavky na čistotu a vlastnosti vápenců jsou specifikovány v příslušných normách. Podle nich jsou pak vápence klasifikovány do různých tříd a druhů.

Důležitým kritériem výroby vápna je také struktura vápenců. Jemnozrnné vápence se zrna o velikosti kolem 0,1 mm jsou vhodnější, neboť vápno z nich vyrobené dodává maltám větší tvárlivost. Tyto vápence se vyznačují vyšší hustotou a mechanickou pevností. [6]



**Obrázek 1**  
Ložiskové oblasti vápenců v ČR [11]

### Rozklad vápence

$CaCO_3$  je stabilní sloučeninou až asi od 600 °C. Při vyšších teplotách se rozkládá za spotřeby tepla:



Rychlost rozkladu  $CaCO_3$  závisí na teplotě a relativním tlaku  $CO_2$  v okolní atmosféře, ale také na struktuře vápence a na velikosti zrn či kusů. Rozklad  $CaCO_3$  probíhá tak, že se nejdříve rozloží povrchové partie částic. Oxid uhličitý pak difunduje takto vytvořenou vrstvou  $CaO$ , jejíž tloušťka neustále narůstá rychlostí danou buď rychlostí difúze  $CO_2$ , nebo rychlostí nukleace  $CaO$ . Teoretickým rozбором lze ukázat, že čas potřebný k úplnému rozkladu částic  $CaCO_3$  je přibližně úměrný výchozímu poloměru a druhé mocnině výchozího poloměru, jestliže je řízen difúzí  $CO_2$  slupkou  $CaO$ . [6]

### Hašení vápna

Vápno se slučuje s vodou, čili hydratuje za značného vývoje tepla na vápno hašené. Hašení lze vyjádřit rovnicí:  $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$ . [12] (6)

### Tuhnutí a tvrdnutí vápna

Mechanismus tuhnutí a tvrdnutí vápna není posud plně objasněn. Předpokládá se účast několika procesů. Primární ztuhnutí vápenné malty nastává prostým odsátím části vody pórovitým zdivem. Tuhnutí pak pokračuje tvorbou a vysycháním gelové sítě hydroxidu. Dalším procesem je pomalá rekrytalizace  $Ca(OH)_2$ , která se patrně podílí na tvrdnutí. Současně probíhá ještě pomalejší karbonizace, již potvrzuje řada známých pozorování orosení zdi při tuhnutí omítky následkem reakce:  $Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O$ . [6] (7)

#### 2.1.1.3 Kamenivo

Kamenivo plní funkci pevné kostry v betonu, na kterou je obecně kladen požadavek minimální mezerovitosti (zaujímá 75 až 80 % objemu betonu), tedy požadavek na optimální zrnitost. Vlastnosti kameniva mají také vliv na trvanlivost betonu a ostatní mechanicko –

fyzikální vlastnosti betonu. Pro výrobu betonu se používá široká škála petrografických druhů kameniv v různé mineralogické skladbě s různou velikostí zrn.

Vhodnost kameniva pro výrobu betonu podle ČSN EN 206 – 1 se obecně prokazuje:

- pro hutné a těžké kamenivo podle ČSN EN 12620 + A1,
- pro pórovité kamenivo podle ČSN EN 13055 – 1.

Při výběru druhu kameniva, zrnitosti (max. velikost zrna, množství jemných částic, tvar zrn) a jeho specifických vlastností (odolnost proti střídavému působení mrazu a rozmrazování, odolnost proti obrušování apod.) je nutno vzít v úvahu:

- konkrétní použití betonu a technologii provádění betonové konstrukce,
- podmínky okolního prostředí specifikované stupněm vlivu prostředí, kterému bude beton v konstrukci vystaven,
- případné požadavky na obnažené kamenivo povrchové úpravy nebo na kamenivo pro hlazený, broušený či jinak upravený povrch betonu.

Maximální jmenovitá horní mez frakce kameniva ( $D_{\max}$ ) musí být stanovena s ohledem na tloušťku betonové konstrukce, na nutnost vytvoření požadované krycí vrstvy betonu nad výztuží a na šířku minimální mezery mezi výztužnými pruty.

V případě dopravy betonu čerpáním na místo ukládky je nutné zohlednit i průměr přepravních hadic. U dodávek transportbetonu jsou zpravidla horní mezí frakce kameniva zrna max. velikosti 22 mm.

Řešením výplně prostoru různě velkými zrny je Fullerova čára zrnitosti, kterou lze vyjádřit

$$\text{pomocí vztahu: } y_i = 100 \cdot \sqrt{\frac{d_i}{D_{\max}}}, \quad (8)$$

kdy  $y_i$  je celkový propad příslušející sítu o jmenovitém rozměru  $d_i$ ,  $D_{\max}$  je jmenovitý rozměr největšího síta použitého při konstrukci čáry zrnitosti. [4]

#### 2.1.1.4 Voda pro výrobu betonu

Voda je důležitá nejen pro hydrataci pojiva, ale i pro tvárnost a zpracovatelnost malt a betonů a pro ošetřování betonů. Má se používat vody čisté, bez rozptýlených nebo rozpuštěných látek, které by rušily tuhnutí a tvrdnutí. Těmto požadavkům vyhovuje voda z vodovodu, studní, potoků, řek, jezer apod. Úplně čistá je jen voda dešťová. Nevhodné jsou vody bahenní a slatinné, sádrové, vody slané nebo hořké s obsahem nad 1 % chloridu hořečnatého, kyselé s obsahem více než 0,3 % oxidu sírového.

Z použité vody se část váže tvrdnutím a větší část vytváří z pojiva a výplně pohyblivou zpracovatelnou směs. Použitá voda musí být průměrně 15 °C teplá. Při betonování za mrazu se má zahřívat na 30 °C až 50 °C. Velmi nepříznivě působí voda zahřátá na 60 °C až 80 °C, při zahřátí na 80 °C až 100 °C je její působení na hydrataci opět příznivé. Ledová voda zdržuje hydrataci a tuhnutí cementu. Za horka je dobré používat vody chladnější. [12]

Voda používaná pro výrobu betonu musí být v souladu s normou ČSN EN 1008 (73 2028). Záměsová voda je potřebná k vytvoření dobře zpracovatelné směsi a k hydrataci cementu. Pro vlastní hydratační proces je třeba asi 20 – 25 % vody z hmotnosti cementu. Tato dávka zajistí přeměnu slínekových minerálů z cementu v hydrokřemičitany a hydrohlinitanu.

Množství záměsové vody však musí být vyšší, neboť přispívá ke zmenšení tření mezi zrny kameniva při zpracování betonové směsi.

V průběhu procesu tuhnutí a tvrdnutí se záměsová voda rozdělí do 3 forem:

- chemicky vázaná – uvolňuje se z betonu při teplotách 200 – 700 °C,
- fyzikálně vázaná – absorbované na povrchu jemných částic,
- volná – obsažena v dutinách a pórech, odpařuje se. [13]

**Tabulka 3**

Požadavky na záměsovou vodu dle ČSN 73 2028 [4]

Parametr	Jednotka	Požadavek
Obsah nerozpuštěných látek (sušených při 105 °C) max.	mg / l	2 000
Ztráta nerozpuštěných látek žháním (při 800 °C) max.	mg / l	800
Odparek (sušený při 105 °C) max.	mg / l	3 000
pH, ne nižší než	mg / l	4
Obsah síranů $SO_4^{2-}$ max.	mg / l	1 500
Obsah chloridů $Cl^-$ max.	mg / l	500
Obsah hořčíku $Mg^{2+}$ max.	mg / l	500
Manganistanové číslo oxidovatelnost manganistanem $O_2$		15
Pevnost zkušebních těles z cementové malty v porovnání s pitnou či destilovanou vodou	-	snížení pevnosti nesmí přesáhnout mezní odchylky zkoušek
Začátek a celková doba tuhnutí cementu	-	musí vyhovět normě jakosti pro daný cement

**Tabulka 4**

Kritéria (limitní hodnoty) pro hodnocení záměsově vody podle ČSN EN 1008 [4]

Vlastnost	Použitelná bez zkoušky pevnosti v tlaku	Podmíněně použitelná jestliže pevnost v tlaku vyhovuje
Barva	bezbarvá až slabě žlutavá	tmavá nebo barevná (červená, zelená, modrá)
Olej a tuk	pouze stopa	olejový film nebo emulze
Detergenty	nízký stupeň pěny, stálá do 2 minut	hodně pěny, která je stálá nad 2 minuty
Suspendované látky	< 4 cm <sup>3</sup>	< 4 cm <sup>3</sup>
Zápach	žádný až slabý	výrazný
pH	< 4	< 4
Obsah chloridů:		
Prostý beton	< 4 500 mg / l	< 4 500 mg / l
Železobeton	< 2 000 mg / l	
Předpjatý beton	< 600 mg / l	
Sírany	< 2 000 mg / l	< 2 000 mg / l
Glukóza + sacharóza	< 100 + < 100 mg / l	< 100 + < 100 mg / l
Fosforečnany	< 100 mg / l	< 100 mg / l
Dusičnany	< 500 mg / l	< 500 mg / l
Zinek	< 100 mg / l	< 100 mg / l
Sírníky	< 100 mg / l	< 100 mg / l
$Na^+ + K^+$	< 1 000 mg / l	
Huminové látky	Bledší než žlutohnědé	Tmavší než žlutohnědé

## 2.1.2 Přísady do betonu

Obecným účelem dávkování přísad je zlepšení vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu nebo získání zcela nových vlastností. Nejrozšířenější oblastí je používání plastifikačních, případně superplastifikačních přísad, umožňující snížení obsahu záměsové vody a tím úsporu cementu. Dávkování přísad se liší podle požadavků, typu a činnosti. Dle platné normy by neměl být obsah přísad vyšší než 5 hmot. % z obsahu cementu. [14]

Přísady se podle ČSN EN 934 – 2 rozdělují na typy podle hlavního nebo převažujícího účinku působení:

- plastifikační (redukuje vodu),
- superplastifikační (dříve – ztekucující, velmi redukuje vodu),
- provzdušňující,
- stabilizační (zadržuje vodu),
- zpomalující tuhnutí,
- urychlující tuhnutí a tvrdnutí betonu,
- těsnící (hydrofobizační - odpuzující vodu),
- ostatní přísady.

Přísady působí fyzikálně – chemicky především na cementový tmel a jejich působení a konečný efekt je závislý nejen na druhu, ale i původu cementu. Přísady ovlivňují průběh hydratace cementu jednak formou rozpouštění slínkových minerálů, s kterými nevstupují, či naopak vstupují do chemické reakce, nebo svou aktivitou snižují napětí na povrchu zrn cementu či tvořících se krystalických novotvarů a zvyšují pohyblivost čerstvého betonu. Mohou mít i vedlejší účinky. Jejich celkové působení se rovněž mění v závislosti na dávkovaném množství přísady, na složení betonu a podmínkách jeho výroby.

Při používání přísad nesmí být podle požadavku ČSN EN 206 – 1 překročeny maximální dávky doporučené jejich výrobcem a při dávce přísady na 50 g/ kg cementu (5 hmot. %) musí být prokázáno, že nepříznivě neovlivňuje vlastnosti a trvanlivost betonu. Přísada v dávce menší než 2 g/ kg cementu musí být vždy rozptýlena v části záměsové vody. Přesáhne-li celkové množství tekuté přísady 3 l/m<sup>3</sup> betonu, musí být toto množství započteno do zápočtové vody. Při aplikaci více než jedné přísady musí být zkouškou prokázána jejich vzájemná snášenlivost. [4]

### 2.1.2.1 Plastifikátory a superplastifikátory

Plastifikační neboli vodoredukuje přísady redukuje potřebné množství vody pro dosažení stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

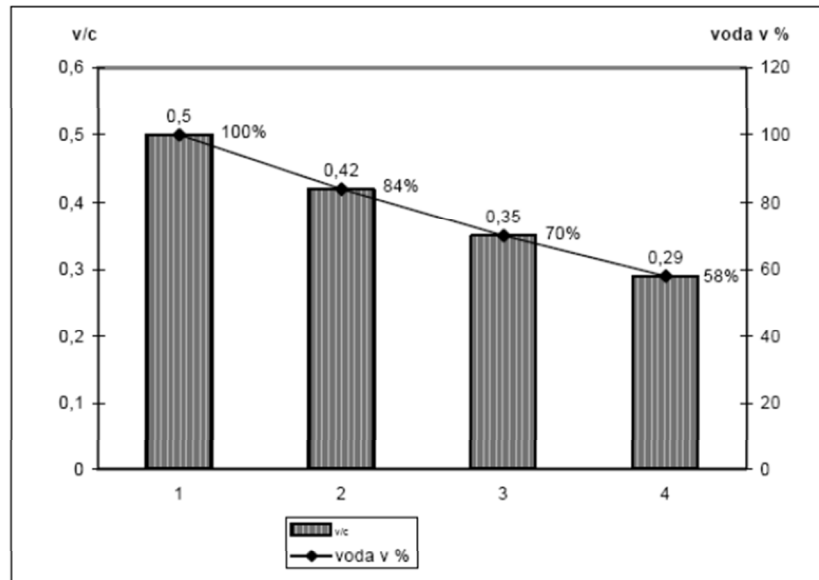
Superplastifikační neboli silně vodoredukuje přísady jsou látky, které výrazně redukuje potřebné množství vody při stejné zpracovatelnosti čerstvého betonu.

Plastifikační přísadou musí být sníženo množství vody o více jak 5 % při stejné konzistenci stanovené sednutím nebo rozlitím a u superplastifikátoru o více jak 12 %. Pevnost v tlaku přidáním plastifikační přísady by mělo narůst za 7 a 28 dní nejméně na 110 % proti referenčnímu betonu. Při použití superplastifikátoru by měla v důsledku redukce množství vody vzrůst pevnost v tlaku za 1 den nejméně na 140 % a za 28 dní nejméně na 115 % proti referenčnímu betonu.

Existují 4 základní typy komerčních superplastifikátorů:

1. Sulfonované soli polykondenzátů naftalenů a formaldehydů, většinou se označují jako sulfonáty polynaftalenů, nebo jednoduše jako naftalenové superplastifikátory.

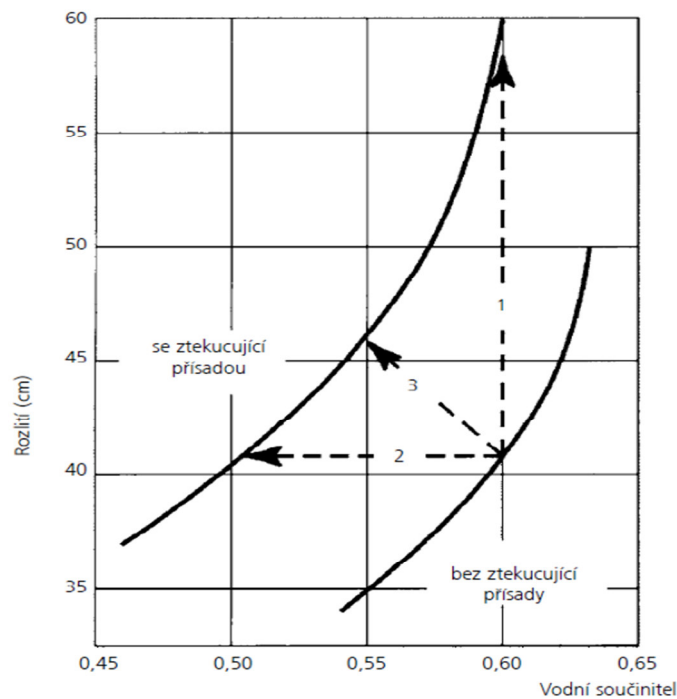
2. Sulfonované soli polykondenzátů melaminu a formaldehydu, obvykle jsou označovány jako sulfonáty polymelaminu, nebo opět jednoduše melaminové superplastifikátory.
3. Lignosulfonáty s velmi nízkým obsahem sacharidů a povrchově aktivních činidel.
4. Polykarboxyláty a polyakryláty - v dnešní době bezesporu nejvýznamnější. [6]



1 – bez přísady, 2 – s přísadou na bázi lignosulfonátů, 3 – s přísadou na bázi sulfonovaných melaminformaldehydových pryskyřic, 4 – s přísadou na bázi polykarboxylátů

**Obrázek 2**

*Graf závislosti snížení vodního součinitele na typu plastifikační přísady [15]*



**Obrázek 3**

*Závislost vodního součinitele a rozlívání čerstvého betonu [5]*

### **2.1.2.2 Pro vzdušňující přísady**

Zpracovatelnost a konzistenci cementového těsta lze vylepšit provzdušňováním, čímž se zároveň snižuje riziko tečení a segregace. Pevnost betonu je snížena, dokud není efekt provzdušňovacích přísad vyrovnán obvyklými rozměrovými změnami. Dalším výrazným jevem je velký nárůst mrazuvzdornosti u provzdušněných betonů, přídavek těchto přísad však chrání pouze cementovou pastu. [16]

Po chemické stránce jsou provzdušňující přísady tvořeny solemi přírodních pryskyřičných a mastných kyselin nebo syntetickými tenzidy. [4]

### **2.1.2.3 Stabilizační přísady**

Stabilizační přísady redukuje odmísení chemicky nevázané (volné) vody ze suspenze cementového tmelu, které v některých případech nastává při sedimentaci tuhých částic tmelu. Používají se pro zlepšení jakosti (odolnosti) povrchu betonové konstrukce a ke zvýšení soudržnosti betonu s výztuží.

Pevnost betonu v tlaku po 28 dnech se stabilizační přísadou nesmí klesnout o více než 20 % oproti referenčnímu betonu složenému a vyrobenému podle ČSN EN 480 – 1 a současně musí být dosaženo nejméně 50 % redukce odlučování vody.

Přísada přispěje tím více ke stabilitě čerstvého betonu, čím více sníží obsah volné vody a zvýší celkový měrný povrch tuhých částic.

Stabilizační přísady mohou být organického nebo anorganického původu. Jejich účinkem se buď pouze zvětšuje měrný povrch tuhých částic v jednotce objemu čerstvého betonu, nebo v druhé fázi reagují s volnou vodou a vážou ji fyzikálně nebo chemicky. [5]

### **2.1.2.4 Přísady zpomalující tuhnutí**

Používají se, pokud je třeba, aby se zachovala zpracovatelnost čerstvého betonu déle, než by odpovídalo normálnímu tuhnutí a tvrdnutí. Působení přísad může trvat od několika hodin po několik dnů. Tyto přísady se používají k prodloužení doby dopravy a manipulace s čerstvým betonem a při betonování velkých bloků. Chemicky se jedná o fosforečnany, sulfonové kyseliny, sacharidy a další látky. [2]

### **2.1.2.5 Přísady urychlující tuhnutí a tvrdnutí**

Přísady urychlující proces hydratace cementového tmelu zkracují dobu přechodu čerstvého betonu z plastického stavu do stavu tuhé látky. Začátek tuhnutí nastává zpravidla o 1 až 3 hodiny dříve a průběh tuhnutí je obvykle kratší o 1 hodinu. Používají se pro dosažení vysokých počátečních pevností betonu. [4]

### **2.1.2.6 Těsnící přísady**

Těsnící přísady zvyšují hutnost cementového kamene a snižují jeho pórovitost. Vytvářejí nerozpustné krystalické sloučeniny, které zmenšují průřez kapilár nebo je zcela zatěsňují. Některé typy na cementové bázi se dají aplikovat i dodatečně ve formě nátěru na beton pro zabezpečení jeho vodotěsnosti nebo plynotěsnosti. [4]

### 2.1.3 Příměsi do betonu

Jako příměsi do betonu se označují jemnozrnné pevné látky, které ovlivňují vlastnosti betonu v čerstvém i ztvrdlém stavu. U čerstvého betonu se jedná zejména o konzistenci a zpracovatelnost a u ztvrdlého betonu o pevnost, hutnost, trvanlivost, odolnost proti chemicky agresivnímu prostředí. Jedná se zejména o mletou strusku, vápenec, kamenné moučky a popílek. [14]

Příměsi jsou práškovité anorganické látky přidávané do betonu za účelem zlepšení některých vlastností čerstvého nebo ztvrdlého betonu. [2]

Rozeznávají se dva typy příměsí:

#### A. Inertní (typ I)

Neúčastní se procesu hydratace. Nejčastěji to bývají kamenné moučky nebo prachovité látky. Mají vliv na zpracovatelnost betonové směsi a hutnost betonu. Jejich použitím může být snížena mezerovitost klasického kameniva, čímž lze dosáhnout snížení spotřeby cementu.

#### B. Pucolány nebo latentně hydraulický (typ II)

Jsou to látky, které jsou schopny účastnit se procesu hydratace, ale pouze v prostředí, ve kterém tato reakce již probíhá. Příkladem těchto směsí je vysokopecní struska, popílek, metakaolin nebo silikonový prach (též mikrosilika). Některé z těchto příměsí mohou být součástí směsných cementů. [17]

### 2.1.4 Výroba betonu

Výroba betonu se provádí podle technologického předpisu, který musí zajistit při daném výrobním zařízení a dodaných základních materiálech požadované vlastnosti betonu. Technologický předpis předepisuje postup dávkování složek, dobu míchání, údaje o způsobu dopravy, zpracování betonové směsi způsobem zhutnění a předepisuje způsob ošetřování hotového betonu. [3]

#### 2.1.4.1 Dávkování

Hrubé a drobné kamenivo, cement a většina přísad se dávkuje hmotnostně, na vahách, které odpovídají příslušným požadavkům na přesnost.

Voda, pórovité kamenivo, přísady a tekuté příměsi se většinou dávkuje objemově, na nových mísících centrech hmotnostně. Některé přísady i příměsi se dávkuje v procentech vztažených k hmotnosti cementu. [12]

#### 2.1.4.2 Míchání

Beton se vyrábí mísením jeho složek:

- ručním mícháním,
- strojně v míchačkách.

Při strojním mísení se používají míchačky:

- spádové,
- s nuceným oběhem materiálů,
- kontinuální. [12]

### 2.1.4.3 Doprava

Rozdělení dopravy:

- primární (vnější) – beton se dopravuje na staveniště,
  - sekundární – doprava uvnitř staveniště (dopravní pásy, kolečka, čerpadla, koše).
- [18]

Doprava betonu na staveniště podléhá přesným pravidlům. Při tvorbě receptur se přihlíží k dopravní vzdálenosti a celkové délce dopravy. Obecně platným pravidlem je, že doba, mezi počátkem míchacího procesu na betonárně a uložením betonu na stavbě, by neměla přesáhnout 60 min. V opačném případě dochází k podstatnému zhoršení kvality betonu. Tato doba je závislá na druhu použitého cementu a lze ji prodlužovat přidáním přísad. [19]

### 2.1.4.4 Ukládání a zhutňování čerstvého betonu

Čerstvý beton se po příjezdu autodomíchače na stavbu přepravuje na místo jeho zpracování kolečky, japonkami, multikárami, dopravníky se sklopnou korbou, nákladními automobily s vanovými korbami, koši na jeřábu a čerpadly na čerstvý beton. Nejnovější čerpadla umožňují kontinuální dopravu čerstvého betonu do výšek přesahujících 15 m přesně na místo určení.

Nedokonalé zhutnění může způsobit snížení pevnosti betonu až o 40 % v porovnání s betonem dokonale zhutněným. Betonová směs se do formy nebo do bednění ukládá v několika vrstvách, které se zhutní a následuje další nezhutněná vrstva a její zhutnění. Při zhutňování nesmí dojít k posunu nebo poškození výztuže, kabelů, kotev a bednění. Vibruje se tak dlouho, až přestanou z betonu unikat vzduchové bubliny, přičemž nesmí dojít k rozměšování složek čerstvého betonu. Vibrační technika zaznamenala v posledních letech značný rozvoj a umožňuje téměř dokonale zhutnit čerstvý beton. [3]

### 2.1.4.5 Ošetření betonu

V prvních dnech se beton musí chránit před povětrnostními a jinými vlivy, především před nadměrným oteplením a ochlazením, před mrazem, vysušením, otřesy atd. K ochraně betonu používáme různé fólie a izolační materiály a chemické nátěry. [19]

## 2.1.5 Dělení betonů

Betony lze dělit do několika kategorií dle různých kritérií.

### 2.1.5.1 Dle druhu použitého plniva

Největší objem betonů se vyrábí s cementy různých druhů a vlastností. Při vyslovení pojmu beton bez přesnějšího určení pojiva se předpokládá beton cementový. Dalšími pojivy jsou: sádra, vápno, živice, polymery, hlinitanový cement, případně jemně mletá vysokopecní struska aktivovaná alkáliemi. [3]

### 2.1.5.2 Dle stupně vlivu prostředí

Působení prostředí je takové chemické a fyzikální působení, kterým je vystaven beton, jehož účinky na beton, na výztuž nebo na zabudované kovové vložky nejsou uvažovány jako zatížení konstrukce.

Beton je klasifikován ve stupních 1 – 6.

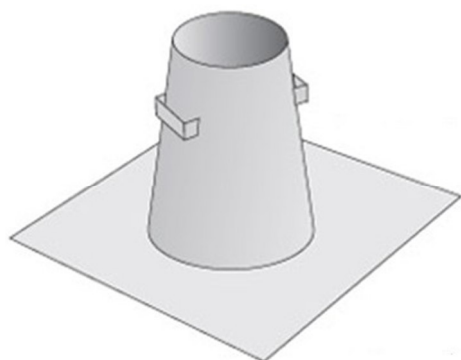
1. Bez nebezpečí nebo narušení X0.
2. Koroze vlivem karbonatace XC1 – XC4.
3. Koroze vlivem chloridů (ne mořské vody) XD1 – XD3.
4. Koroze vlivem chloridů z mořské vody XS1 – XS3.
5. Střídavé působení mrazu a rozmrazování XF1 – XF4.
6. Chemické působení XA1 – XA3. [3]

### 2.1.5.3 Dle konzistence čerstvého betonu

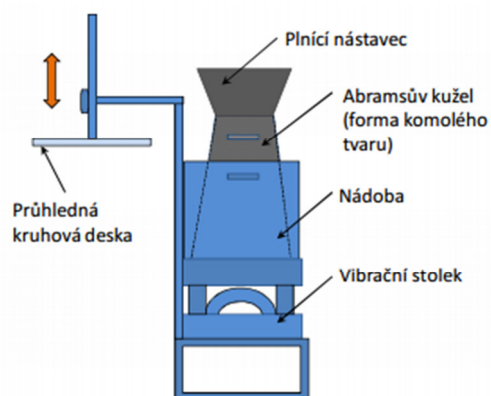
**Tabulka 5**

Stanovení konzistence [2]

Sednutí kužele (Abrams) ČSN EN 12350 - 2		Vebe ČSN EN 12350 - 3		Rozlití Graf ČSN EN 12350 - 5	
Stupeň	Sednutí [mm]	Stupeň	Čas VeBe [s]	Stupeň	Průměr rozlití [mm]
S1	10 – 40	V0	≥ 31	F1	≤ 340
S2	50 – 90	V1	21 – 30	F2	350 – 410
S3	100 – 150	V2	20 – 11	F3	420 – 480
S4	160 – 210	V3	10 – 6	F4	490 – 550
S5	≥ 220	V4	5 – 3	F5	560 – 620
				F6	≥ 630



**Obrázek 4**  
Abramsův kužel [2]



**Obrázek 5**  
VeBe [20]

### 2.1.5.4 Dle způsobu dopravy čerstvého betonu

Čerstvý beton se od míchačky dopravuje v přepravnících, pásy nebo v autodomíchávacích. Transportbeton je beton dodávaný v čerstvém stavu osobou nebo organizací, která není odběratelem betonu. Patří sem beton vyráběný mimo staveniště nebo vyráběný na staveništi, ale ne odběratelem. Doba, kterou měříme, od namíchání do uložení do bednění na stavbě, by neměla přesáhnout 45 minut, případně 90 minut při použití vhodného zpomalovače tuhnutí. [3]

### **2.1.5.5 Dle způsobu uložení čerstvého betonu do konstrukce**

- Monolitické betony – čerstvý beton se dopravuje na stavbu, nasype nebo čerpadly se naplní bednění, ve kterém se zhutní, zatvrdne, ošetřuje se a po ztvrdnutí se odbední.
- Prefabrikované betony – konstrukční prvek je vyráběn ve výrobně nebo přímo na staveništi, po dosažení požadované pevnosti se doformuje, uloží se na skládce k dozrávání, ošetřuje se a po dosažení transportní pevnosti se dopraví na staveniště, kde je uložen do konstrukce. [3]

### **2.1.5.6 Dle způsobu zpracování čerstvého betonu**

Způsobů zpracování čerstvého betonu je celá řada:

- betony vibrované,
- betony dusané,
- betony lité,
- betony stříkané,
- betony válcované,
- betony čerpané,
- betony odstředěné. [3]

### **2.1.5.7 Dle objemové hmotnosti ztvrdlého betonu**

- Lehké betony – po vysušení v sušárně mají objemovou hmotnost větší než  $800 \text{ kg/ m}^3$  a menší než  $2\,000 \text{ kg/ m}^3$ .
- Obyčejné betony – po vysušení mají objemovou hmotnost větší než  $2\,000 \text{ kg/ m}^3$ , nepřevyšující  $2\,600 \text{ kg/ m}^3$ .
- Těžké betony – po vysušení mají objemovou hmotnost větší než  $2\,600 \text{ kg/ m}^3$ . [3]

### 2.1.5.8 Dle pevnostních tříd ztvrdlého betonu

**Tabulka 6**

Pevnostní třídy obyčejného a těžkého betonu v tlaku ČSN EN 206-1 [4]

Pevnostní třída v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimální charakteristická krychelná pevnost [N/mm <sup>2</sup> ]
C -/5	-	5
C -/7,5	-	7,5
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

**Tabulka 7**

Pevnostní třídy lehkého betonu v tlaku ČSN EN 206-1 [4]

Pevnostní třída v tlaku	Minimální charakteristická válcová pevnost [N/mm <sup>2</sup> ]	Minimální charakteristická krychelná pevnost [N/mm <sup>2</sup> ]
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 55/60	55	60
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

### 2.1.5.9 Dle způsobu využití ztvrdlého betonu v konstrukci

Beton se využívá jako:

- tepelně izolační,
- samonosný,
- nosný,
- prostý,
- vyztužený – železový,
- předpjatý,
- stínící – těžký beton. [3]

### 2.1.5.10 Dle zvláštních požadavků na funkci betonu

Stavební praxe vyžaduje betony vyráběné podle zvláštních požadavků na jejich funkci:

- trvanlivé,
- vodostavební,
- mrazuvzdorné,
- provzdušněné,
- rozpínavé,
- korozivzdorné,
- žáruvzdorné,
- tepelně izolační,
- odolné vůči záření. [3]

## 2.1.6 Druhy betonů

Druhů betonu je nepočítaně a rovněž tak kritérií, dle kterých je možné je řadit. Zde je vypsáno nejběžnější a nejpoužívanější rozdělení.

### 2.1.6.1 Železový beton

Betonové konstrukce, do kterých se vkládají různé ocelové prvky, nazýváme železobetonem. Ocel se do betonu vkládá z důvodu zlepšení pevnosti v tahu. Železobetonové konstrukce mají dlouhou historii a jejich navrhování je běžnou praxí. Většina "betonových" konstrukcí je ze železobetonu.

Prostý beton má stejně jako každý přírodní kámen malou pevnost v tahu. Je tedy vhodný pro konstrukce namáhané především pouze v tlaku, což je nedostatkem pro některé druhy konstrukcí, jako jsou např. trámy a stropy. Vloženou výztuží se zesiluje konstrukce především v tahové zóně. Ocel je schopna zachytit tahové síly. Má – li být tenká výztuž namáhaná tlakem, je třeba ji uložit do betonu, aby nedošlo k vybočení. Dnes se zpravidla pracuje s betonem vyztuženým. [2]

### 2.1.6.2 Předpjatý beton

Zatím co je výztuž u obyčejného železového betonu volně kladena (tzv. "měkká výztuž"), u předpjatého betonu je předem předpjata ve výrobě nebo dodatečně předpjata (např. ovíjením, předpínáním kabely z vysokopevnostních ocelových drátů). Předpínání se uskutečňuje pomocí předpínacích lisů, konce předpínací oceli se pak ukotví protibetonu. [2]

### 2.1.6.3 Vodostavební beton

Betonové směsi specifikované stupněm vodotěsnosti určené pro konstrukce vystavené působení tlaku vody (do 0,4 MPa nebo do 0,8 MPa). [21]

### 2.1.6.4 Beton s rozptýlenou výztuží

Tento druh betonu patří mezi zatím příliš nerozšířené betony. Podstata těchto betonů spočívá v pokud možno dokonalém a rovnoměrném rozptýlení polymerních vláken nebo drátků ve hmotě betonu při mísení. Podle použitého plniva se jedná o vláknobeton, mikrovýztužený beton, drátkobeton, někdy armocement. [3]

### 2.1.6.5 Vozovkový beton

Cementové betonové vozovky se provádějí na dálnicích, silnicích a letištních plochách. V důsledku své tuhosti přenášejí zatížení vozidel na podkladní vrstvy. Podklady pro betonové desky bývají tuhé nebo netuhé. Betonové desky bývají obvykle dlouhé 7 m, šířka u dálničních a silničních desek nemá být větší než 3,75 m, u letištních 7,5 m. Tloušťka musí být větší než 150 mm. Mezi deskami musí být podélné a příčné spáry, zalité zálivkou. Kamenivo do vozovky musí být kvalitní, maximální zrno 32 mm. Cement se používá silniční SC 70 se zaručenou pevností v tahu ohybem 7 MPa, objemově stálý.

Návrh, výroba a doprava těchto betonů se provádí shodně s výrobou prostých betonů, rozprostření a hutnění směsi se provádí finišery. Ošetření betonu se provádí okamžitě po ztuhnutí ochranou proti vysychání, odpařování a dešti.

Beton musí mít vyšší pevnost v tahu ohybem, musí být mrazuvzdorný a odolávat účinkům rozmrazovacích solí. Předpokládá se použití provzdušňovacích přísad. [3]

### 2.1.6.6 Živičné betony

Živičné betony obsahují kromě kameniva jako pojivou složku živice, složené z uhlovodíků a jejich derivátů. Patří k nim:

- přírodní živice neboli přírodní asfalty,
- ropné živice neboli ropné asfalty,
- pyrogenetické živice neboli dehty.

Kamenivo má být pevné, hutné, netečné k vodě a mrazuvzdorné. Jeho pevnost je limitována ztuhňováním s využitím válcování, kde dochází k dodatečnému drcení kamenů. Kamenivo musí mít též dobrou přilnavost k pojivu. Živičné betony se používají převážně v silničním stavitelství. [3]

### 2.1.6.7 Těžký beton

Těžký beton je beton, který má po vysušení (105 °C) objemovou hmotnost větší než 2 600 kg/m<sup>3</sup>. Je vyráběn z těžkého kameniva. [2]

### 2.1.6.8 Vysokopevnostní betony (HSC)

Vysokopevnostní beton má pevnostní třídu v tlaku vyšší než C 50/ 60 pro obyčejný a těžký beton a pevnostní třídu vyšší než LC 50/ 55 pro lehký beton. Používá se u výškových staveb a při stavbách mostů. Jeho výhodou je zvýšení staticky účinného průřezu, zmenšení objemu betonových konstrukcí a zvýšení trvanlivosti. [2]

### 2.1.6.9 Samozhutnitelný beton (SCC)

Samozhutnitelný beton je beton vylepšených vlastností, který nevyžaduje zhutňování během vlastního zpracování. Je schopen téci působením vlastní tíhy, dokonale vyplnit bednění a docílit dokonalého zhutnění i v místech hustého vyztužení. Zatvrdlý beton je hutný, homogenní a má stejné technické vlastnosti a trvanlivost jako tradičně hutněný beton. [2]

### 2.1.6.10 Lehký beton

Beton se sníženou objemovou hmotností, které je dosaženo použitím lehkého či pórovitého plniva (kameniva). Dle druhu a množství použitého lehkého plniva lze rozsah objemových hmotností měnit od 300 kg/ m<sup>3</sup> do 1800 kg/ m<sup>3</sup>. [21]

## 2.2 Spalování uhlí

Spalování je nejstarším a nejčastějším způsobem využití uhlí. Spalovací proces pracuje na principu exotermní reakce uhlíku z uhlí s kyslíkem z ovzduší. Mezi produkty spalování lze zařadit kromě tepla také oxid uhličitý a vodní páru. Kromě toho se také vytvoří odpad v podobě oxidu síry, dusíku a popílku, vzniklý z nečistot uhlí. S popílkem se do atmosféry dostává rovněž stopové množství těžkých kovů a radioaktivních látek. Z plynných zbytků z hořlaviny se může v některých případech do ovzduší dostat i stopové množství karcinogenních uhlovodíků. Kvalita uhlí ovlivňuje celý proces spalování.

Průběh spalování uhlí lze rozdělit do několika fází a celý proces je ovlivněn mnoha důležitými faktory. Pro co nejlepší průběh spalování a účinné využití jeho výhřevnosti dochází ke zdokonalování ohnišť, což dokazuje přechod od původních roštových typů na typy efektivnější. Díky tomu se minimalizovalo i množství škodlivých látek, které jsou při spalování vypouštěny do ovzduší. [22]

### 2.2.1 Roštové kotle

Roštové kotle slouží pro spalování kusových pevných paliv v klidné vrstvě filtračním způsobem. Jsou děleny do dvou základních skupin:

- s pevným roštem,
- s mechanickým roštem. [23]

Spalování u roštových kotlů probíhá jednak ve vrstvě na roštu, jednak v prostoru nad vrstvou paliva. Podíl hoření nad roštem bude tím větší, čím vyšší je obsah prchavé hořlaviny v palivu. Z tohoto pohledu jsou rozeznávány dvě základní konstrukční koncepce:

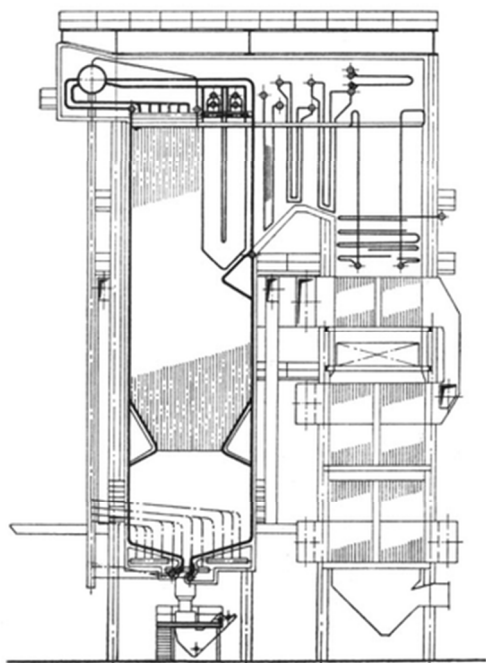
- roštové kotle s jedním ohniskem hoření,
- roštové kotle se dvěma ohnisky hoření. [24]

### 2.2.2 Práškové kotle

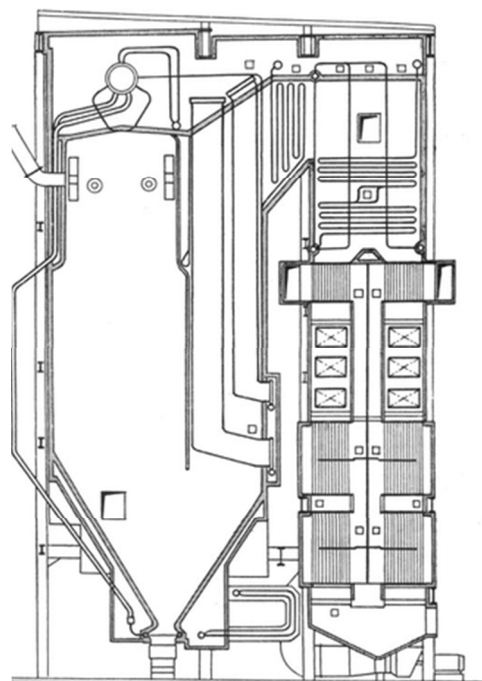
Práškové kotle spalují uhelný prášek, rozemletý na velikost zrn pod 1 mm, v hořácích. Rozemletím kusového uhlí na prášek dochází ke zvětšení měrného povrchu paliva 100 násobně, a tím dochází i k intenzivnějšímu spalování. Práškové kotle nemají rošt, který omezuje teplotu primárního vzduchu a zatížení ohniště. Jsou proto používány pro nejvyšší výkony. [23]

### 2.2.2.1 Výtavné kotle

Výtavné kotle spalují černé uhlí při teplotách 1 400 – 1 550 – 1 600 °C. Všechny složky tuhého paliva mohou během působení vysokých teplot procházet oxidačním nebo redukčním prostředím. Spalované částice jsou vysoké teplotě vystaveny jen krátkou dobu (1 – 3 sekundy), během níž dochází k jejich roztavení a reakcím v tekuté fázi nebo jen v povrchové části. Důsledkem toho je, že popílký obsahují kromě minerálních zbytků i zbytky původního nebo tepelným procesem do různého stupně proměněného uhlí. [25]



**Obrázek 6**  
*Dvouprostorový výtavný kotel [23]*



**Obrázek 7**  
*Třítahový granulační kotel [23]*

### 2.2.2.2 Granulační kotle

Granulační kotle jsou vhodné pro spalování méněhodnotných paliv. Spalování zde probíhá při relativně nízkých teplotách tak, aby nedošlo k překročení teploty tečení popele, což vyžaduje intenzivní chlazení spalovací komory. Částice popele jsou během spalování natavené, shlukují se a tvoří škváru. Škvára padá do spodní části ohniště, do výsypky, ze které je kontinuálně odváděna. Stupeň zachycení popele ve škváře je 8 – 20 % z celkového množství popeloviny obsažené v palivu. Zbytek odchází se spalinami, prochází všemi teplosměnnými plochami a je nutno jej zachytávat v odprašovacích zařízeních. Teplota plamene v granulačních kotlích se pohybuje v závislosti na typu paliva mezi 1 100 až 1 500 °C. [23]

### 2.2.3 Fluidní kotle

Fluidní kotle využívají principu spalování paliv ve fluidní vrstvě (fluidním loži). Fluidní vrstva vytváří podmínky vhodné pro rovnoměrné hoření paliva v celém jeho objemu, což v konečném důsledku znamená dokonalejší vyhoření paliva (vysoká účinnost fluidního kotle) při nižších teplotách spalování a současném omezení tvorby škodlivých spalin. Spalina

vzniklé při fluidním spalování obsahují významně menší procento zastoupení síry a oxidů dusíku ve srovnání s klasickým spalováním.

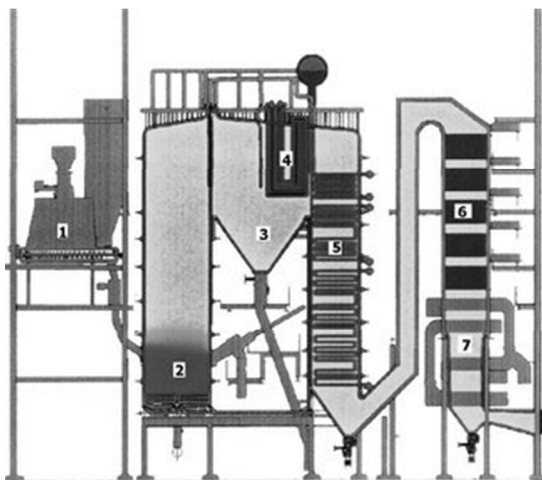
Principy hoření paliva ve fluidní vrstvě poskytují rovněž vhodné podmínky pro spalování široké škály paliv jako uhlí, biomasa, kaly a separovaný komunální odpad. Technologie fluidních kotlů tak představuje nejdokonalejší způsob spalování paliv jak z ekologického, tak i z ekonomického pohledu. [26]

#### A. Atmosférické fluidní kotle se stacionární fluidní vrstvou (AFB)

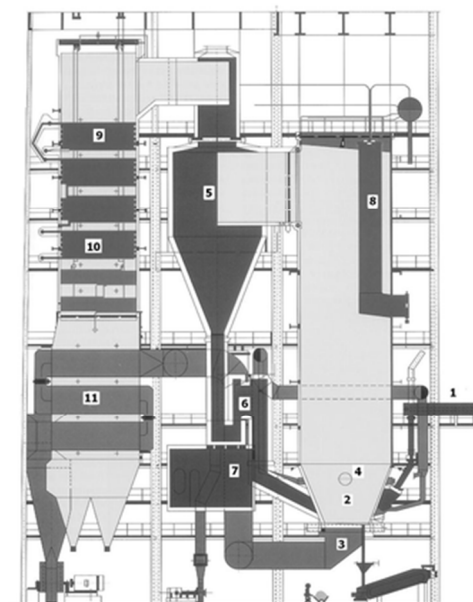
Charakteristickým rysem těchto kotlů je bublinkující (stacionární) fluidní vrstva se zřetelnou hladinou. Schéma kotle je zobrazeno na obr. 8. Palivo je přiváděno ze zásobníku paliva do spalovací komory, kam je přiváděn i spalovací vzduch. Primární vzduch je veden skrze fluidní rošt a vytváří z paliva a aditiva fluidní vrstvu. Spaliny znečištěné popílkem pak odchází dohořivací komorou do mezitahu, kde je odloučena velká část tuhého úletu. Dále spaliny prochází výhřevnými plochami parní části kotle, ekonomizérem a ohřívákem vzduchu. Popílek je odveden na úložiště. U některých systémů je zaváděn zpět do fluidní vrstvy. [27]

#### B. Atmosférické fluidní kotle s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB)

Principem kotlů s cirkulující fluidní vrstvou je cirkulace částic fluidní vrstvy (paliva i aditiva) mezi spalovací komorou a cyklonem, ze kterého jsou vráceny zpět do fluidního ohniště. Společným znakem těchto kotlů je prostup všech spalin z ohniště přes cyklony. Výhodou je delší pobyt částic ve spalovacím prostoru, který vede k lepšímu odsíření i vyhoření uhlíku (snížení ztráty mechanickým nedopalem). Tyto kotle se staví pro vyšší výkony než kotle s bublinkující fluidní vrstvou. Na rozdíl od kotlů AFB není u těchto kotlů zřetelná hladina fluidní vrstvy, která expanduje do prostoru ohniště. Základní schéma ACFB je zobrazeno na obr. 9. [27]



**Obrázek 8**  
*Kotel s bublinkující fluidní vrstvou (AFB)*  
[23]

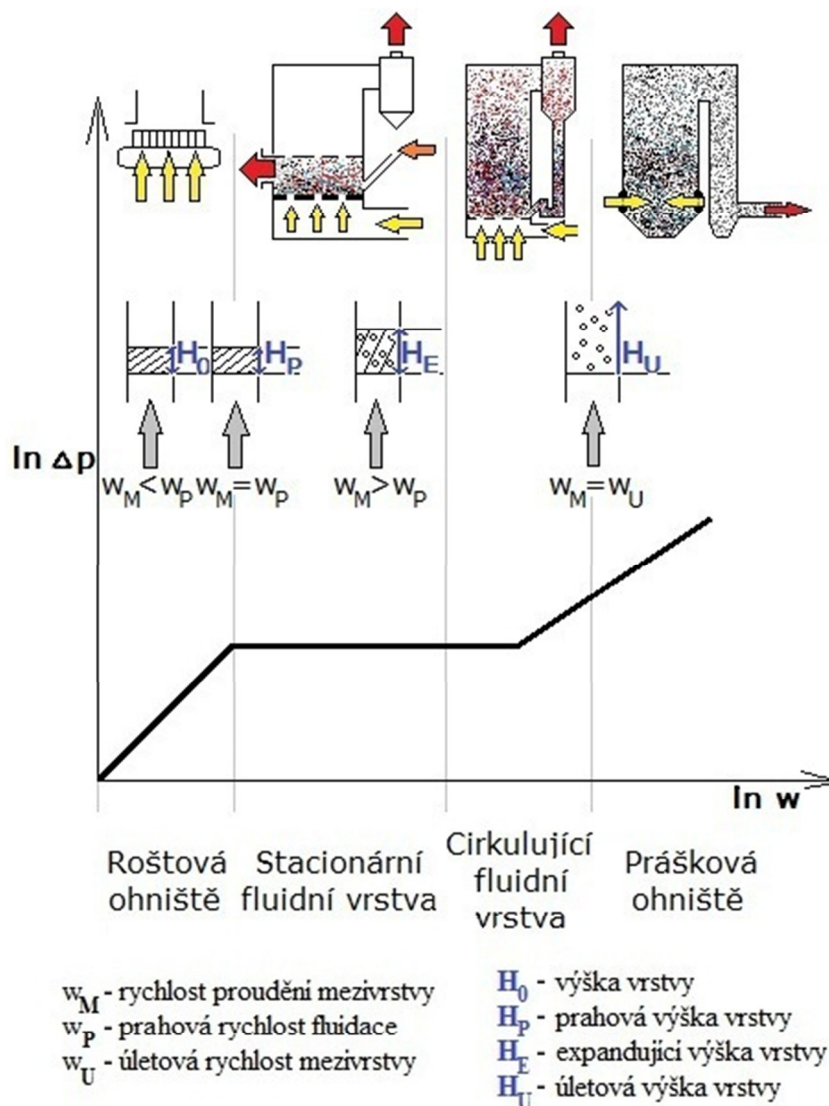


**Obrázek 9**  
*Kotel s cirkulující fluidní vrstvou (ACFB)*  
[23]

**Tabulka 8**

Optimální zrnitost pro spalování v ohništích [22]

Spalovací režim	Teplota spalování (°C)	Druh uhlí	Optimální zrnitost (mm)
Výtavné ohniště	1 350 – 1 550	černé	0 – 0,2
Granulační ohniště	950 – 1 100 1 100 – 1 250	hnědé	0 – 2
Fluidní ohniště se stacionární fluidní vrstvou	800 – 850	černé, hnědé	1,6 – 6,5
Fluidní ohniště s cirkulující fluidní vrstvou	800 - 850	černé, hnědé	pod 6,5

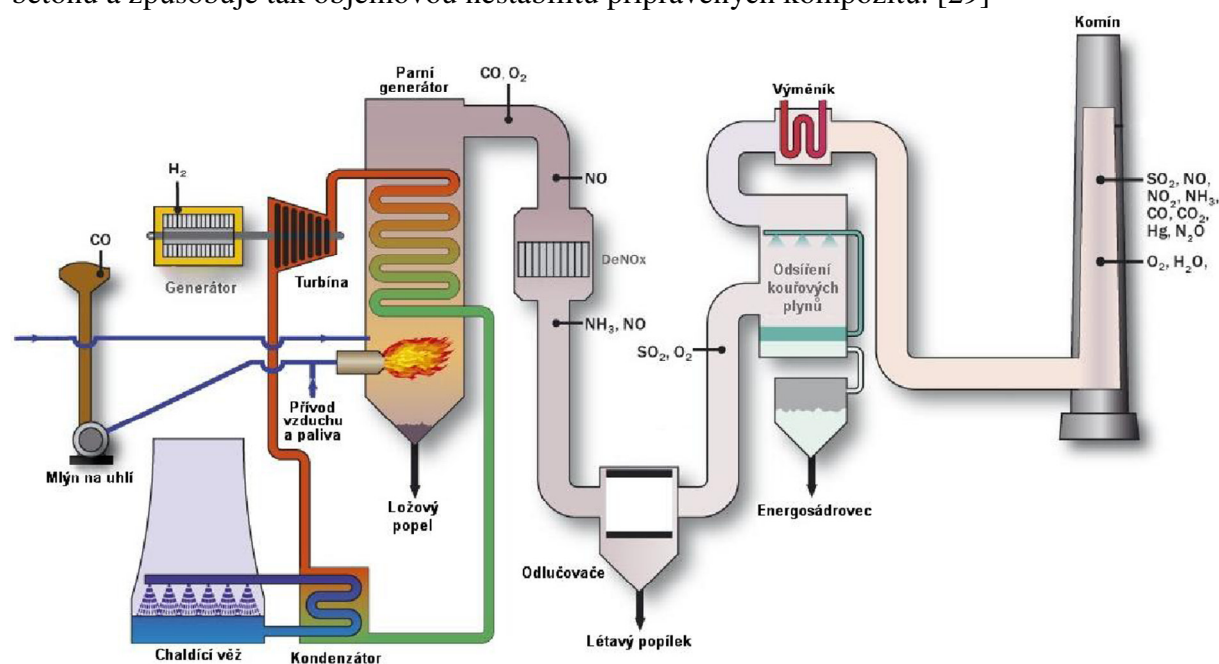


**Obrázek 10**

Klasifikace uhelných ohnišť [28]

## 2.2.4 Vysokoteplotní spalování

Vysokoteplotní spalování probíhá při teplotě okolo 1 200 – 1 700 °C. Nespalitelné zbytky tvoří z 80 % úletové popílkou, zbytek je struska a energosádrovec vzniklý odsířením spalín vápennou vypírku. Vysokoteplotní popílek sám o sobě nemá hydraulické vlastnosti a s vodou nereaguje. Ve směsi s hydroxidem vápenatým však reaguje podobně jako cement. Tato vlastnost se nazývá pucolanita a značně se liší v závislosti na složení popílkou. Vysokoteplotní popílkou vykazují kyselý charakter díky vysokému obsahu  $SiO_2$  (40 – 65 %). Liší se především množstvím  $CaO$ , kde vyšší obsah mají zpravidla popílkou ze spalování hnědého uhlí. Kvůli vysokým teplotám je oxid vápenatý velice málo reaktivní – tzv. mrtvě pálené vápno. Pro stavební účely je jeho přítomnost nežádoucí, protože zpomaluje hydrataci betonu a způsobuje tak objemovou nestabilitu připravených kompozitů. [29]



**Obrázek 11**  
Vznik popílkou [30]

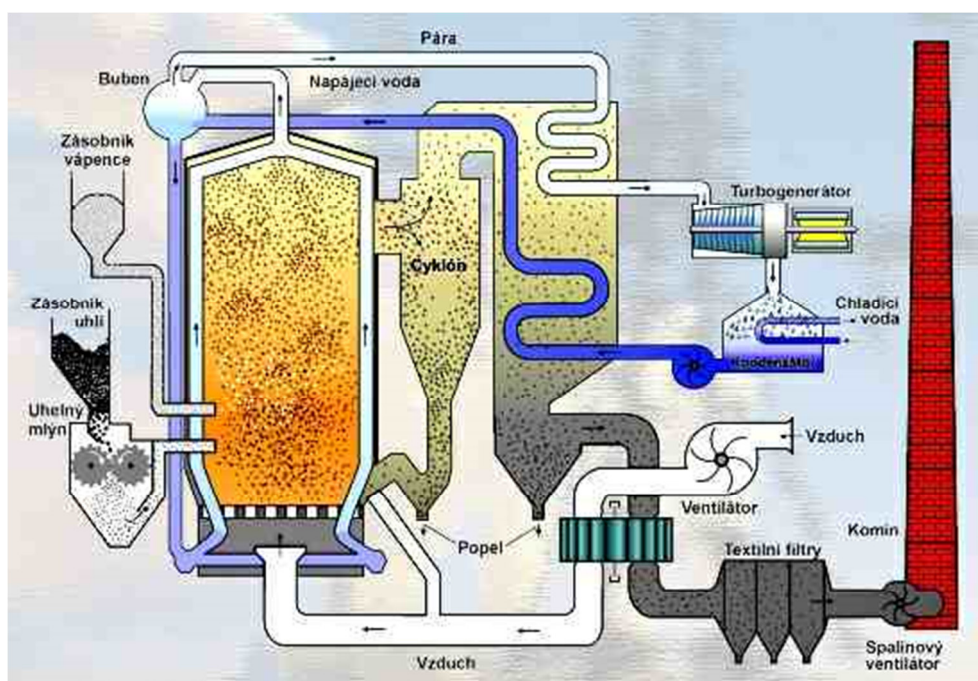
### 2.2.4.1 Hlavní procesy probíhající při vysokoteplotním spalování

Při procesu spalování vzniká variabilní množství oxidu siřičitého, který musí být odstraněn ze spalín, kvůli ochraně životního prostředí. Mezi nejužívanější patří dvě neregenerativní metody odsířování kouřových plynů z kotlů, a to mokrá metoda, při které jsou spaliny vedeny přes mokrou vápencovou vypírku a tzv. polosuchá metoda, při které jsou škodliviny ze spalín absorbovány na částicích vápenné suspenze a částice takto vzniklého produktu jsou následně vlivem tepla kouřových plynů usušeny. Kouřové plyny z elektrofiltrů, kde jsou zbaveny polétavého popílkou s vysokou účinností, jsou zchlazeny ve výměníku plyn – plyn a jsou zavedeny do procesu vypírky oxidů síry (absorbéru). V absorbéru potom dochází k reakci oxidů síry s uhličitánem vápenatým za vzniku siřičitanu vápenatého, a po dooxidování zavedených vzduchem vznikne konečný krystalický síran vápenatý. Sádrovec je z absorbéru odčerpáván a zbavován vody až na požadovanou úroveň vhodnou pro jeho další zpracování. Chemické reakce shrnující proces odsířování mokrou vápencovou metodou: [31]



## 2.2.5 Fluidní spalování

Fluidní spalování uhlí se řadí mezi moderní způsoby, kdy je proces řízen tak, aby bylo dosaženo co nejvyšší účinnosti při přeměně chemické energie paliva na energii tepelnou. Při fluidním spalování vzniká hrubší ložový popel a jemnější úletový popílek, který je zachycen na filtrech (cyklonech, odlučovačích). Do spalovaného mletého uhlí je dodáván mletý vápenec, který zde plní funkci sorbentu oxidu siřičitého. Vzniká tak bezvodý síran vápenatý, který zodpovídá za hydraulickou aktivitu popílků s vysokým obsahem vápníku. Navíc zde také zůstává zbytek nezreagovaného vápence ve formě měkce páleného reaktivního vápna. [31]



**Obrázek 12**

*Fluidní spalování [34]*

### 2.2.5.1 Hlavní procesy probíhající při fluidním spalování

Odsířování fluidních kotlů spočívá v dávkování směsi vzduchu a jemně rozemletého vápence do kotle nebo v přidávání mletého vápence do uhlí. Při tomto procesu odsíření probíhají zejména tyto reakce:



Kalcinace vápencem probíhá obecně při teplotách 800 – 900 °C, reakce mezi vzniklým  $\text{CaO}$  a  $\text{SO}_2$  probíhá významnější rychlostí mezi 600 – 850 °C. Produktem reakce vedle

nezreagovaného volného  $CaO$  je síran vápenatý. Siřičitan vápenatý při teplotách nad  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  není teplotně stabilní a disproportionuje podle reakce:  $4\text{ }CaSO_3 \rightarrow 3\text{ }CaSO_4 + CaS$ . (15)

Sulfid vápenatý se dále oxiduje na síran vápenatý. Kalcinaci vápence nad  $1\ 050\text{ }^{\circ}\text{C}$  již není vhodné realizovat, protože při těchto teplotách dochází k desaktivaci vzniklého kalcinátu (přepálení) v důsledku změny porézní struktury.

Z chemického hlediska reakce mezi  $CaO$  a  $SO_2$  představuje heterogenní reakci "tuhá látka – plyn". Počáteční stádium reakce lze vyjádřit jako reakci prvního řádu, tj. úměrnou koncentraci  $SO_2$ :

$$\frac{dx}{dt} = k \cdot c_{SO_2}. \quad (16)$$

Při záchytu  $SO_2$  se nejdříve na povrchu kalcinované částice vytvoří vrstva  $CaSO_4$ , která způsobuje, že další podíl  $SO_2$  se do částice dostává přes tuto vrstvu. [35]

## 2.3 Popílky

Popílky vznikají v uhelných elektrárnách jako vedlejší produkt výroby elektrické energie a jsou zachytávány továrními filtry. Jsou to heterogenní jemné prášky, jejichž základní částice jsou  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$  a  $CaO$ . Obsah skloviny v tuhých produktech spalování je 60 % a více. Tato sklovina vzniká při teplotě spalování. Za pucolánovou reaktivitu tuhých produktů spalování je zodpovědná hlavně skelná fáze, vzhledem ke schopnosti reagovat s  $Ca(OH)_2$ . Popílky také běžně obsahují zbytkový uhlík. Jeho množství zřídka přesáhne hodnotu 3 %, ale může nastat případ, kdy hodnota dosáhne až 10 %. [6]

Popílky také obsahují mnoho stopových prvků, jako jsou  $Cr$ ,  $Pb$ ,  $Ni$ ,  $Ba$ ,  $Sr$ ,  $V$  a  $Zn$ .

Částice tuhých produktů spalování jsou kulovité a přitom je přibližně 20 % částic dutých. To je důsledek zachycení plynů v roztavené fázi v průběhu spalování. [36]

Rozsah velikosti jednotlivých částic popílku může být již od méně než  $1\ \mu\text{m}$  do několika stovek  $\mu\text{m}$ . Specifický povrch popílků se pohybuje v rozmezí  $0,4 - 1,0\ \text{m}^2/\text{g}$ .

Vlastnosti popílků se mohou velmi měnit a závisí na složení anorganické složky uhlí, stupni rozmělnění, teplotní historii a oxidačních podmínkách. [6]

Popílky se převážně používají jako náhrada za jiný materiál ve stavebnictví, a to zejména jako surovina nebo jako přísada při výrobě cementu. [36]

Popílky lze rozdělit na tuhé produkty z vysokoteplotního a fluidního spalování. [6]

### Tabulka 9

Průměrné chemické složení popílku z klasického a fluidního spalování [37], [38]

Popílky	Zastoupení složek (%)										
	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$CaO$	$CaO$	$MgO$	$TiO_2$	$Fe_2O_3$	$SO_3$	$Na_2O$	$K_2O$	Z.Ž*
Klas. sp.	52,22	28,01	3,09	-	1,38	2,37	9,66	0,6	0,51	1,59	5,9
Fluid. sp.	42,34	19,44	18,21	2,58	2,49	1,55	5,79	5,26	0,37	1,41	10,7

\*Ztráta žháním

#### 2.3.1 Vysokoteplotní popílky

Hlavními fázemi vysokoteplotních popílků jsou amorfní  $SiO_2$ , křemen, obě vysokoteplotní modifikace – cristobalit i tridymit a mullit. Z toho vyplývá, že vysokoteplotní popílky vykazují výhradně puconalitu. [39]

Popílký z "klasického" způsobu spalování paliva při teplotách cca 1400 °C až 1600 °C se vyznačují obsahem hlavně  $\beta$  – křemene a mullitu ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ ). Rovněž obsahují sklovitou fázi, jejíž množství je zpravidla větší než 50 %, která zásadním způsobem ovlivňuje reaktivitu popílků s  $CaO$  nebo cementem jak za normální, tak za zvýšené teploty. Mullit se zúčastňuje reakce pouze ve velmi malé míře a výhradně za hydrotermálních podmínek.

Vysokoteplotní popílký samy o sobě nevykazují hydraulické vlastnosti. Smícháme – li je s hydroxidem vápenatým, reagují a vytváří stejné produkty jako při reakci cementu s vodou. Tato reakce se liší dle použitého typu a druhu vysokoteplotního popílký a lze ji označit jako puconalitu. Ve vysokoteplotním popílký, který byl skladován delší dobu ve vlhku, může být puconalový účinek porušen. [40]

Mineralogické složení vysokoteplotních popílků je dáno obsahem a druhem přirozených minerálů v uhlí a stupněm jejich tepelné přeměny (kaolinit, magnezit, dolomit, křemen, hematit, vápenec, siderit, anhydrit). Vysokoteplotní popílký lze rozdělit dále na křemičité (s nízkým obsahem  $CaO$ ) a vápenaté (s vysokým obsahem  $CaO$ ). [6]

### 2.3.1.1 Vápenatý popílek

Vápenatý popílek je jemný prášek, který má hydraulické nebo puconalové vlastnosti. Sestává hlavně z aktivního oxidu vápenatého, aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého. Zbytek je tvořen oxidem železitým a jinými sloučeninami. Obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí být menší než 10,0 % hmotnosti. Vápenatý popílek obsahující aktivní oxid vápenatý v rozmezí 10,0 % až 15,0 % hmotnosti musí obsahovat nejméně 25,0 % hmotnosti aktivního oxidu křemičitého. [10]

### 2.3.1.2 Křemičité popílek

Křemičité popílek je jemný prášek převážně sestávající z kulových částic s puconalovými vlastnostmi. Jeho hlavními složkami jsou aktivní oxid křemičitého a oxid hlinitý. Ve zbytku je potom obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být nižší než 10,0 % hmotnosti, obsah oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1,0 % hmotnosti. Obsah aktivního oxidu křemičitého nesmí být menší než 25,0 % hmotnosti. [10]

## 2.3.2 Fluidní popílký

Fluidní popílek je tvořen jemnými prachovými částicemi, převážně kulovitěho tvaru, pevnými nebo dutými, většinou amorfní povahy. Objemová hmotnost se pohybuje v rozsahu 2 100 – 3 000 kg/ m<sup>3</sup>, zatímco specifický měrný povrch se může pohybovat v rozmezí 170 – 1 000 m<sup>2</sup>/kg. Mineralogické složení fluidních popílků může být stanoveno pomocí rentgenové strukturní analýzy. Hlavními minerálními fázemi jsou křemen, kaolinit, illit a siderit. [31]

Chemicko – mineralogické složení fluidních popílků se vzhledem k použité technologii spalování zcela zásadně odlišuje od skladby klasických vysokoteplotních popílků. Fluidní popílký obsahují hlinitokřemičitou fázi, křemen, nerozpustný anhydrit II, volné  $CaO$ , event. též  $Ca(OH)_2$  a  $CaCO_3$ . Vysokoteplotní popílký vykazují výhradně puconalitu, kdežto fluidní popílký mají díky přítomnosti vápenných iontů samy o sobě i hydraulické schopnosti. Po rozmíchání fluidních popílků s vodou dochází totiž ihned ke vzniku ettringitu jako raného hydratačního produktu, u kterého může s dobou uložení docházet k jeho dílčí přeměně na monosulfát případně i sádrovec a patrně i CAH – fáze. [41]

### **2.3.2.1 Hrubý ložový popel**

Je také produkován technologií fluidního spalování. Jedná se o částice s vyšší hmotností i velikostí, o podíl, který při spalování propadá roštem pod fluidním prstencem. Chemické i fázové složení ložového popele je přímým nositelem dobrých hydraulických vlastností, a to zejména díky vysokému obsahu měkce páleného vápna a anhydritu. Díky těmto, ale i ostatním složkám ložového popele tento materiál tuhne a tvrdne již při smíchání se samotnou vodou. [42]

### **2.3.2.2 Jemný popílek z elektrických odlučovačů**

Jako další produkt fluidního spalování lze zařadit jemný popílek, který je zachycován elektrickými odlučovači. Je tvořen malými lehkými částicemi, které jsou při procesu spalování unášeny se spalinami do komína, kde jsou následně na elektrických odlučovačích odlučovány. Obsah volného i celkového oxidu vápenatého je výrazně nižší, než u ložového popele. Ten je spolu s anhydritem hlavním nositelem hydraulických vlastností. [42]

### 3 Experimentální část

V experimentální části této práce jsou přiblíženy metody a přístroje, které byly použity pro vyhodnocení vstupních surovin a výsledných vzorků. Jsou zde popsány používané suroviny a chemikálie pro jejich přípravu.

#### 3.1 Použité chemikálie a suroviny

Portlandský cement – CEM I 42,5 R Mokrý

ChrysoFluid CE 40W – tekutý superplastifikátor na bázi polynaftalenu

ChrysoFluid Optima 185 – tekutý superplastifikátor na bázi polykarboxylátu a polyfosfátu

ChrysoFluid GT – tekutý superplastifikátor na bázi polymelaminu

ChrysoFluid Optima 100 – tekutý bezchloridový superplastifikátor na bázi polynaftalenu

Fluidní filtrový popílek Tisová FK 12

Fluidní ložový jemně mletý popílek Tisová FK 11

Kamenivo – frakce 0/ 4 mm, 0/ 8 mm, 8/ 16 mm

Vápenný hydrát CL 90 – S Vitošov

Destilovaná voda

#### 3.2 Příprava testovacích směsí

V experimentální části bylo připraveno a testováno několik typů past, malt a betonů.

Jako zkušební vzorky past a malt, pro stanovení pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku, byly použity trámečky o rozměrech 20×20×100 mm (obr. 14). Příprava těchto past a malt probíhala na kuchyňském robotu. Vždy bylo nejprve do mísy nalito určité množství vody, superplastifikátoru, a poté bylo přisypáno dané množství popílku, cementu a kameniva. Následně bylo dolito určité množství vody tak, aby konzistence vzniklých směsí byla vždy stejná. Každá směs byla následně asi 20 sekund míchána. Na čerstvých směsích byl testován počátek a konec tuhnutí dle Vicata a následně byly směsi vloženy do ocelových forem (obr. 13), které byly následně na vibračním stole zvlivňovány. Směsi byly ponechány tvrdnutí v neprodyšné fólii při laboratorní teplotě a po 24 hodinách odformovány, čímž vznikly požadované zkušební vzorky.

Jako zkušební vzorky betonů, pro stanovení pevností v tahu za ohybu a pevností v tlaku, byly použity trámce o rozměrech 10×10×40 cm a kostky o rozměrech 10×10×10 cm a 15×15×15 cm (obr. 16). Pro přípravu těchto směsí byla použita velká laboratorní míchačka na beton BS LBM – 75 značky Beton System. Vždy byla nejprve nalita voda a dané množství plastifikátoru a následně přidáno pojivo (popílek, cement, vápenný hydrát) a kamenivo (od největší po nejmenší frakci). Na čerstvé směsi byla provedena zkouška konzistence a směs byla vpravena do ocelových forem (obr. 15), které byly následně na vibračním stole zvlivňovány. Směsi byly ponechány tvrdnutí v neprodyšné fólii při laboratorní teplotě a po 24 hodinách odformovány, čímž vznikly požadované zkušební vzorky.



**Obrázek 13**  
*Ocelová forma 20×20×100 mm*



**Obrázek 14**  
*Zkušební vzorky 20×20×100 mm*



**Obrázek 15**  
*Formy trámčů 10×10×40 cm a kostek 15×15×15 cm*



**Obrázek 16**  
*Vzorky betonových trámčů 10×10×40 cm a kostek 15×15×15 cm*

### 3.3 Metody

V následující části jsou blíže popsány použité analytické a experimentální metody.

#### 3.3.1 Rentgenová difrakční analýza

Zásady využití práškové difrakční rentgenografie lze shrnout na následující části:

- Všechny krystalické látky (fáze) dávají charakteristický práškový rentgenogram.
- Ve směsi difraktuje každá fáze nezávisle a výsledný rentgenogram je superpozicí rentgenogramů jednotlivých fází.
- Intenzita difrakčních linií každé fáze je úměrná kvantu této fáze ve směsi. [43]

Jakmile dopadne monochromatické rentgenové záření na jemně rozpráškovaný krystalický vzorek v kapiláře, dojde k difrakci pouze na rovinách, které splňují tzv. Braggovu podmínku:

$$n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin \theta, \quad (17)$$

$n$ ...celé číslo

$\lambda$ ...je vlnová délka rentgenového záření

$d$ ...vzdálenost dvou sousedních rovin v krystalu

$\theta$ ...úhel difrakce rentgenového záření.

Sledovanou závislostí je intenzita rentgenového záření, dopadajícího na senzor, na úhlu difrakce. Výsledné spektrum se porovnává s databází krystalických minerálů a vyhodnocuje.

Pouze krystalické látky lze podrobit rentgenové difrakční analýze. [44]



**Obrázek 17**

*Rentgenový difraktometr [45]*

### 3.3.2 Skenovací elektronová mikroskopie (SEM)

Skenovací elektronový mikroskop (SEM) patří mezi zařízení určené ke sledování povrchů různých objektů. Lze jej považovat za analogii světelného mikroskopu v dopadajícím světle, na rozdíl od něho je však konečný obraz tvořen pomocí sekundárního signálu - odražených nebo sekundárních elektronů. Kvůli tomu lze zobrazení v SEM považovat za nepřímou metodu. Velkou předností SEM oproti světelnému mikroskopu je jeho velká hloubka ostrosti, díky které lze z dvojrozměrných fotografií ze SEM nalézt jistý trojrozměrný aspekt. [46]



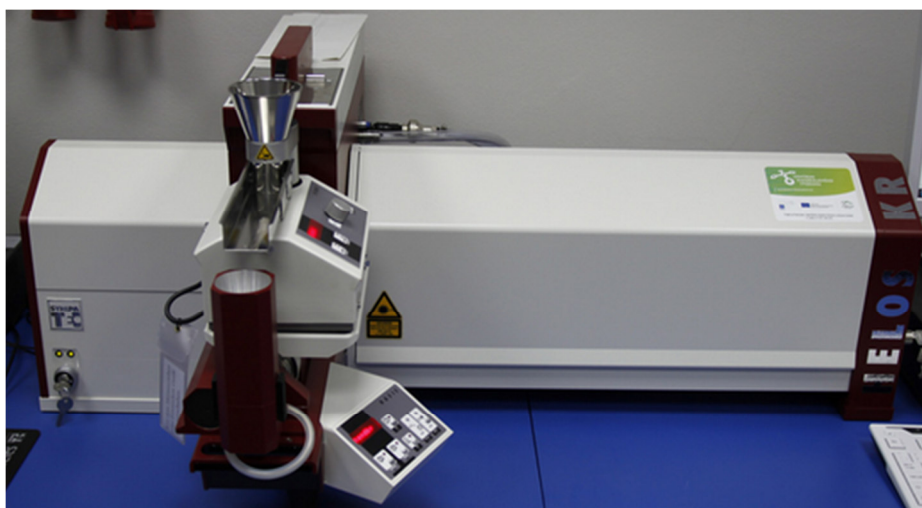
**Obrázek 18**

*Skenovací elektronový mikroskop [47]*

### **3.3.3 Analýza velikosti částic pomocí dynamického rozptylu světla**

Laserovou analýzu velikosti částic lze použít k měření velikosti částic práškových vzorků v mezích od 0,1 do 3 000  $\mu\text{m}$ . Touto metodou je umožněno měřit a srovnávat výsledky suchého a mokrého způsobu měření, s širokou možností prezentace výsledků. [48]

K ohybu (difrakci) laserového paprsku, který je způsoben přítomností analyzovaných částic, dochází pod úhlem nepřímo úměrným velikosti těchto částic. S klesající velikostí částic vzrůstá difrakční úhel logaritmicky, naproti tomu intenzita záření klesá v závislosti na objemu částice. Velké částice vyvolají ohyb laserového paprsku pod malým úhlem, a proto paprsek, který dopadne na detektor má velkou intenzitu. Naproti tomu malé částice vyvolají difrakci laserového paprsku pod velkým úhlem, avšak paprsek, který dopadá na detektor má nízkou intenzitu. Zjištěný průběh difrakce laserového paprsku je dále použit k výpočtu distribuce velikosti částic. [49]



**Obrázek 19**

*Laserový analyzátor částic [50]*

### 3.3.4 Stanovení počátku a konce tuhnutí dle Vicata

Vicatův prstenec, do kterého se ukládá kaše pojiva, musí být vyroben z tvrzené pryže. Prstenec musí mít kuželový tvar. Při výšce  $(40 \pm 0,2)$  mm musí mít průměr  $(70 \pm 5)$  mm nahoře a  $(80 \pm 5)$  mm dole. Musí být dostatečně tuhý. Umisťuje se na základové skleněné destičce, která musí mít tloušťku nejméně 2,5 mm a musí být větší než prstenec. [51]

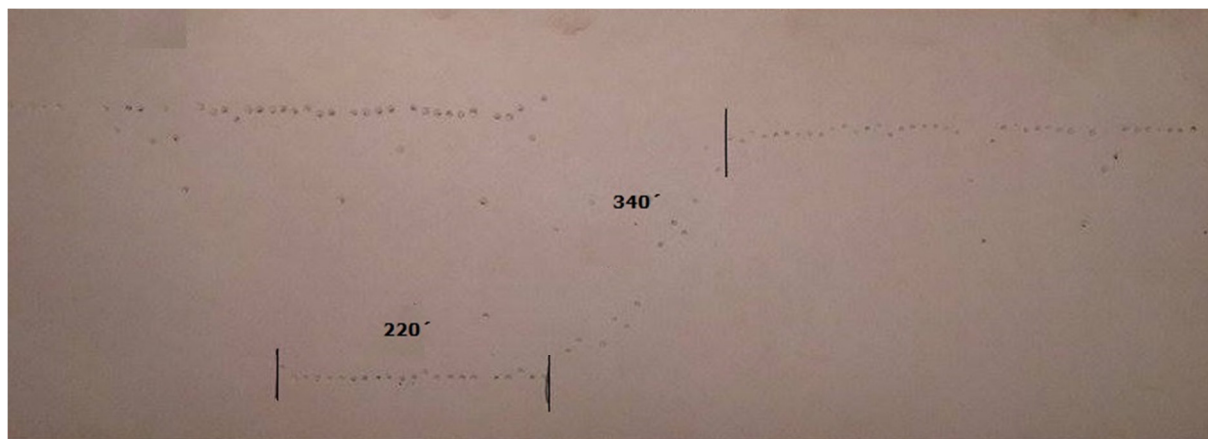
Stanovení počátku a konce doby tuhnutí bylo provedeno na automatickém Vicatově přístroji (obr. 20). Počátek i konec tuhnutí byl sledován svislým vnikáním ocelové jehly do připravené směsi umístěné ve Vicatově prstenci (obr. 21). Výsledky jednotlivých vpichů byly zaznamenány na papír (obr. 22), do kterého byl zabodnut hrot vždy dle aktuální hloubky penetrace ocelové jehly s frekvencí 1 vpich za 10 minut.



**Obrázek 20**  
*Vicatův přístroj (vyroben 1979)*



**Obrázek 21**  
*Vicatův prstenec*



**Obrázek 22**  
*Výsledek analýzy počátku a konce tuhnutí na Vicatově přístroji*

### 3.3.5 Stanovení objemové hmotnosti

Objemovou hmotnost zatvrdlé směsi lze vypočítat z hmotnosti zatvrdlé pasty či malty, vztažené na daný objem. Výpočet byl proveden dle vztahu:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (18)$$

kde  $\rho$  je objemová hmotnost ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $m$  je hmotnost zkušebního trámečku (kg) a  $V$  je objem zkušebního tělesa ( $\text{m}^3$ ). [52]

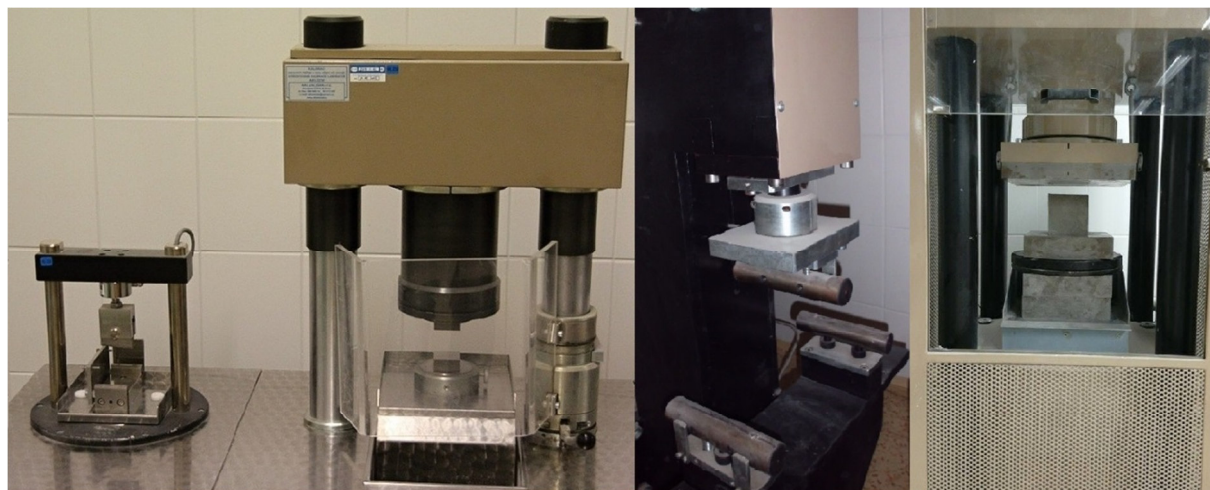
### 3.3.6 Stanovení pevnosti v tlaku a v tahu za ohybu

Pro testování vyrobených zkušebních trámečků byl použit přístroj DESTEST 3310 od společnosti Beton System. Pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu byla použita lamačka BS-10 a BS-100 a pro stanovení pevnosti v tlaku byl použit lis BS-300 a BS-3000. Pevnost byla měřena po 1, 7 a 28 dnech zrání.

Pro výpočet hodnoty pevnosti v Pascalech ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/mm}^2$ ) se použije vztah:

$$\sigma = 0,4 \cdot F, \quad (19)$$

kde  $\sigma$  je tlaková pevnost materiálu (MPa) a  $F$  je síla potřebná k porušení trámečku. [53]



**Obrázek 23**

Zařízení DESTEST 3310

**Tabulka 10**

Technické parametry lisu BS – 300 a lamačky BS – 10 [53]

	BS - 300	BS - 10	BS - 100	BS - 3000
Jmenovitá zatěžovací síla [kN]	300	10	100	3000
Minimální zatěžovací síla [kN]	6	0,2	5	150
Rychlost zatěžování [ $\text{Ns}^{-1}$ ]	0,3 ÷ 99,9k	5 ÷ 99,9k	0,3 ÷ 99,9k	5 ÷ 999k
Přesnost měření * [%]	± 1	± 1	± 1	± 1
Výška pracovního prostoru [mm]	55	55	160	340
Zdvih tlakového válce [mm]	55	55	80	100

\* od 5 % do 100 % jmenovité lisovací síly

### 3.3.7 Objemová stálost

Objemová stálost připravených vzorků byla sledována na základě měření dilatace zkušebních těles v závislosti na čase. Zkušební trámečky byly opatřeny kovovými kontakty pro jejich uchycení do dilatometru.

### 3.4 Analýza vstupních surovin

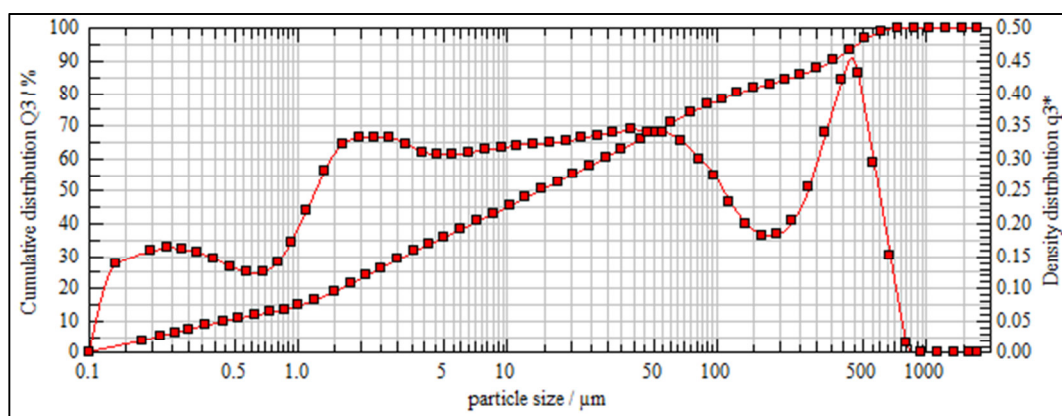
#### 3.4.1 Laserová analýza vstupních surovin

Velikost částic byla zjištěna za využití přístroje SYMPATEC HELOS KR.

**Tabulka 11**

Velikost částic vstupních surovin

		Cement I 42,5 R	Fluidní filtrový popílek	Fluidní ložový popílek	Vápenný hydrát
X <sub>50</sub>	[μm]	8,63	14,52	11,54	1,69
X <sub>90</sub>		37,86	359,01	339,89	4,03

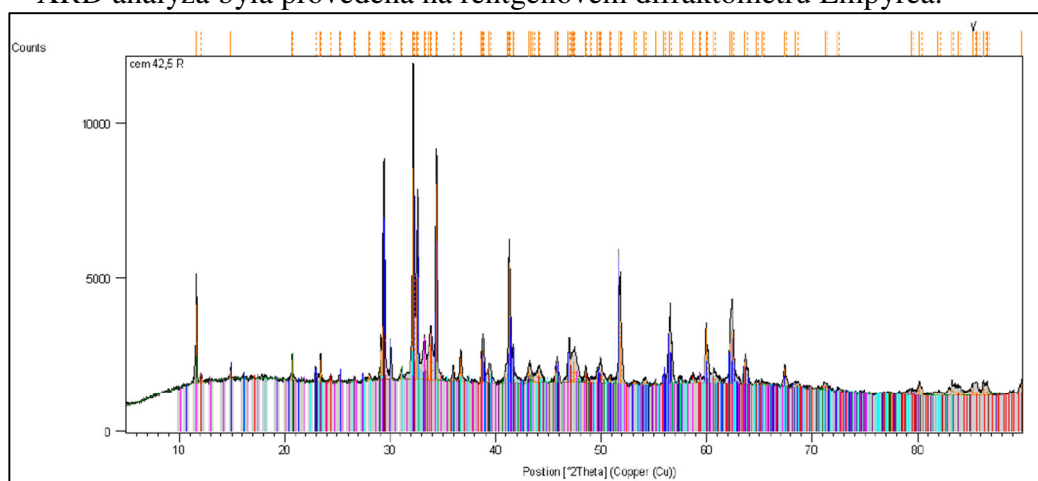


**Obrázek 24**

Fluidní filtrový popílek – ukázka grafického záznamu laserové analýzy (distribuce částic)  
Záznamy zbylých vstupních surovin jsou zařazeny v sekci přílohy.

#### 3.4.2 XRD analýza vstupních surovin

XRD analýza byla provedena na rentgenovém difraktometru Empyrea.



**Obrázek 25**

Cement I 42,5 R

Legenda:  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - Sádovec,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  - Hatrurit,  $\text{Ca}_2(\text{Fe}_2\text{O}_5)$  - Brownmillerit,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  - Larnit,  $\text{CaCO}_3$  - Kalcit,  $\text{SiO}_2$  - Křemen

**Tabulka 12**

Fázové složení vstupních surovin

Fáze*	Vzorec	CEM 42,5 R I	Filtrový popílek	Ložový popílek	Vápenný hydrát	Kamenivo
Hatrurit	$Ca_3SiO_5$	+	-	-	-	-
Brownmillerit	$Ca_2(Fe_2O_5)$	+	-	-	-	-
Sádrovec	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	+	-	-	-	-
Kalcit	$CaCO_3$	+	+	+	+	-
Larnit	$Ca_2SiO_4$	+	-	-	-	-
Křemen	$SiO_2$	-	+	+	-	+
Anhydrit	$CaSO_4$	-	+	+	-	-
Hematit	$Fe_2O_3$	-	+	+	-	-
Vápno	$CaO$	-	+	+	-	-
Anatas	$TiO_2$	-	+	+	-	-
Albit	$NaAlSi_3O_8$	-	+	+	-	+
Ortoklas	$KAlSi_3O_8$	-	+	+	-	+
Magnetit	$Fe_3O_4$	-	+	+	-	-
Portlandit	$Ca(OH)_2$	-	-	+	+	-
Muscovit	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	-	-	-	-	+
Tremolit	$Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2$	-	-	-	-	+

\* " + " fáze je ve vzorku zastoupena, " - " fáze není ve vzorku zastoupena

Záznamy zbylých vstupních surovin jsou zařazeny v sekci přílohy.

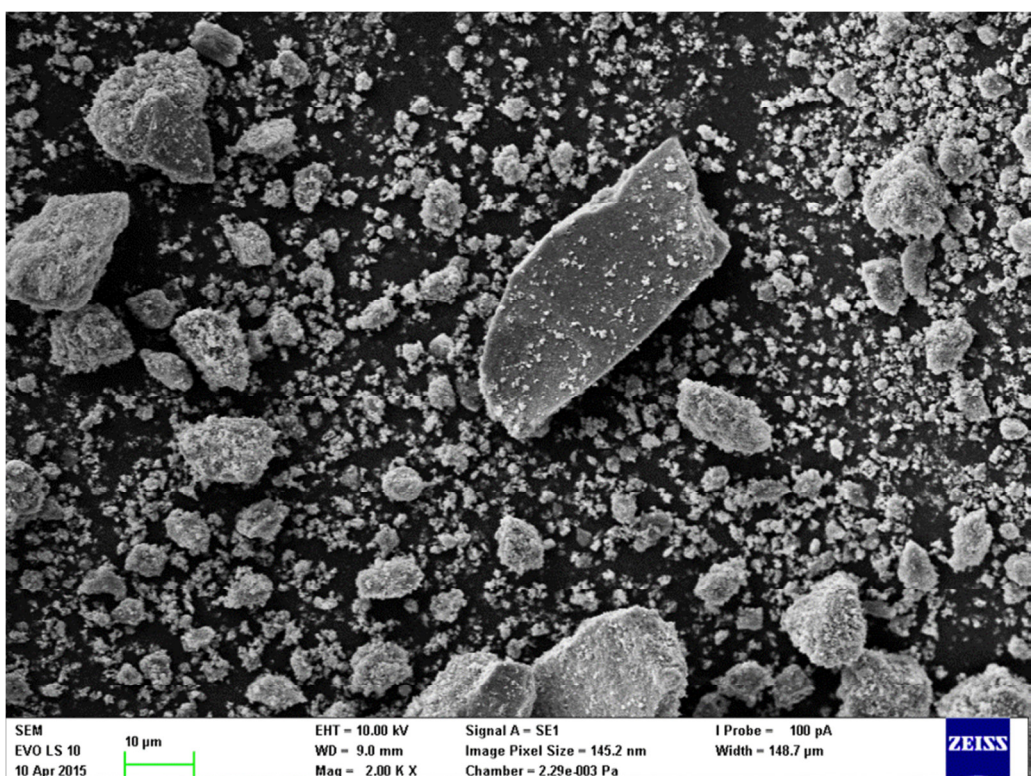
**3.4.3 Světelná a skenovací mikroskopie vstupních surovin**

Snímky ze světelné mikroskopie byly pořízeny za využití stereomikroskopu STEMI 2 000 – Zeiss. Naproti tomu snímky ze skenovací mikroskopie byly pořízeny za použití mikroskopu Zeiss Evo LS 10 při zvětšení 2 000 ×.



**Obrázek 26**

*Záznam světelné mikroskopie pro fluidní ložový popílek FK 11 Tisová*



**Obrázek 27**

*Záznam SEM analýzy zvětšení 2 000 × pro fluidní ložový popílek FK 11 Tisová*

Veškeré fotografie vstupních surovin jsou zařazeny v sekci přílohy.

## 4 Výsledky a diskuze

V této kapitole jsou sumarizovány výsledky získané v průběhu vytváření vhodných pojivových kombinací pro pasty, malty a betonové směsi. V případě prvních testů byl nejprve zkoumán ideální typ a vhodné množství superplastifikátoru. V případě testování past byl zkoumán obsah popílku (5 – 80 %) v kombinaci s cementem a vápenným hydrátem, v pojivové části kompozice. V případě testování malt bylo zkoumáno různé procentuální zastoupení popílku ve směsi (20 – 80 % popílku). Pro testování betonových směsí bylo vybráno složení nejlepších směsí malt, dle kterých byly následně betonové směsi vytvořeny a testovány. Jednotlivé experimenty jsou popsány v příslušných kapitolách.

### 4.1 Vliv přídavku různých druhů superplastifikátorů – testy na pastách

Tato kapitola se zabývá testováním a následným výběrem optimálního typu a optimálního množství přídavku superplastifikátoru pro testované směsi. V praxi je obvykle do betonových směsí přidáváno max 1 % hmot. superplastifikátoru, proto bylo pro prvotní zkoušky zvoleno množství 0,6 % hmot. superplastifikátoru. Jako další krok byly vybrány čtyři typy komerčně používaného superplastifikátoru Chryso Fluid – GT, CE 40 W, Optima 100 a Optima 185. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 13. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 14 a na obrázcích č. 28 a č. 29.

**Tabulka 13**

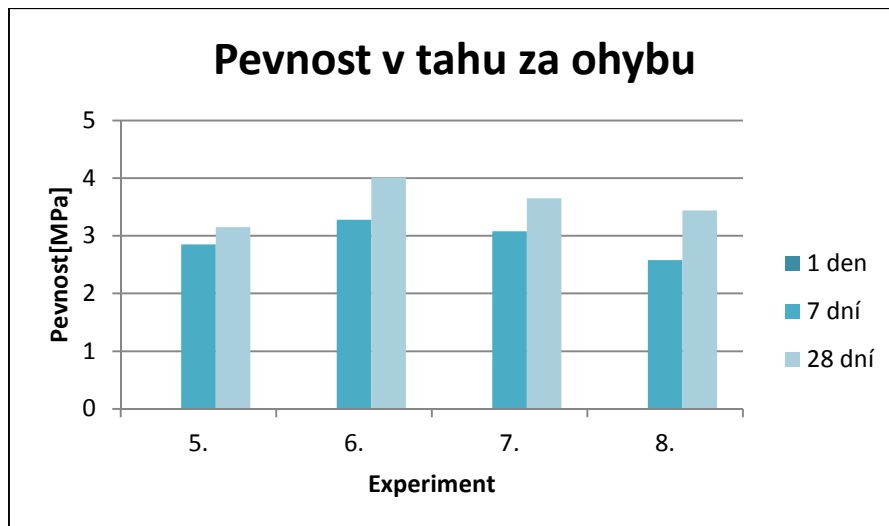
Složení vzorků pro výběr superplastifikátoru

Experiment		5.	6.	7.	8.
Superplastifikátor	Typ	GT	CE 40W	Optima 100	Optima 185
Chryso Fluid	[ml]	4,8	4,8	4,8	4,8
Voda		240	240	240	240
Filtrový popílek	[g]	400	400	400	400

**Tabulka 14**

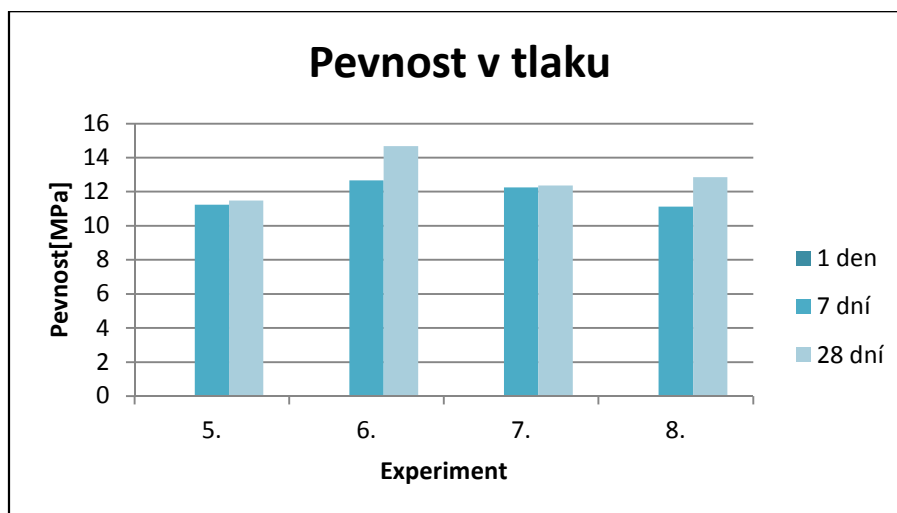
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku vzorků pro výběr superplastifikátoru

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku		
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní
	[MPa]					
5.	0,00	2,85	3,15	0,00	11,23	11,49
6.	0,00	3,28	4,01	0,00	12,66	14,68
7.	0,00	3,08	3,65	0,00	12,26	12,36
8.	0,00	2,58	3,44	0,00	11,13	12,86



**Obrázek 28**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 5. – 8. v časové závislosti*



**Obrázek 29**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 5. – 8. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo zjistit optimální množství a nejvhodnější typ superplastifikátoru pro pojivovou složku zamýšlené betonové směsi.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. V této části experimentu nebyly pevnost v tahu za ohybu ani pevnost v tlaku vzniklých směsí nijak zásadním parametrem, jelikož směsi dosahovaly přibližně stejných pevností v tahu za ohybu i pevností v tlaku. Za stěžejní parametr, dle kterého byl následně superplastifikátor pro testování vzorků vybrán, byla zvolena snadná zpracovatelnost vzniklých směsí.

Za směs s nejlepší zpracovatelností byla označena směs č. 8, kde byl jako superplastifikátor použit Chryso Fluid Optima 185 na bázi polykarboxylátu. Díky své reologii, dobré zpracovatelnosti vzniklé směsi a v neposlední řadě i díky dobrým získaným pevnostem v tahu za ohybu a pevnostem v tlaku, byl tento superplastifikátor zvolen za výchozí pro vytváření dalších zkušebních těles.

## 4.2 Vliv přídavku fluidního jemně mletého ložového popílku na vlastnosti alternativních betonů

Tato kapitola se zabývá vlivem přídavku fluidního ložového popílku na vlastnosti alternativních betonů. Testování směsí probíhalo na pastách, maltách a betonech.

### 4.2.1 Testy na pastách

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem pasty s optimální kombinací fluidního ložového popílku a dalšího pojiva, konkrétně cementu, v různých poměrech. Byly zkoumány pasty při poměrech 5/95, 10/90, 15/85, 20/80, 30/70, 50/50, 60/40, 70/30 a 80/20 % cementu a fluidního jemně mletého ložového popílku. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. U všech vzorků byl následně stanoven počátek a konec tuhnutí dle Vicata a objemová hmotnost jednotlivých vzorků. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 15. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 16 a na obrázcích č. 30 a č. 31.

**Tabulka 15**

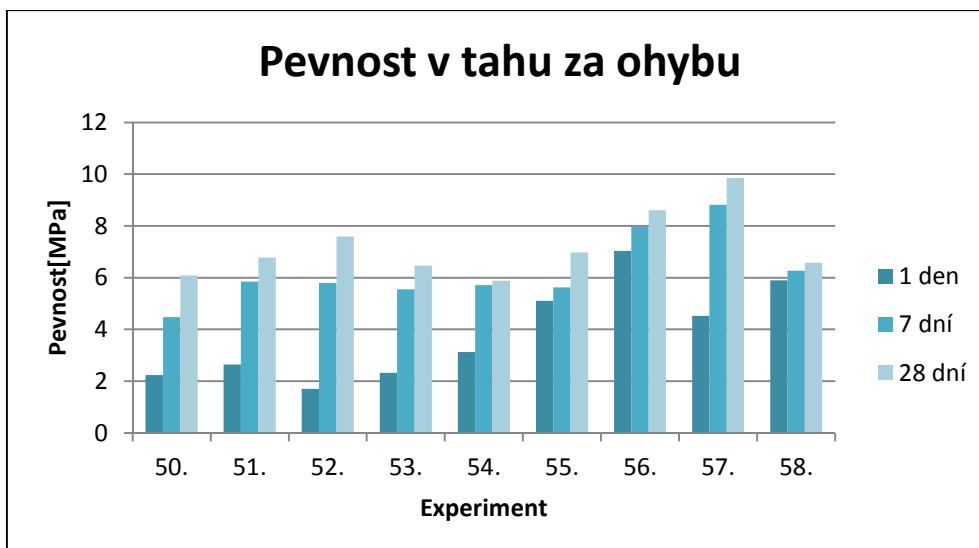
Složení past pro vzorky 50. – 58.

Experiment		50.	51.	52.	53.	54.	55.	56.	57.	58.
Poměr CEM/ popílek	[%]	5/95	10/90	15/85	20/80	30/70	50/50	60/40	70/30	80/20
Popílek ložový	[g]	570	540	510	480	420	300	240	180	120
Cement 42,5 R		30	60	90	120	180	300	360	420	480
SP Optima 185	[ml]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Voda		215	210	205	200	195	180	175	170	165

**Tabulka 16**

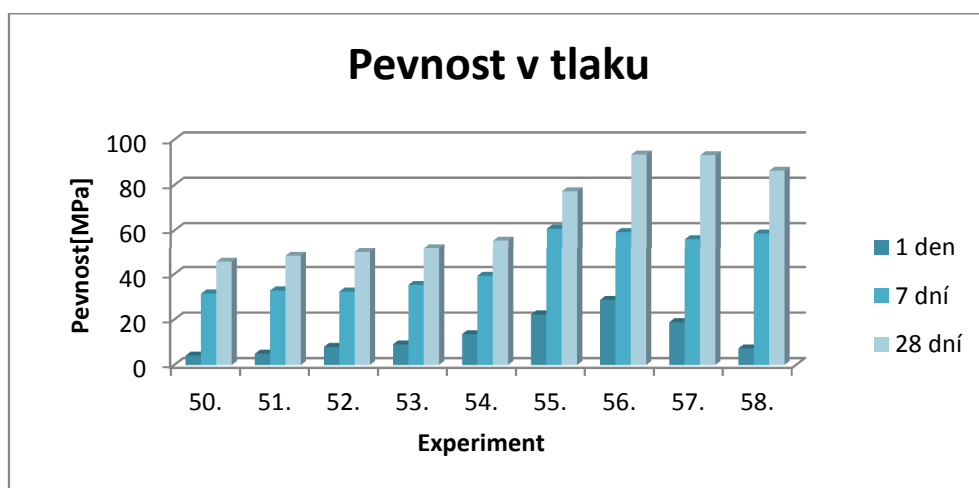
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku, objemové hmotnosti a počátku a konce tuhnutí pro vzorky past 50. – 58.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost	Počátek tuhnutí	Konec tuhnutí
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní			
	[MPa]								
50.	2,24	4,48	6,08	4,17	31,39	45,46	1775,00	150	290
51.	2,64	5,85	6,78	4,92	32,79	48,08	1807,50	130	280
52.	1,70	5,80	7,59	7,97	32,25	49,80	1847,50	130	270
53.	2,32	5,55	6,47	9,07	35,23	52,11	1890,00	130	290
54.	3,13	5,71	5,88	13,58	39,29	55,43	1885,00	120	300
55.	5,10	5,62	6,97	22,25	60,73	77,22	1985,00	120	330
56.	7,03	7,96	8,61	28,67	59,23	93,30	1927,00	120	250
57.	4,52	8,82	9,86	18,83	56,11	93,08	2060,00	130	310
58.	5,90	6,27	6,58	7,30	58,56	86,24	2005,75	150	320



**Obrázek 30**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 50. – 58. v časové závislosti*



**Obrázek 31**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 50. – 58. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální poměr fluidního jemně mletého ložového popílku a cementu tak, aby byla získána pasta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh maltových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidavkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 50. – 58. pohybuje od 1,70 MPa do 9,86 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 57. Pevnost v tlaku se pohybovala od 4,17 MPa do 93,30 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 56. U všech směsí byl také stanoven počátek a konec doby tuhnutí dle Vicata. Směs s nejkratším počátkem i koncem tuhnutí byla směs č. 56, kdy počátek tuhnutí nastal po 120 minutách a konec tuhnutí po 250 minutách.

Celkově dosahovaly pasty po 28 dnech vysokých pevností v tahu za ohybu i v tlaku. Díky nejvyšší pevnosti v tlaku, nejkratšímu počátku a konci tuhnutí byla vybrána směs č. 56 za vhodnou předlohu pro namíchání a testování malt.

## 4.2.2 Testy na maltách

Testování malt se dělí na dvě části. První část se zabývá testováním a následným výběrem malty s optimálním poměrem fluidního jemně mletého ložového popílku a kameniva. Byly testovány poměry pojivo – kamenivo 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20. Druhá část se zabývá testováním a následným výběrem malty s optimální kombinací fluidního jemně mletého ložového popílku, cementu a kameniva, kdy bylo rovněž použito poměrů pojivo – kamenivo 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. U všech vzorků byla sledována jejich dilatace a objemová hmotnost. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulkách č. 17 a č. 19. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulkách č. 18 a č. 20, a také na obrázcích č. 32, č. 33, č. 34 a č. 35.

**Tabulka 17**

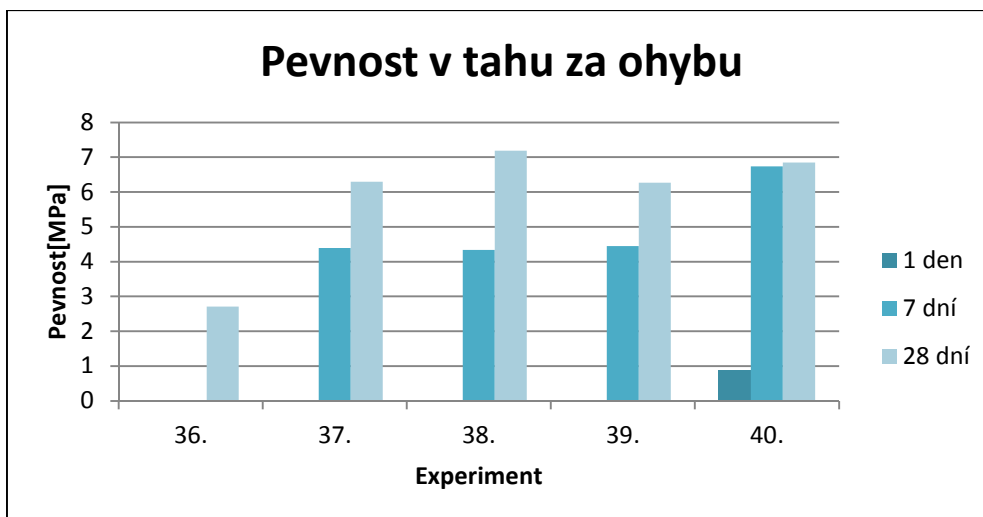
Složení malt pro vzorky 36. – 40.

Experiment		36.	37.	38.	39.	40.
Pojivo	[%]	20	40	50	60	80
Kamenivo		80	60	50	40	20
Popílek ložový	[g]	120	240	300	360	480
Kamenivo 0/4 mm		480	360	300	240	120
SP Optima 185	[ml]	0,72	1,44	1,8	2,16	2,88
Voda		95	100	120	135	165

**Tabulka 18**

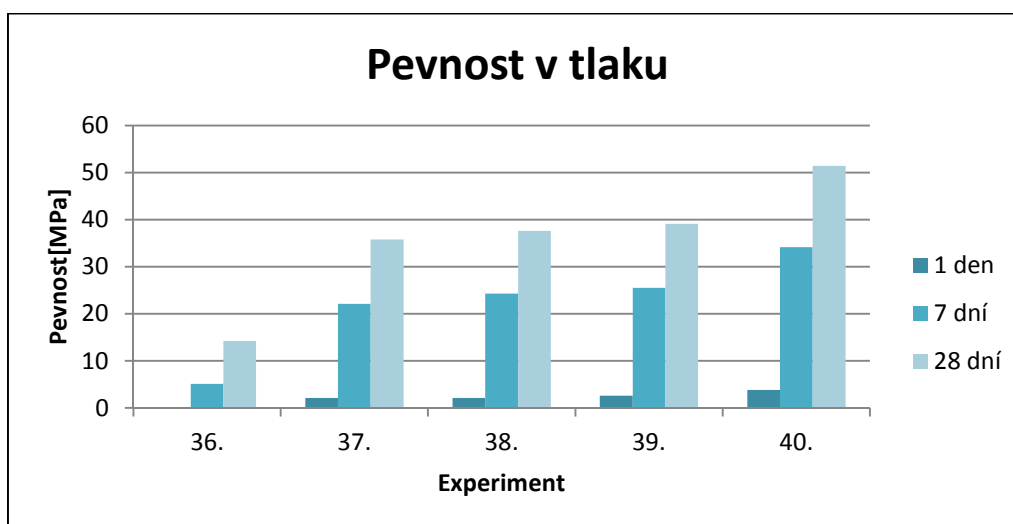
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku a objemové hmotnosti pro vzorky malt 36. – 40.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní	
	[MPa]						[kg/m <sup>3</sup> ]
36.	0,00	0,00	2,71	0,00	5,12	14,26	1865,00
37.	0,00	4,39	6,30	2,11	22,08	35,77	2060,00
38.	0,00	4,34	7,19	2,11	24,27	37,59	1950,00
39.	0,00	4,45	6,27	2,62	25,52	39,11	1840,00
40.	0,88	6,74	6,85	3,83	34,14	51,51	1910,00



**Obrázek 32**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 36. – 40. v časové závislosti*



**Obrázek 33**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 36. – 40. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální poměr fluidního jemně mletého ložového popílku a cementu tak, aby byla získána malta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh pro druhou část testování maltových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 36. – 40. pohybuje od 0,88 MPa do 7,19 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 36. až 39. pevnost v tahu za ohybu pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 38. Pevnost v tlaku se pohybovala od 4,34 MPa do 51,41 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 40.

Celkově dosahovaly malty s kamenivem po 28 dnech uspokojivých pevností. Jako předloha pro další míchání a testování malt byla vybrána směs č. 39, kde byl poměr pojivo – kamenivo 60:40. Tato směs sice nedosahovala nejvyšších pevností, ale výslednými hodnotami se nejlepším směsím blíží.

**Tabulka 19**

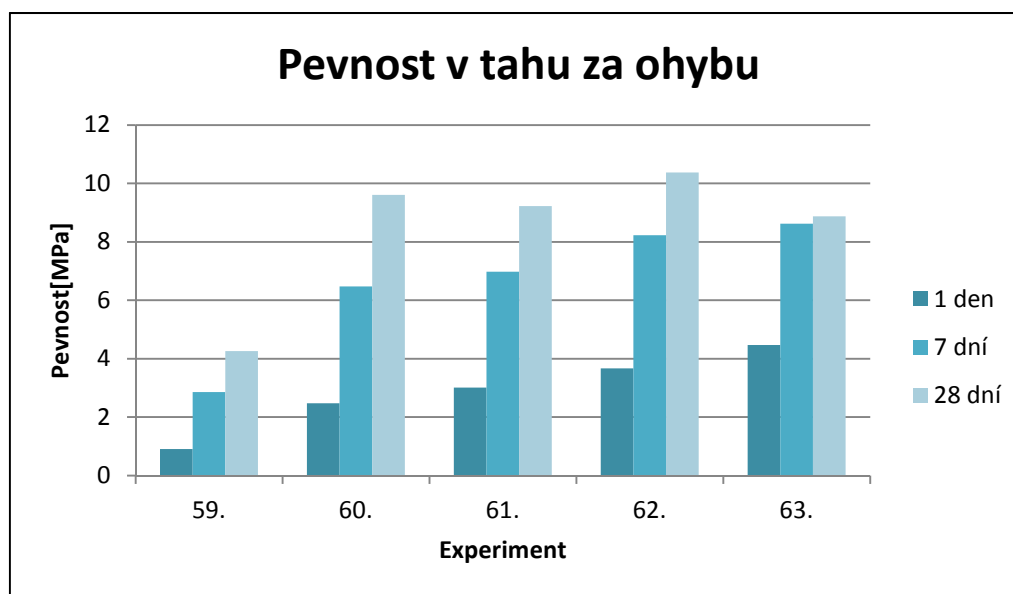
Složení malt pro vzorky 59. – 63.

Experiment		59.	60.	61.	62.	63.
Pojivo	[%]	20	40	50	60	80
Kamenivo		80	60	50	40	20
Popílek ložový	[g]	48	96	120	144	192
Cement 42,5 R		72	144	180	216	288
Kamenivo 0/4 mm		480	360	300	240	120
SP Optima 185	[ml]	0,72	1,44	1,8	2,16	2,88
Voda		80	90	105	115	150

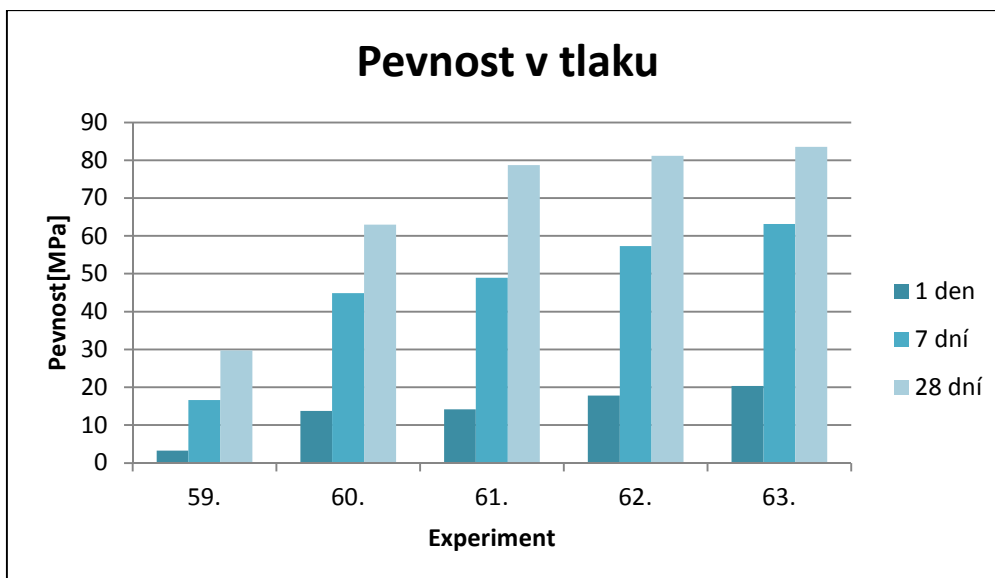
**Tabulka 20**

Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku a objemové hmotnosti pro vzorky malt 59. – 63.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní	
	[MPa]						[kg/m <sup>3</sup> ]
59.	0,91	2,86	4,26	3,29	16,63	29,75	1952,00
60.	2,47	6,47	9,61	13,77	44,92	62,99	2110,00
61.	3,01	6,98	9,22	14,46	48,92	78,69	2120,00
62.	3,67	8,23	10,37	17,77	57,35	81,17	2124,50
63.	4,47	8,62	8,87	20,33	63,15	83,50	2020,00

**Obrázek 34**

Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 59. – 63. v časové závislosti



**Obrázek 35**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 59. – 63. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální kombinací fluidního jemně mletého ložového popílku, cementu a kameniva tak, aby byla získána malta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh betonových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 59. – 63. pohybuje od 0,91 MPa do 10,37 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 62. Pevnost v tlaku se pohybovala od 3,29 MPa do 83,5 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 63.

Celkově dosahovaly malty s cementem a kamenivem po 28 dnech celkem vysokých pevností. Díky tomu, že směs č. 62, s poměrem pojivo – kamenivo 60:40, dosáhla nejvyšších pevností v tahu za ohybu a druhých nejvyšších pevností v tlaku, byla zvolena jako předloha pro míchání a testování betonových směsí.

### 4.2.3 Testy na betonech

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem betonové směsi, na bázi fluidního jemně mletého ložového popílku, s nejlepšími pevnostmi a vlastnostmi pro použití ve stavebnictví. Byly vytvořeny dva návrhy betonové směsi, a to pro poměr kamenivo – pojivo 1:1 a 1:3. Návrhy obou betonových směsí vycházely ze zvolené maltové směsi, a to konkrétně směsi č. 62. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 21. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulkách č. 22 a č. 23, a také na obrázcích č. 36, č. 37, č. 38 a č. 39.

**Tabulka 21**

Složení betonových vzorků A a B

Experiment		A	B
Poměr kamenivo:pojivo		1:1	1:3
Popílek fluidní ložový	[g]	8601	12057
Cement 42,5 R		12901	18086
Kamenivo 0/4 mm		8385	3919
Kamenivo 4/8 mm		5375	2512
Kamenivo 8/16 mm		7740	3617
Superplastifikátor Optima 185		129	181
Voda	[ml]	8022	11359

**Tabulka 22**

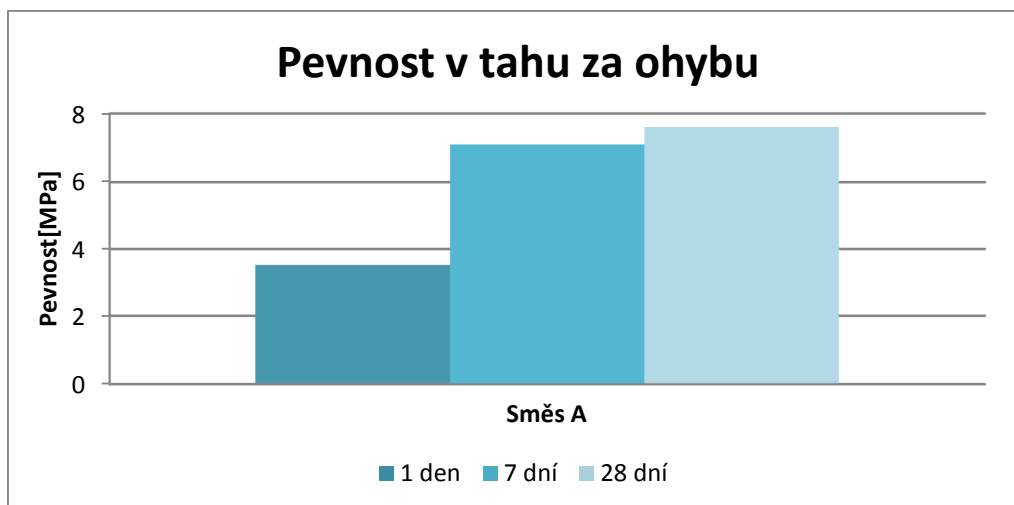
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek A

Směs A		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámeč	10×10×40	3,53	10×10×40	7,10	10×10×40	7,61
Pevnost v tlaku		Trámeč	10×10×40	10,04	10×10×40	56,92	10×10×40	60,44
		Kostka	10×10×10	11,84	15×15×15	55,46	15×15×15	65,17
Pevnostní třída betonu			C 8/10	C 45/55	C 55/67			

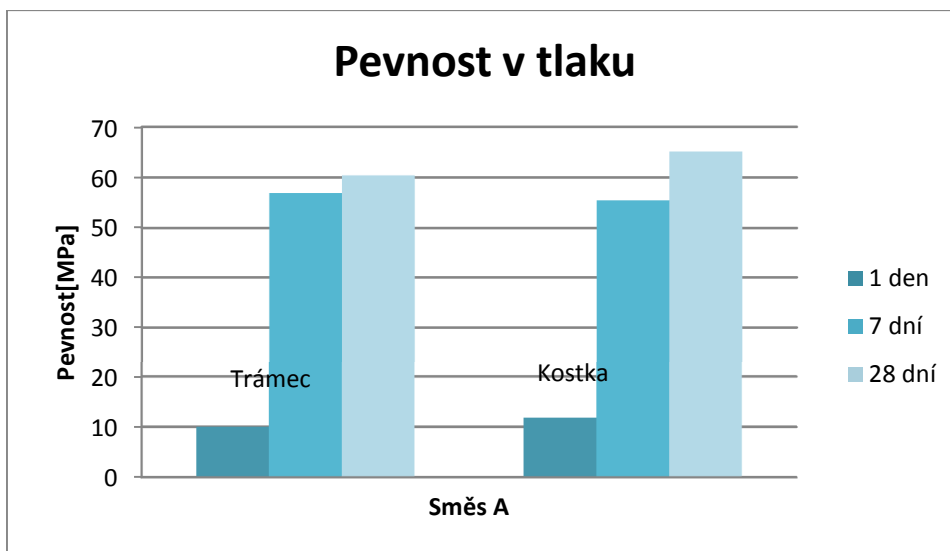
**Tabulka 23**

Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek B

Směs B		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámeč	10×10×40	2,85	10×10×40	6,94	10×10×40	7,24
Pevnost v tlaku		Trámeč	10×10×40	10,68	10×10×40	56,71	10×10×40	60,96
		Kostka	10×10×10	14,41	10×10×10	64,61	15×15×15	68,18
Pevnostní třída betonu			C 8/10	C 50/60	C 55/67			

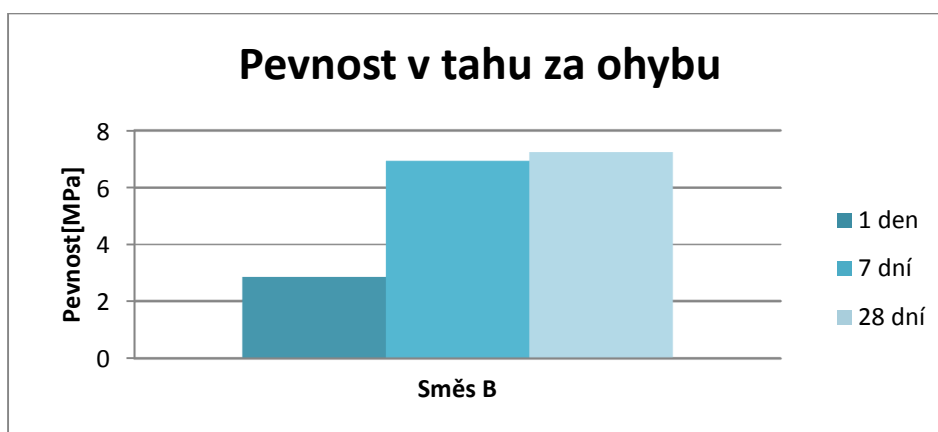
**Obrázek 36**

Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek A v časové závislosti



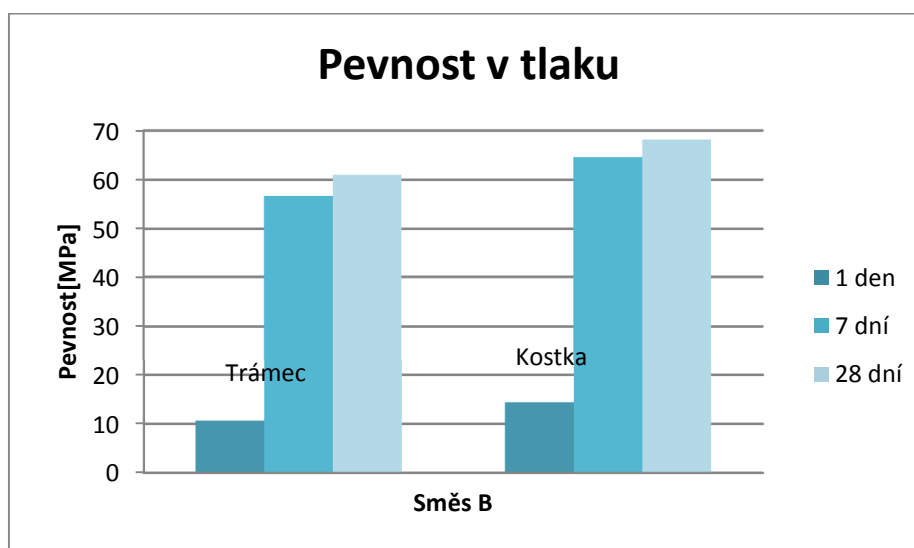
**Obrázek 37**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek A v časové závislosti*



**Obrázek 38**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek B v časové závislosti*



**Obrázek 39**

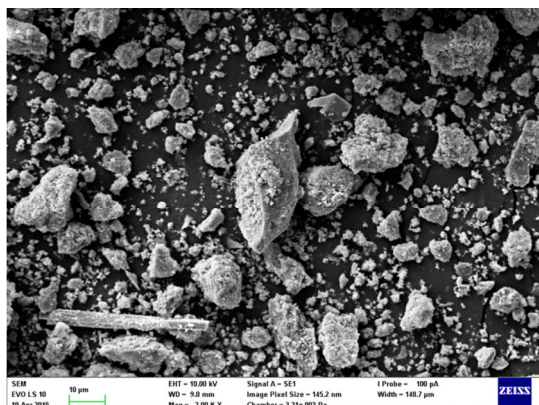
*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek B v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt ideální betonovou směs z fluidního jemně mletého ložového popílku, cementu a kameniva s nejvyššími pevnostmi, kterou by bylo možno použít ve stavebnictví.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel a zpracování směsí probíhalo ve větším množství oproti pastám a maltám. U obou vzorků byla ihned po namíchání stanovena konzistence čerstvého betonu zkouškou rozlitím dle ČSN EN 12350 - 5. Směs A i B lze dle zpracovatelnosti zařadit do třídy F2. Byly také sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Pro zkoušku pevnosti v tlaku byla změřena pevnost v tlaku kostky a pro srovnání byl následně testován i trámec. Naměřené pevnosti v tahu za ohybu se pro vzorky A a B pohybují od 2,85 MPa do 7,61 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs A. Pevnost v tlaku se pohybovala od 11,84 MPa do 68,18 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs B. Podle naměřených pevností v tlaku byla každému betonovému vzorku přiřazena pevnostní třída betonu v tlaku dle normy ČSN EN 206 - 1. Výsledné XRD analýzy vzniklých betonových směsí jsou zařazeny v sekci přílohy.

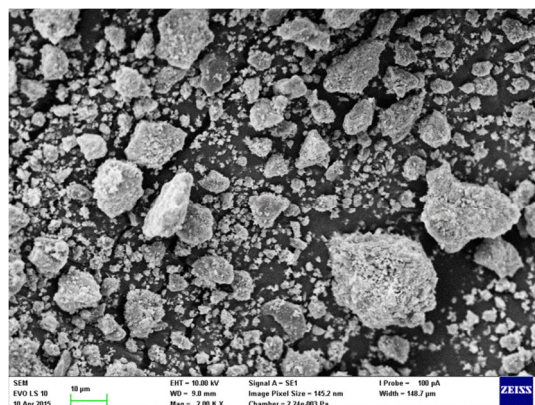
Celkově dosáhly po 28 dnech betonové směsi A i B pevnostních tříd C 55/67 při objemových hmotnostech  $2\,076\text{ kg/m}^3$ . Díky výsledkům lze říci, že betonové směsi A a B, na bázi fluidního ložového popílku, mají potenciální využití ve stavebnictví, například jako prefabrikáty či kanálové žlaby.

Z ekonomického hlediska lze tvrdit, že částečná náhrada portlandského cementu fluidními popílky cca 20% - 35% přinese úsporu až 200 Kč na  $1\text{ m}^3$  betonu. Přepočtení ceny bylo provedeno s předpokladem, že bude použit CEM I 42,5 R.



**Obrázek 40**

*Záznam SEM analýzy zvětšení  $2\,000\times$   
pro betonovou směs A*



**Obrázek 41**

*Záznam SEM analýzy zvětšení  $2\,000\times$   
pro betonovou směs B*

### 4.3 Vliv přídavku fluidního filtrového popílku na vlastnosti alternativních betonů

Tato kapitola se zabývá vlivem přídavku fluidního filtrového popílku na vlastnosti alternativních betonů. Testování směsí probíhalo na pastách, maltách a betonech.

#### 4.3.1 Testy na pastách

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem pasty s optimální kombinací fluidního filtrového popílku a dalšího pojiva, konkrétně cementu, v různých poměrech. Byly zkoumány pasty při poměrech 5/95, 10/90, 15/85, 20/80, 30/70, 50/50, 60/40, 70/30 a 80/20 % cementu a fluidního filtrového popílku. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. U všech vzorků byl následně stanoven počátek a konec tuhnutí dle Vicata a objemová hmotnost. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 24. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 25 a na obrázcích č. 42 a č. 43.

**Tabulka 24**

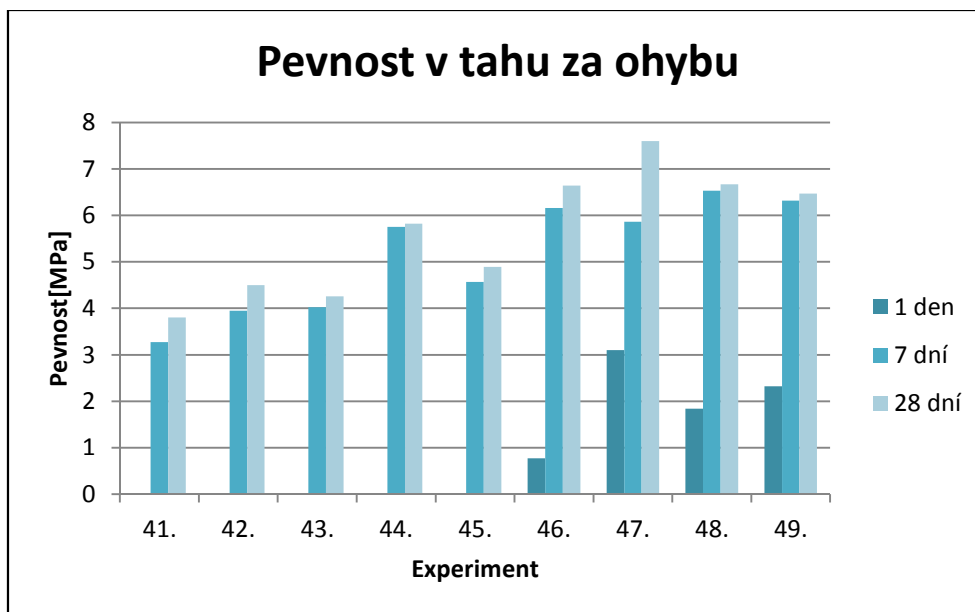
Složení past pro vzorky 41. – 49.

Experiment		41.	42.	43.	44.	45.	46.	47.	48.	49.
Poměr CEM/ popílek	[%]	5/95	10/90	15/85	20/80	30/70	50/50	60/40	70/30	80/20
Popílek filtrový	[g]	570	540	510	480	420	300	240	180	120
Cement 42,5 R		30	60	90	120	180	300	360	420	480
SP Optima 185	[ml]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Voda		370	365	345	335	315	280	260	240	220

**Tabulka 25**

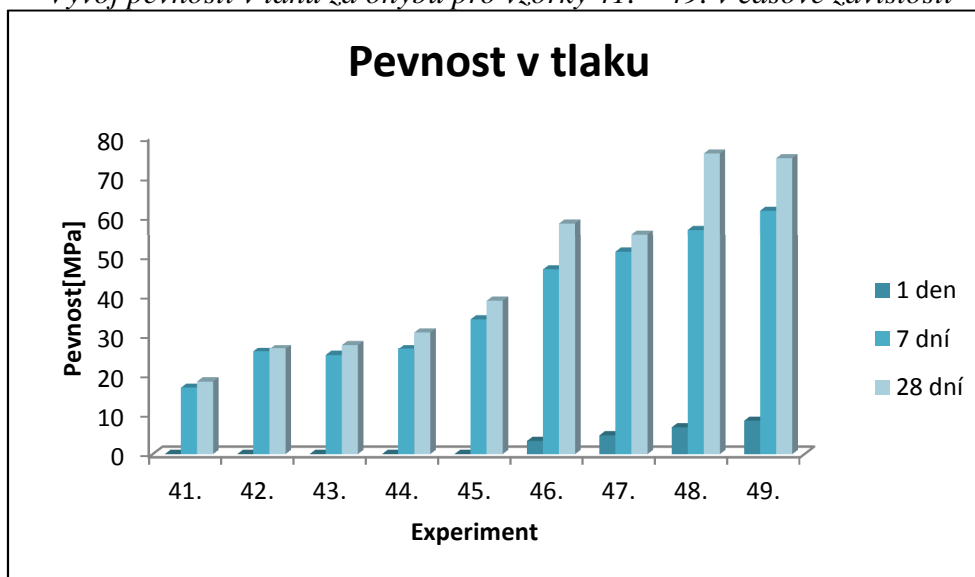
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku, objemové hmotnosti a počátku a konce tuhnutí pro vzorky past 41. – 49.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost	Počátek tuhnutí	Konec tuhnutí
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní			
	[MPa]								
41.	0,00	3,27	3,80	0,00	16,63	18,17	1445,00	220	410
42.	0,00	3,95	4,50	0,00	25,75	26,51	1525,00	220	400
43.	0,00	4,02	4,26	0,00	24,83	27,54	1500,00	180	350
44.	0,00	5,75	5,82	0,00	26,46	30,73	1585,00	180	360
45.	0,00	4,57	4,89	0,00	34,03	38,74	1620,00	180	380
46.	0,77	6,16	6,64	3,27	46,63	58,28	1685,00	80	270
47.	3,10	5,86	7,60	4,68	51,09	55,51	1807,50	80	260
48.	1,84	6,53	6,67	6,68	56,67	75,79	1870,00	70	250
49.	2,32	6,32	6,47	8,35	61,48	74,62	1930,00	70	240



**Obrázek 42**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 41. – 49. v časové závislosti*



**Obrázek 43**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 41. – 49. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální poměr fluidního filtrového popílku a cementu tak, aby byla získána pasta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh maltových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 41. – 49. pohybuje od 0,77 MPa do 7,6 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 41. až 45. pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 47. Pevnost v tlaku se pohybovala od 3,27 MPa do 75,79 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 48. U všech směsí byl

také stanoven počátek a konec doby tuhnutí dle Vicata. Směs s nejkratším počátkem i koncem tuhnutí byla směs č. 49, kdy počátek tuhnutí nastal po 70 minutách a konec tuhnutí po 240 minutách.

Celkově dosahovaly pasty po 28 dnech uspokojivých pevností v tahu za ohybu i v tlaku. Díky nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu a dobrým výsledkům pevnosti v tlaku byla vybrána směs č. 47 za vhodnou předlohu pro namíchání a testování malt.

#### 4.3.2 Testy na maltách

Testování malt se dělí na dvě části. První část se zabývá testováním a následným výběrem malty s optimálním poměrem fluidního filtrového popílku a kameniva. Byly testovány poměry pojivo – kamenivo 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20. Druhá část se zabývá testováním a následným výběrem malty s optimální kombinací fluidního filtrového popílku, cementu a kameniva, kdy bylo rovněž použito poměrů pojivo – kamenivo 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. U všech vzorků byla sledována jejich dilatace a objemová hmotnost. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulkách č. 26 a č. 28. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulkách č. 27 a č. 29, a také na obrázcích č. 44, č. 45, č. 46 a č. 47.

#### Tabulka 26

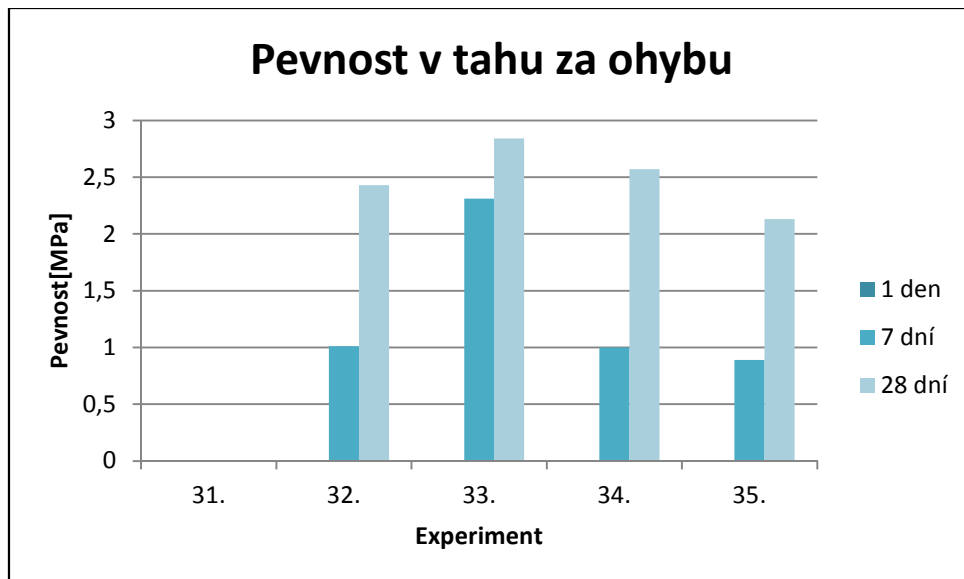
Složení malt pro vzorky 31. – 35.

Experiment		31.	32.	33.	34.	35.
Pojivo	[%]	20	40	50	60	80
Kamenivo		80	60	50	40	20
Popílek filtrový	[g]	120	240	300	360	480
Kamenivo 0/4 mm		480	360	300	240	120
SP Optima 185	[ml]	0,72	1,44	1,8	2,16	2,88
Voda		150	155	200	215	290

#### Tabulka 27

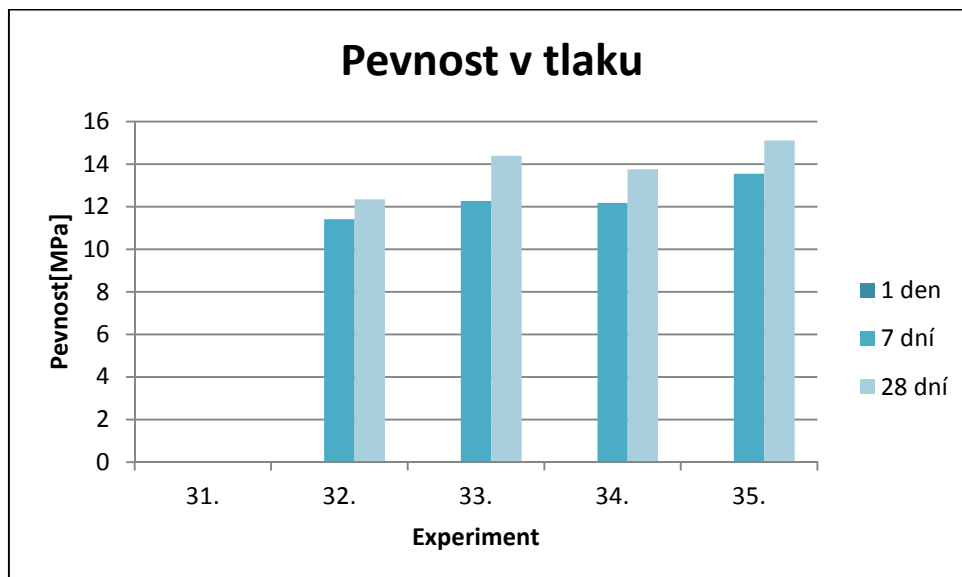
Přehled vývoje pevnosti v tahu za ohybu a v tlaku a objemové hmotnosti malt pro vzorky 31. – 35.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní	
	[MPa]						[kg/m <sup>3</sup> ]
31.	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1585,00
32.	0,00	1,01	2,43	0,00	11,41	12,34	1805,00
33.	0,00	2,31	2,84	0,00	12,26	14,38	1800,00
34.	0,00	1,00	2,57	0,00	12,18	13,75	1720,00
35.	0,00	0,89	2,13	0,00	13,54	15,10	1435,00



**Obrázek 44**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 31. – 35. v časové závislosti*



**Obrázek 45**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 31. – 35. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální poměr fluidního filtrového popílku a cementu tak, aby byla získána malta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh pro druhou část testování maltových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 31. – 35. pohybuje od 1 MPa do 2,84 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 31. až 35. pevnost v tahu za ohybu a pevnost v tlaku pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 33. Pevnost v tlaku se pohybovala od 11,41 MPa do 15,10 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 35. Směs č. 31. s poměrem pojivo –

kamenivo 20:80 byla shledána jako nevhodnou pro testování maltových směsí, jelikož již při odformování se směs drolila.

Celkově dosahovaly malty s kamenivem po 28 dnech uspokojivých pevností. Jako předloha pro další míchání a testování malt byla vybrána směs č. 34, kde byl poměr pojiva – kameniva 60:40. Tato směs sice nedosahovala nejvyšších pevností, ale výslednými hodnotami se nejlepším směsím blíží.

**Tabulka 28**

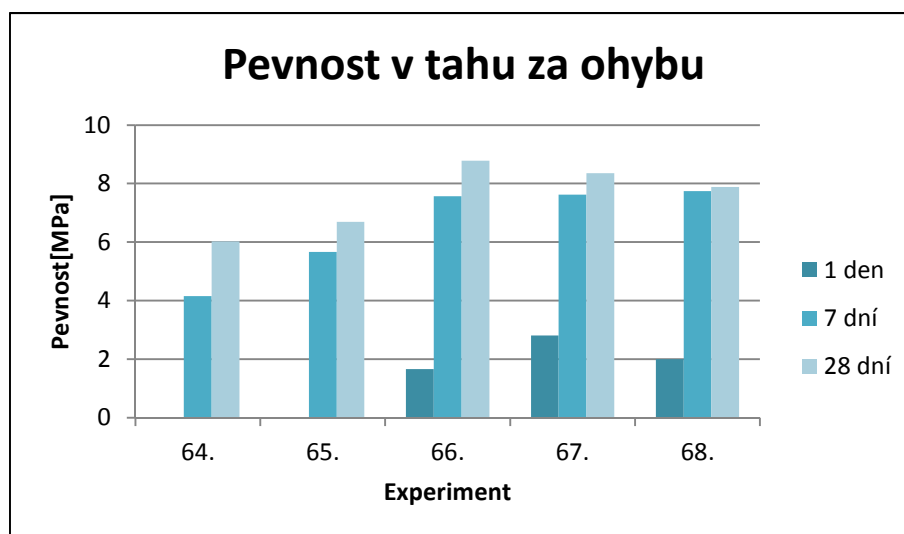
Složení malt pro vzorky 64. – 68.

Experiment		64.	65.	66.	67.	68.
Pojivo	[%]	20	40	50	60	80
Kamenivo		80	60	50	40	20
Popílek filtrový	[g]	48	96	120	144	192
Cement 42,5 R		72	144	180	216	288
Kamenivo 0/4 mm		480	360	300	240	120
SP Optima 185	[ml]	0,72	1,44	1,8	2,16	2,88
Voda		93	120	140	160	200

**Tabulka 29**

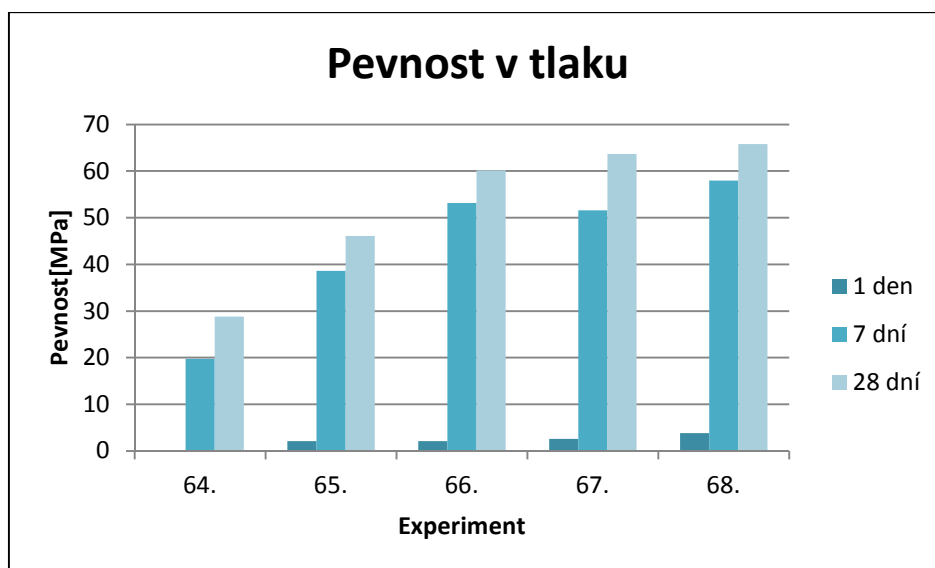
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a tlaku a objemové hmotnosti malt pro vzorky 64. – 68.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní	
	[MPa]						[kg/m <sup>3</sup> ]
64.	0,00	4,15	6,02	2,97	19,75	28,82	1995,00
65.	0,00	5,66	6,69	4,54	38,61	46,09	1970,00
66.	1,66	7,57	8,78	6,24	53,16	60,17	2001,00
67.	2,81	7,62	8,35	5,08	51,59	63,67	1973,00
68.	2,00	7,74	7,88	6,84	57,94	65,77	1980,00



**Obrázek 46**

### Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 64. – 68. v časové závislosti



**Obrázek 47**

Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 64. – 68. v časové závislosti

Cílem experimentu bylo nalézt optimální kombinací fluidního filtrového popílku, cementu a kameniva tak, aby byla získána malta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh betonových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 64. – 68. pohybuje od 1,66 MPa do 8,78 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 64. a 65. pevnost v tahu za ohybu pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 66. Pevnost v tlaku se pohybovala od 2,97 MPa do 65,77 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 68.

Celkově dosahovaly malty s cementem a kamenivem po 28 dnech celkem vysokých pevností. Díky tomu, že směs č. 67, s poměrem pojivo – kamenivo 60:40, dosáhla druhých nejvyšších pevností, byla zvolena jako předloha pro míchání a testování betonových směsí.

#### 4.3.3 Testy na betonech

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem betonové směsi, na bázi fluidního filtrového popílku, s nejlepšími pevnostmi a vlastnostmi pro použití ve stavebnictví. Byly vytvořeny dva návrhy betonové směsi, a to pro poměr kamenivo – pojivo 1:1 a 1:3. Návrhy obou betonových směsí vycházely ze zvolené maltové směsi, a to konkrétně směsi č. 67. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 30. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulkách č. 31 a č. 32, a také na obrázcích č. 48, č. 49, č. 50 a č. 51.

**Tabulka 30**

Složení betonových vzorků C a D

Experiment		C	D
Poměr kamenivo:pojivo		1:1	1:3
Popílek Fluidní filtrový	[g]	8161	11212
Cement 42,5 R		12242	16818
Kamenivo 0/4 mm		7957	3643
Kamenivo 4/8 mm		5101	2335
Kamenivo 8/16 mm		7345	3363
Superplastifikátor Optima 185		122	168
Voda	[ml]	9068	12458

**Tabulka 31**

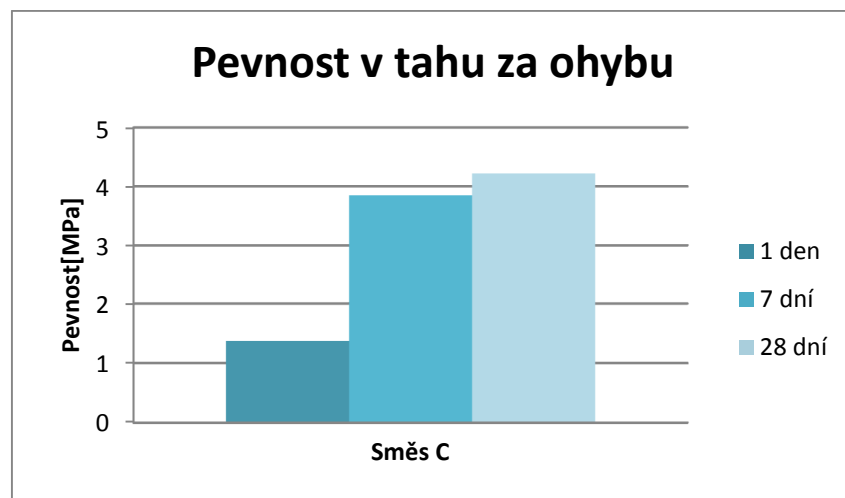
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek C

Směs C		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámeč	10×10×40	1,37	10×10×40	3,85	10×10×40	4,22
Pevnost v tlaku		Trámeč	10×10×40	6,90	10×10×40	45,23	10×10×40	59,05
		Kostka	10×10×10	6,78	15×15×15	45,05	15×15×15	57,77
Pevnostní třída betonu			C -/5	C 35/45	C 45/55			

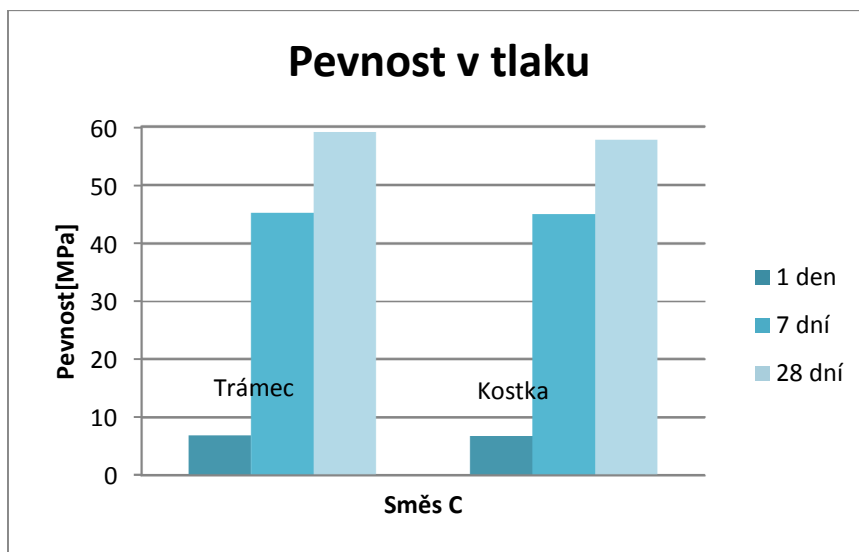
**Tabulka 32**

Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek D

Směs D		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámeč	10×10×40	0,91	10×10×40	3,25	10×10×40	6,41
Pevnost v tlaku		Trámeč	10×10×40	5,89	10×10×40	43,04	10×10×40	59,84
		Kostka	10×10×10	5,38	15×15×15	42,02	10×10×10	51,58
Pevnostní třída betonu			C -/5	C 30/37	C 40/50			

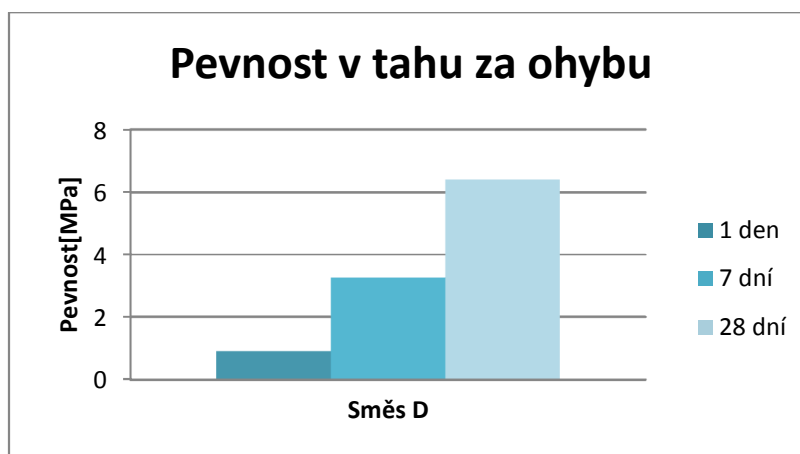
**Obrázek 48**

Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek C v časové závislosti



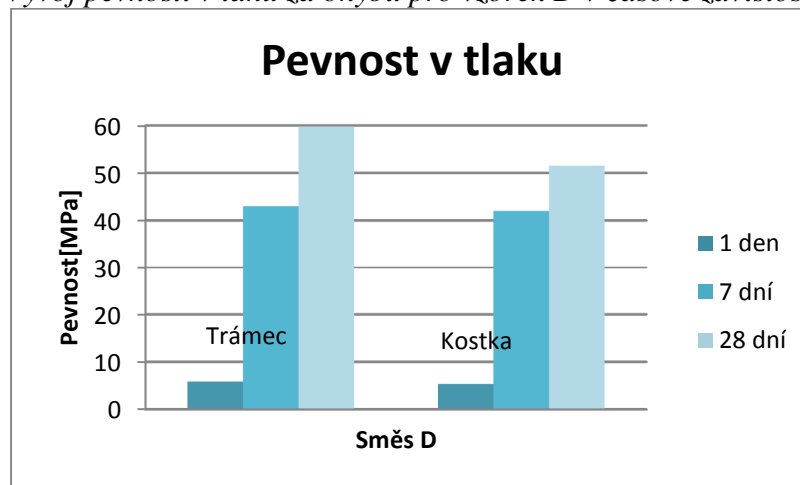
**Obrázek 49**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek C v časové závislosti*



**Obrázek 50**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek D v časové závislosti*



**Obrázek 51**

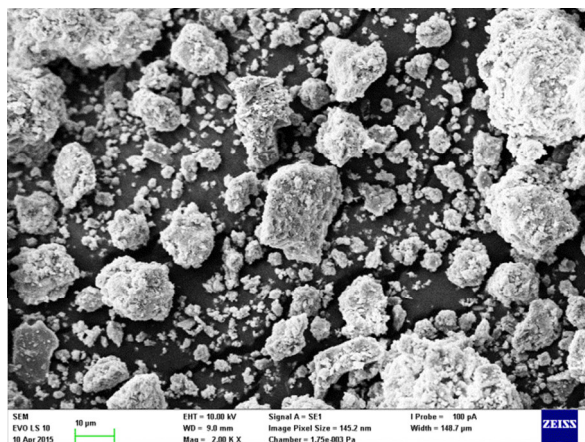
*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek D v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt ideální betonovou směs z fluidního filtrového popílku, cementu a kameniva s nejvyššími pevnostmi, kterou by bylo možno použít ve stavebnictví.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel a zpracování směsí probíhalo ve větším množství oproti pastám a maltám. U obou vzorků byla ihned po namíchání stanovena konzistence čerstvého betonu zkouškou rozlitím dle ČSN EN 12350 - 5. Směs C i D lze dle zpracovatelnosti zařadit do třídy F4. Byly také sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Pro zkoušku pevnosti v tlaku byla změřena pevnost v tlaku kostky a pro srovnání byl následně testován i trámec. Naměřené pevnosti v tahu za ohybu se pro vzorky C a D pohybují od 0,91 MPa do 6,41 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs C. Pevnost v tlaku se pohybovala od 5,38 MPa do 57,77 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla také směs C. Podle naměřených pevností v tlaku byla každému betonovému vzorku přiřazena pevnostní třída betonu v tlaku dle normy ČSN EN 206 - 1. Výsledné XRD analýzy vzniklých betonových směsí jsou zařazeny v sekci přílohy.

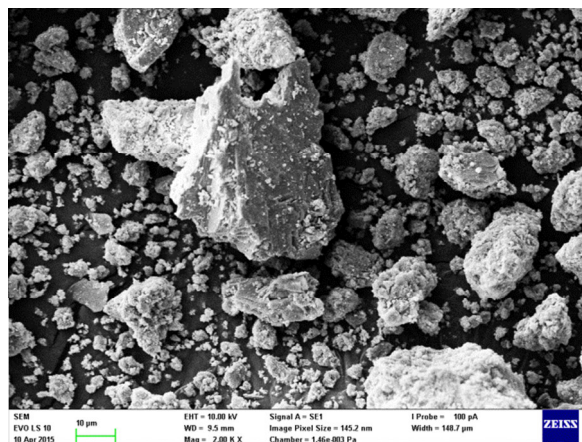
Celkově dosáhla po 28 dnech betonová směs C pevností třídy C 45/55 a betonová směs D pevnostní třídy C 40/50. Objemové hmotnosti se pro tyto betony pohybují v intervalu 1 746 – 1 972 kg/m<sup>3</sup>. Díky výsledkům lze říci, že betonové směsi C a D, na bázi fluidního filtrového popílku, mají potenciální využití ve stavebnictví, například jako prefabrikáty či kanálové žlaby.

Z ekonomického hlediska lze tvrdit, že částečná náhrada portlandského cementu fluidními popílky cca 20% - 32% přinese úsporu až 195 Kč na 1 m<sup>3</sup> betonu. Přepočítání ceny bylo provedeno s předpokladem, že bude použit CEM I 42,5 R.



**Obrázek 52**

*Záznam SEM analýzy zvětšení 2 000 ×  
pro betonovou směs C*



**Obrázek 53**

*Záznam SEM analýzy zvětšení 2 000 ×  
pro betonovou směs D*

## 4.4 Vliv přídatku fluidního filtrového popílku a vápenného hydrátu na vlastnosti alternativních betonů

Tato kapitola se zabývá vlivem fluidního filtrového popílku a vápenného hydrátu na vlastnosti alternativních betonů. Testování směsí probíhalo na pastách, maltách a betonech.

### 4.4.1 Testy na pastách

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem pasty s optimální kombinací směsi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem a dalšího pojiva, konkrétně cementu, v různých poměrech. Byly zkoumány pasty při poměrech 5/95, 10/90, 15/85, 20/80, 30/70, 50/50, 60/40, 70/30 a 80/20 % cementu a fluidního filtrového popílku. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. U všech vzorků byl následně stanoven počátek a konec tuhnutí dle Vicata, dilatace a objemová hmotnost. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 33. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 34 a na obrázcích č. 54 a č. 55.

#### Tabulka 33

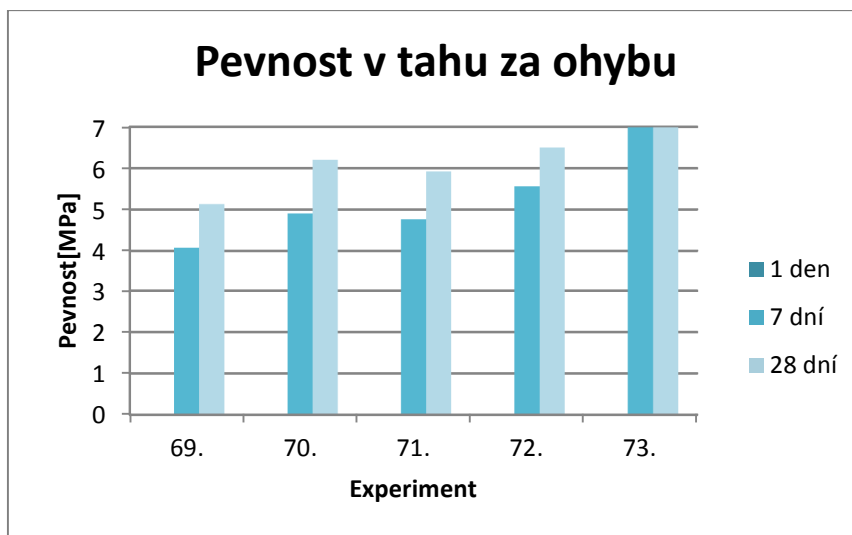
Složení past pro vzorky 69. – 73.

Experiment		69.	70.	71.	72.	73.
Poměr CEM/popílek [%]		5/95	10/90	15/85	20/80	30/70
Popílek filtrový	[g]	570	540	510	480	420
Cement 42,5 R		30	60	90	120	180
Vápenný Hydrát		57	54	51	48	42
SP Optima 185	[ml]	3,28	3,27	3,26	3,24	3,21
Voda		420	410	370	360	335

#### Tabulka 34

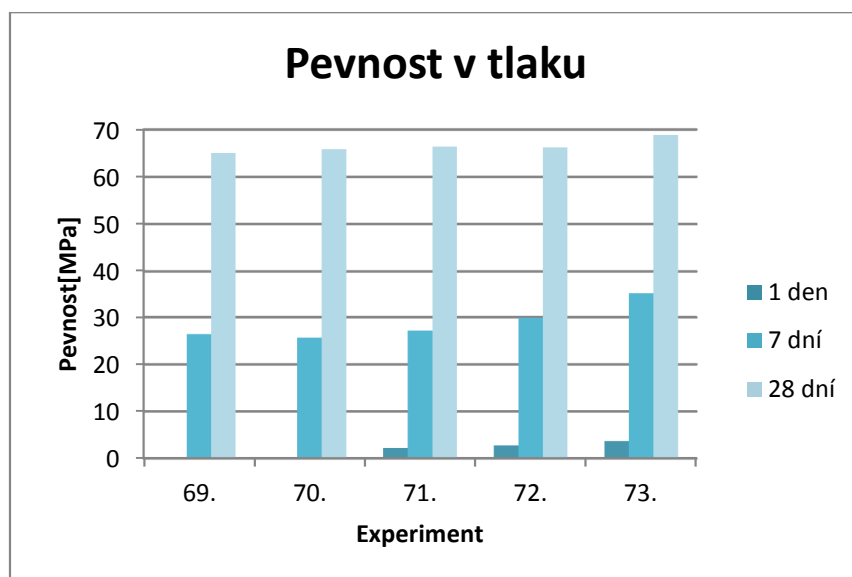
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku, objemové hmotnosti a počátku a konce tuhnutí pro vzorky past 69. – 73.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost [kg/m <sup>3</sup> ]	Počátek tuhnutí [min]	Konec tuhnutí
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní			
	[MPa]								
69.	0,00	4,07	5,13	0,00	26,43	65,03	1527,00	220	350
70.	0,00	4,90	6,20	0,00	25,67	65,88	1539,50	220	390
71.	0,00	4,76	5,92	2,21	27,14	66,4	1601,75	180	330
72.	0,00	5,56	6,50	2,79	29,93	66,21	1632,25	150	290
73.	0,00	5,99	6,99	3,67	35,39	68,87	1697,00	220	380



**Obrázek 54**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 69. – 73. v časové závislosti*



**Obrázek 55**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 69. – 73. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální poměr směsi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem a cementu tak, aby byla získána pasta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh maltových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidavkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 69. – 73. pohybuje od 4,07 MPa do 6,99 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 69. až 73. pevnost v tahu za ohybu pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 73. Pevnost v tlaku se pohybovala od 2,21 MPa do 68,87 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla opět směs č. 73. U všech směsí byl také stanoven počátek a konec doby tuhnutí dle Vicata. Směs s nejkratším počátkem i koncem tuhnutí byla směs č. 69, kdy počátek tuhnutí nastal po 220 minutách a konec tuhnutí po 350 minutách.

Celkově dosahovaly pasty po 28 dnech uspokojivých pevností v tahu za ohybu i pevností v tlaku. Díky nejvyšší pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku byla vybrána směs č. 73 za vhodnou předlohu pro namíchání a testování malt.

#### 4.4.2 Testy na maltách

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem malty s optimální kombinací směsi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem, cementem a kamenivem, kdy bylo použito poměrů pojivo – kamenivo 20:80, 40:60, 50:50, 60:40, 80:20. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech a objemová hmotnost. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 35. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulce č. 36, a také na obrázcích č. 56 a č. 57.

**Tabulka 35**

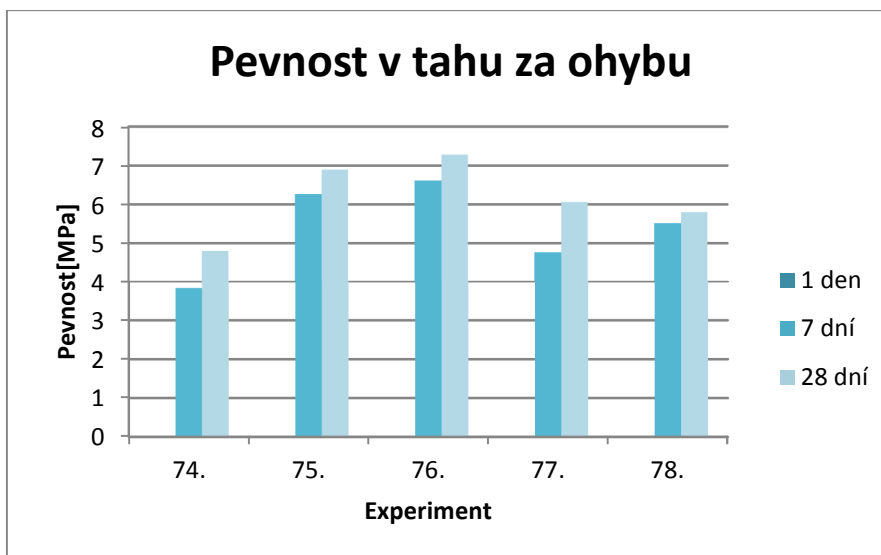
Složení malt pro vzorky 74. – 78.

Experiment		74.	75.	76.	77.	78.
Pojivo	[%]	20	40	50	60	80
Kamenivo		80	60	50	40	20
Popílek filtrový	[g]	84	168	210	252	336
Cement 42,5 R		36	72	90	108	144
Vápenný hydrát		8,4	16,8	21	25,2	33,6
Kamenivo 0/4 mm		480	360	300	240	120
SP Optima 185	[ml]	0,42	0,84	1,05	1,26	1,68
Voda		105	145	165	205	265

**Tabulka 36**

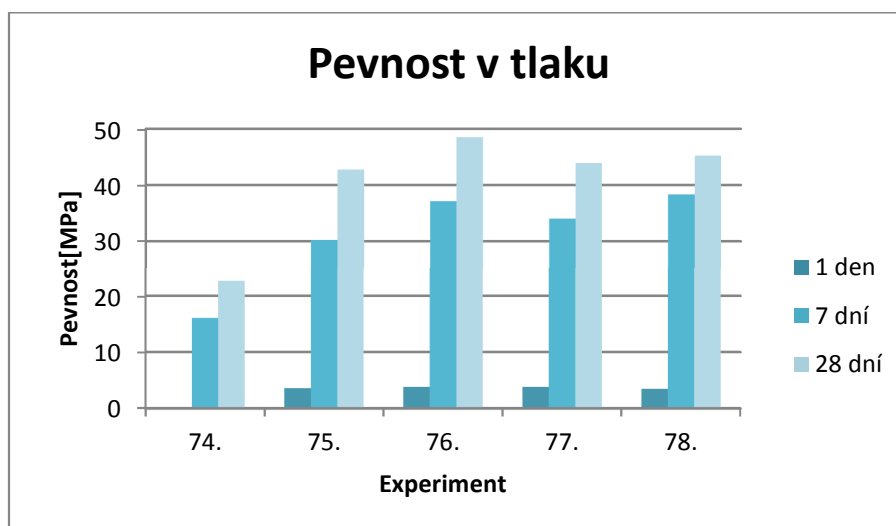
Přehled vývoje pevností v tahu za ohybu a v tlaku a objemové hmotnosti malt pro vzorky 74. – 78.

Experiment č.	Pevnost v tahu za ohybu			Pevnost v tlaku			Objemová hmotnost
	1 den	7 dní	28 dní	1 den	7 dní	28 dní	
	[MPa]						[kg/m <sup>3</sup> ]
74.	0,00	3,83	4,80	0,00	16,07	22,71	1990,00
75.	0,00	6,27	6,89	3,63	30,26	42,79	1925,50
76.	0,00	6,61	7,28	3,81	37,11	48,52	1874,25
77.	0,00	4,77	6,06	3,79	34,01	43,91	1815,25
78.	0,00	5,52	5,80	3,50	38,35	43,23	1738,50



**Obrázek 56**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorky 74. – 78. v časové závislosti*



**Obrázek 57**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorky 74. - 78. v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt optimální kombinaci směsi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem, cementem a kamenivem tak, aby byla získána malta s co nejlepšími výsledky, dle které byl dále vytvořen návrh betonových směsí.

Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel, přičemž reologie směsi byla vždy ještě částečně upravena přidávkem vody tak, aby výsledné vzorky měly stejnou konzistenci. Zpracování směsí bylo snadné a rychlé. Naměřená pevnost v tahu za ohybu se pro vzorky 74. – 78. pohybuje od 3,83 MPa do 7,28 MPa (po 1 dni byla pro vzorky 74. a 78. pevnost v tahu za ohybu pod hranicí měřitelnosti), přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs č. 76. Pevnost v tlaku se pohybovala od 3,63 MPa do 48,52 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs č. 76.

Celkově dosahovaly malty s cementem a kamenivem po 28 dnech celkem uspokojivých pevností v tahu za ohybu i pevností v tlaku. Díky tomu, že směs č. 77, s poměrem pojivo – kamenivo 60:40, dosáhla druhé nejvyšší pevnosti v tlaku, byla zvolena za předlohu pro míchání a testování betonových směsí.

### 4.4.3 Testy na betonech

Tato část se zabývá testováním a následným výběrem betonové směsi, na bázi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem, s nejlepšími vlastnostmi pro použití ve stavebnictví. Byly vytvořeny dva návrhy betonové směsi, a to pro poměr kamenivo – pojivo 1:1 a 1:3. Návrhy obou betonových směsí vycházely ze zvolené maltové směsi, a to konkrétně směsi č. 77. Po namíchání byly u vzorků sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku, a to vždy po 1, 7 a 28 dnech. Složení testovaných směsí je uvedeno v tabulce č. 37. Výsledky jsou pak uvedeny v tabulkách č. 38 a č. 39, a také na obrázcích č. 58, č. 59, č. 60 a č. 61.

**Tabulka 37**

Složení betonových vzorků E a F

Experiment		E	F
Poměr kamenivo:pojivo		1:1	1:3
Popílek fluidní filtrový	[g]	12901	17503
Cement 42,5 R		5529	7501
Kamenivo 0/4 mm		7690	3478
Kamenivo 4/8 mm		4930	2229
Kamenivo 8/16 mm		7099	3210
Superplastifikátor Optima 185		64	87
Vápenný hydrát		1290	1750
Voda	[ml]	10495	14238

**Tabulka 38**

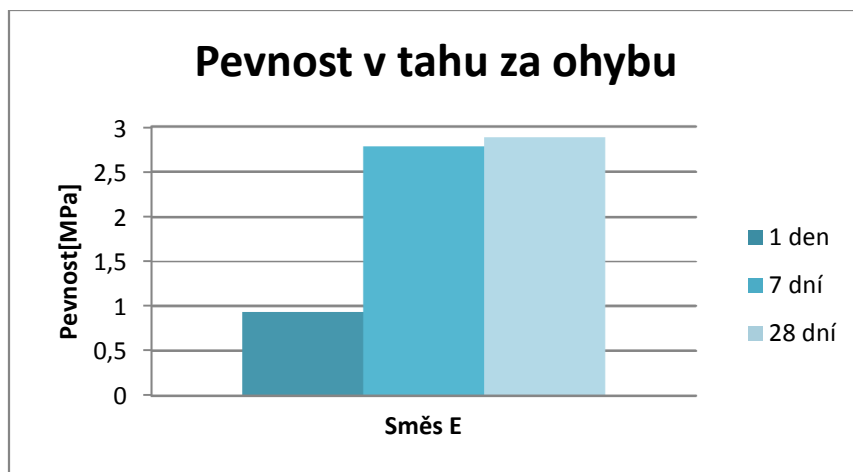
Vývoj pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek E

Směs E		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámec	10×10×40	0,93	10×10×40	2,78	10×10×40	2,88
Pevnost v tlaku		Trámec	10×10×40	4,43	10×10×40	21,27	10×10×40	37,76
		Kostka	10×10×10	4,55	15×15×15	28,10	15×15×15	38,13
Pevnostní třída betonu			C -/5	C 20/25	C 30/37			

**Tabulka 39**

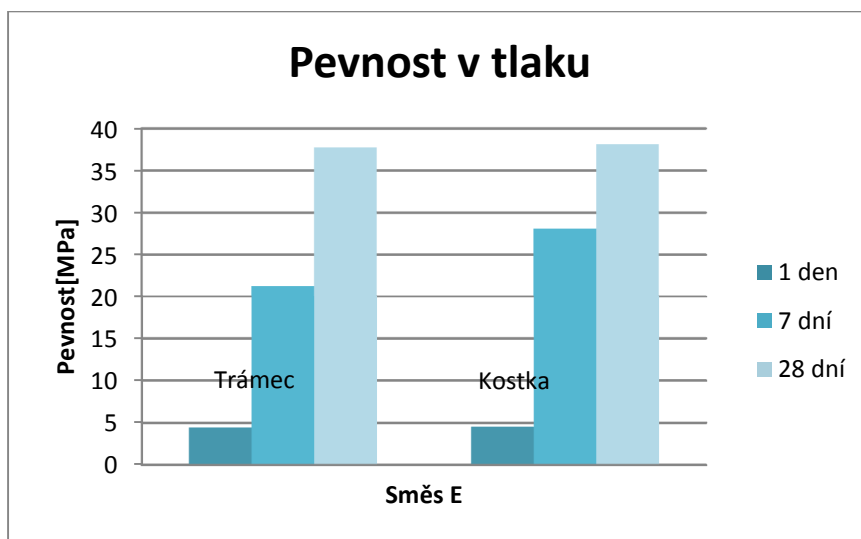
Vývoj pevností v tahu za ohybu a v tlaku pro vzorek F

Směs F		Zkušební těleso	Rozměry [cm]	1 den	Rozměry [cm]	7 dní	Rozměry [cm]	28 dní
Pevnost v tahu za ohybu	[MPa]	Trámec	10×10×40	0,78	10×10×40	3,52	10×10×40	3,75
Pevnost v tlaku		Trámec	10×10×40	4,58	10×10×40	25,24	10×10×40	37,96
		Kostka	10×10×10	4,75	10×10×10	24,27	15×15×15	37,96
Pevnostní třída betonu			C -/5	C 20/25	C 30/37			



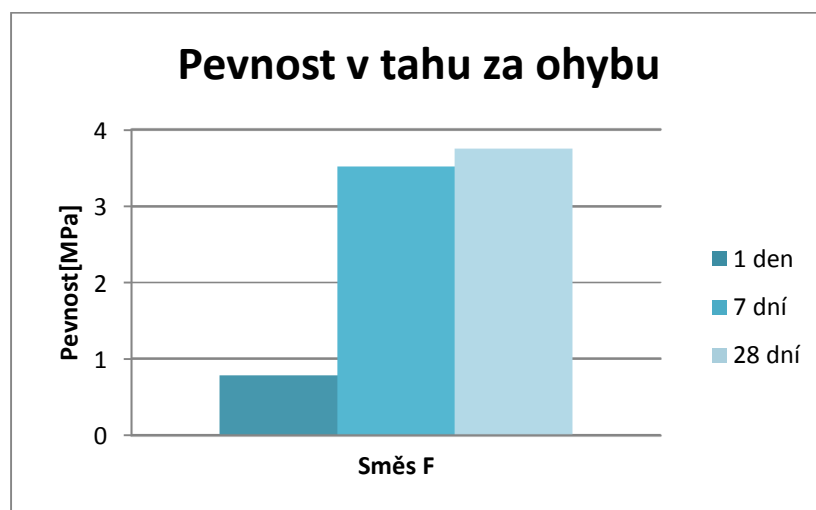
**Obrázek 58**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek E v časové závislosti*



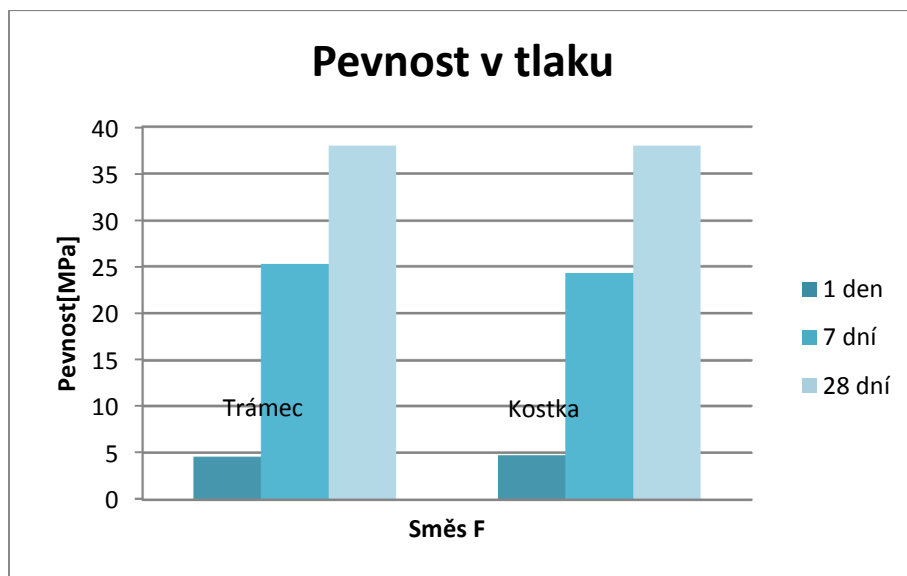
**Obrázek 59**

*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek E v časové závislosti*



**Obrázek 60**

*Vývoj pevností v tahu za ohybu pro vzorek F v časové závislosti*



**Obrázek 61**

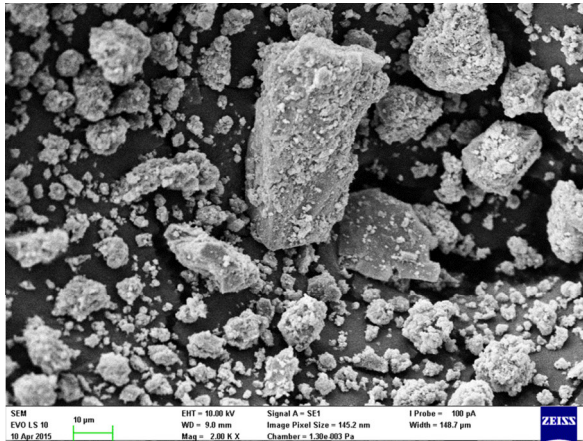
*Vývoj pevností v tlaku pro vzorek F v časové závislosti*

Cílem experimentu bylo nalézt ideální betonovou směs z fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem, cementem a kamenivem s nejvyššími pevnostmi, kterou by bylo možno použít ve stavebnictví.

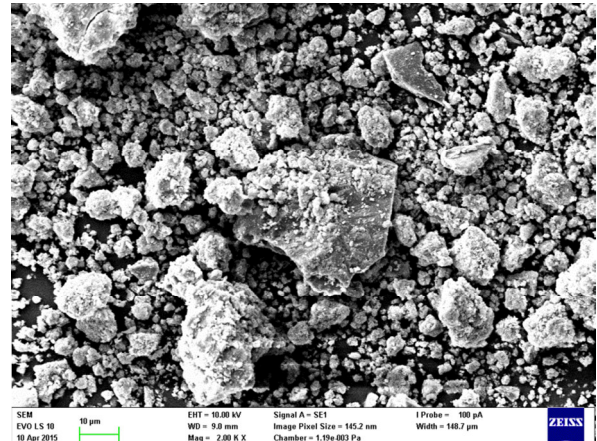
Pro všechny testované vzorky byl zvolen stejný vodní součinitel a zpracování směsí probíhalo ve větším množství oproti pastám a maltám. U obou vzorků byla ihned po namíchání stanovena konzistence čerstvého betonu zkouškou rozlitím dle ČSN EN 12350 - 5. Směs E i F lze dle zpracovatelnosti zařadit do třídy F2. Byly také sledovány pevnosti v tahu za ohybu a pevnosti v tlaku. Pro zkoušku pevnosti v tlaku byla změřena pevnost v tlaku kostky a pro srovnání byl následně testován i trámec. Naměřené pevnosti v tahu za ohybu se pro vzorky E a F pohybují od 0,78 MPa do 3,75 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti po 28 dnech dosáhla směs F. Pevnost v tlaku se pohybovala od 4,55 MPa do 38,13 MPa, přičemž nejvyšší pevnosti dosáhla směs E. Podle naměřených pevností v tlaku byla každému betonovému vzorku přiřazena pevnostní třída betonu v tlaku dle normy ČSN EN 206 – 1. Výsledné XRD analýzy vzniklých betonových směsí jsou zařazeny v sekci přílohy.

Celkově dosáhly po 28 dnech betonové směsi E a F pevnostních tříd C 30/37, při objemových hmotnostech 1 956 kg/m<sup>3</sup>. Díky výsledkům lze říci, že betonové směsi E a F, na bázi fluidního filtrového popílku s vápenným hydrátem, mají potenciální využití ve stavebnictví, například jako prefabrikáty či kanálové žlaby.

Z ekonomického hlediska lze tvrdit, že částečná náhrada portlandského cementu fluidními popílky cca 10% - 15% přinese úsporu až 90 Kč na 1 m<sup>3</sup> betonu. Přepočet ceny byl proveden s předpokladem, že bude použit CEM I 42,5 R.



**Obrázek 62**  
*Záznam SEM analýzy zvětšení 2 000 ×  
pro betonovou směs E*



**Obrázek 63**  
*Záznam SEM analýzy zvětšení 2 000 ×  
pro betonovou směs F*

## 5 Závěr

Fluidní popílek postupně nachází své uplatnění v různých aplikacích. Nicméně jeho použití ve stavebnictví, konkrétně v betonech je však v mnoha ohledech značně omezeno. Aby mohl být fluidní popílek použit do betonu, musí splňovat určitá kritéria, která jsou uvedena v normách ČSN EN 450 a ČSN EN 12620. Za hlavní omezení lze uvést obsah volného vápna v popílku a následné objemové změny vzniklého betonu. A právě díky objemovým změnám je fluidní popílek klasifikován jako nevhodný materiál pro použití v betonových stavebních aplikacích.

Tato diplomová práce se soustředila na možnosti využití druhotných surovin z energetického průmyslu ve stavebnictví, konkrétně v betonových aplikacích, kde jako suroviny pro přípravu pojivové části kompozice byly použity fluidní popílků – filtrový i jemně mletý ložový. Cílem této práce bylo připravit beton nebo betony na bázi tuhých zbytků z fluidního spalování uhlí, které by splňovaly, nebo se alespoň blížily svými parametry běžně používaným betonům na bázi portlandského cementu, které jsou v dnešní době běžně používané.

Nalezením betonových směsí s vyhovujícími vlastnostmi, by bylo možné zařadit fluidní popílků mezi běžně používané stavební materiály, při jejichž výrobě by bylo zároveň redukováno získané množství jinak nevyužitých sekundárních surovin, fluidních popílků.

V experimentální části bylo testováno 84 vzorků past, malt, betonů, a to vždy dle aktuálního přídatku fluidního popílku do pojivové části směsi. Postupovalo se vždy od testů na pastách, přes testy na maltách, až k finálním testům na betonech. Cement, jako hlavní surovina pojivové části, byl ve směsích částečně nebo zcela nahrazován fluidním filtrovým popílkiem FK 12, jemně mletým ložovým popílkiem FK 11 z Tisové nebo vápenným hydrátem CL 90 S – Vitošov. Sledovány byly především měnící se vlastnosti připravených betonů při změnách poměru pojiv a kameniva. Při testech byly hodnoceny především mechanické vlastnosti a fázové složení.

Série experimentů ukazují, že přídatek 0,6 % hmot. superplastifikátoru na bázi polykarboxylátu do směsí je postačující, a že ideální poměr mezi pojivem a kamenivem ve směsích je 60:40. Směsi s těmito vstupními parametry dosahovaly pevností v tlaku více než 11,49 MPa, a proto se staly výchozím vzorem pro přípravu betonových směsí. Na základě určeného vzoru byly připraveny a testovány betonové směsi s poměry pojiva a kameniva 1:1 a 3:1.

Testované vzorky betonových směsí s fluidním jemně mletým ložovým popílkiem dosahují, pro oba poměry kameniva a pojiva, pevnostních tříd betonů C 55/67 při objemových hmotnostech 2 076 kg/m<sup>3</sup>. Směsi s fluidním filtrovým popílkiem dosahují pevnostních tříd betonů C 45/55 pro vzorek s poměrem pojiva a kameniva 1:1 a C 40/50 pro vzorek s poměrem pojiva a kameniva 3:1, objemové hmotnosti se pro tyto betony pohybují v intervalu 1 746 – 1 972 kg/m<sup>3</sup>. Směsi s fluidním filtrovým popílkiem a vápenným hydrátem dosahují, pro oba poměry pojiva a kameniva, pevnostních tříd betonů C 30/37, při objemových hmotnostech 1 956 kg/m<sup>3</sup>. Pevnosti v tlaku u všech testovaných betonových směsí přesahují 25 MPa, přičemž tato hodnota je, pro betony na bázi portlandského cementu, považována za nejnižší přípustnou mez pro použití těchto betonů ve stavebnictví.

Aby bylo možné vzniklé betonové směsi použít v praxi, bylo nutné zjistit, zda jsou připravené betonové směsi objemově stálé. Na základě sledování objemové stálosti

vzorků bylo zjištěno, že u většiny betonových směsí došlo během 28 dní k objemové dilataci pohybující se v hodnotách do  $0,4 \text{ mm.m}^{-1}$ .

U všech testovaných a zatvrdlých vzorků (28 dní) bylo rentgenovou práškovou difrakcí sledováno množství ettringitu a portlanditu (pouze porovnáním intenzity odpovídajících difrakcí). Bylo zjištěno, že obsah portlanditu se zvyšuje s přidávaným množstvím pojivové fáze (popílek, cement, vápenný hydrát), což naprosto odpovídá předpokladu a lze tvrdit, že testované alternativní betony se chovaly stejně jako betony klasické (dle ČSN EN 206).

Dle získaných výsledků se dá říci, že připravené betonové směsi s přídavkem fluidních popílků do pojivové části kompozice mají potenciální využití ve stavebnictví například pro výrobu prefabrikátů, protihlukových stěn či kanálových žlabů apod. Jejich použitím ve stavebnictví by bylo možné regulovat zatížení životního prostředí, snížením emisí  $\text{CO}_2$ , vznikajícím při výrobě cementu. Celkově lze podotknout, že výroba a vývoj v oblasti využívání sekundárních surovin je nezbytné pro trvale udržitelný rozvoj.

## 6 Seznam použité literatury

- [1] ČSN EN 206 - 1 (73 2403). *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 2001.
- [2] Beton. *eBeton* [online]. 2010 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.ebeton.cz>
- [3] ADÁMEK, Jiří. *Stavební materiály*. 1. vyd. Brno: CERM, 1997, 205 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0631-3.
- [4] SVOBODA, Luboš. *Stavební hmoty*. 1. české vyd. Bratislava: Jaga, 2004. ISBN 80-8076-007-1.
- [5] Beton Příručka technologa. In: *Heidelbergcement* [online]. 2013 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3C0A2CE4-C25E-472C-9690-570271F4E311/0/Prirucka\\_technologa\\_BETON.pdf](http://www.heidelbergcement.com/NR/rdonlyres/3C0A2CE4-C25E-472C-9690-570271F4E311/0/Prirucka_technologa_BETON.pdf)
- [6] HLAVÁČ, Jan. *Základy technologie silikátů*. 2. upravené vyd. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN 04-816-88.
- [7] BÁRTA, Rudolf. *Chemie a technologie cementu*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství Československé akademie věd, 1961.
- [8] TOBÓN, Jorge I., Jordi PAYÁ a Oscar J. RESTREPO. Study of durability of Portland cement mortars blended with silica nanoparticles. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, vol. 80, s. 92-97 [cit. 2015-02-12]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.074. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814013762>
- [9] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 198 s. ISBN 80-214-0509-0.
- [10] ČSN EN 197-1 (72 2101). *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. 2. vyd. 2012.
- [11] JIRÁSEK, J., VAVRO, M.: *Nerostné suroviny a jejich využití*. Ostrava: Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy ČR & Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1378-3.
- [12] HARMÁČEK, Josef. *Stavební pojiva: Výroba, druhy, vlastnosti a použití pojiv*. 1. vyd. Praha: Statni nakladatelství technické literatury, 1961.
- [13] *Stavební látky. Ústav stavebního zkušebnictví* [online]. 2012 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/AI01/beton1.pdf>
- [14] Příručka nejen o betonu. *ZAPA beton* [online]. 2009 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://www.zapa.cz/fck\\_userfiles/P%C5%99%C3%ADru%C4%8Dka%20nejen%20o%20betonu.pdf](http://www.zapa.cz/fck_userfiles/P%C5%99%C3%ADru%C4%8Dka%20nejen%20o%20betonu.pdf)

- [15] HANUŠ, V., L. VRBA, P. ŠTEMBERK a O. ŠEVČÍK. *Vliv současných chemických přísad a přísad na výsledné vlastnosti betonu* [online]. 2011-2012 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: [http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS\\_2012\\_prisady\\_primesi.pdf](http://concrete.fsv.cvut.cz/~vrba/Publikace/FRVS_2012_prisady_primesi.pdf)
- [16] BEDNÁREK, Jan. *Tepelně izolační lité žárobetony*. Brno, 2014. 64 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [17] Procházka J., Trtík K., Vodička J. *Betonové konstrukce*, ČVUT Praha, 1994.
- [18] Beton. *Pozemkové úpravy* [online]. 2013 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://www.zavitkovsky.wz.cz/STMK\\_P05.pdf](http://www.zavitkovsky.wz.cz/STMK_P05.pdf)
- [19] Českomoravský beton. *Heidelbergcement* [online]. 2012 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.heidelbergcement.com/cz/cs/country/home.htm>
- [20] Zkoušení čerstvého betonu. In: *Experimentální centrum* [online]. 2014 [cit. 2015-02-28]. Dostupné z: [http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010\\_2/pouster12.pdf](http://ecentrum.fsv.cvut.cz/fotogalerie/2010/rp2010_2/pouster12.pdf)
- [21] Standardní a speciální betonové směsi. *Cemex* [online]. 2015 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://cemex.cz/typy-betonu.aspx>
- [22] FRÝZOVÁ, Radka. *Fázové složení elektrárenských popílků: kvantitativní stanovení vybraných minerálů*. Brno, 2012. Diplomová práce. Masarykova Univerzita.
- [23] TZBinfo. *Kotle, kamna, krby* [online]. 2015 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/kotle-kamna-krby/8438-kotle-2-cast>
- [24] *Parní kotle* [online]. 2007 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://projekty.fs.vsb.cz/414/parni-kotle.pdf>
- [25] MICHALÍKOVÁ, Františka, Vladimír JACKO, Martin SISOL a Ivana KOZÁKOVÁ. Úpravnicke technológie získavania užitočných zložiek z tuhých odpadov zo spaľovania uhlia v elektrárnach. *Acta Montanistica Slovaca* [online]. 2005, roč. 10, č. 1, s. 49-55 [cit. 2015-02-13]. ISSN 1335-1788. Dostupné z: <http://actamont.tuke.sk/pdf/2005/n5/10michalikova.pdf>
- [26] Výhody kotlů s fluidním spalováním. *Kovosta-Fluid a.s.* [online]. 2013 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.kovosta.cz/vyhody-fluidniho-spalovani.html>
- [27] BALÁŠ, Marek, Martin LISÝ a Jiří MOSKALÍK. Kotle – 2. část. In: *TZBinfo* [online]. 2012 [cit. 2015-02-12]. ISSN 1801-4399. Dostupné z: <http://vytapeni.tzb-info.cz/zdroje-tepla/8438-kotle-2-cast>
- [28] *Popílký*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2003, 187 s. ISBN 80-248-0327-5.
- [29] BRANDSTETR J., HAVLICA J. Phase composition of solid residues of fluidized bed coal combustion quality tests and application possibilities. In: *Chemical Papers*. 1996, vol.50, issue 4, s. 188-194.

- [30] Popílek. *SiloTransport* [online]. 2015 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.silotransport.cz/popilek>
- [31] KALINA, Martin. *Kompozitní materiály na bázi tuhých zbytků fluidního spalování*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta chemická, 2012. 40 l. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [32] Odpadové fórum 2011: 6. ročník česko-slovenského symposia Výsledky výzkumu a vývoje pro odpadové hospodářství : 13.-15.4.2011, Kouty nad Desnou ; 2. ročník odborné konference Výsledky výzkumu, vývoje a inovací pro obnovitelné zdroje energie : 13.-15.4.2011, Kouty nad Desnou. Praha: CEMC, 2011?. ISSN odpadové forum. Dostupné z: <http://www.odpadoveforum.cz/>
- [33] AZIMI, Ghazal a Vladimiro G. PAPANGELAKIS. Mechanism and kinetics of gypsum anhydrite transformation in aqueous electrolyte solutions. DOI: 10.1016/j.hydrmet.2011.03.007. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0304386X11000703>
- [34] Fluidní spalování. *EnergyWeb* [online]. 2002 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://www.energyweb.cz/web/index.php?display\\_page=2&subitem=2&slovník\\_page=fluid\\_spal.html](http://www.energyweb.cz/web/index.php?display_page=2&subitem=2&slovník_page=fluid_spal.html)
- [35] CEJPKOVÁ, Andrea. *Odsiřování fluidních kotlů* [online]. Praha, 2009 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: [http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska\\_cinnost/obhajoba\\_semestrálního\\_projektu\\_2009/4\\_6\\_odsirovani\\_fluidnich\\_kotlu\\_soubor.pdf](http://tresen.vscht.cz/kap/data/studentska_cinnost/obhajoba_semestrálního_projektu_2009/4_6_odsirovani_fluidnich_kotlu_soubor.pdf). Semestrální projekt. Vysoká škola chemicko - technologická v Praze.
- [36] YAO, Z.T., X.S. JI, P.K. SARKER, J.H. TANG, L.Q. GE, M.S. XIA a Y.Q. XI. A comprehensive review on the applications of coal fly ash. *Earth-Science Reviews* [online]. 2015, vol. 141, s. 105-121 [cit. 2015-02-12]. DOI: 10.1016/j.earscirev.2014.11.016.
- [37] MAHOUTIAN, Mehrdad, Adam S. LUBELL a Vivek S. BINDIGANAVILE. Effect of powdered activated carbon on the air void characteristics of concrete containing fly ash. *Construction and Building Materials* [online]. 2015, vol. 80, s. 84-91 [cit. 2015-02-12]. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.019.
- [38] MEDVECOVÁ, Jaroslava a Petr MUŽÍK. Juniorstav 2004: [Brno, 4.-6.2.2004] : 6. odborná konference doktorského studia s mezinárodní účastí : sborník abstrakt. *Nová surovina - fluidní popílek z tepelné elektrárny Hodonín* [online]. 2004 [cit. 2015-02-12]. DOI: 80-214-2560-1. Dostupné z: <http://www.isvav.cz/h10/resultDetail.do;jsessionid=30D8A9671FEEAC2E5F66BECBDBA6483E?rowId=RIV%2F00216305%3A26110%2F04%3APU45326!RIV%2F2005%2FMSM%2F261105%2FN>

- [39] KALIVODA, Karel. Juniorstav 2007: 9. odborná konference doktorského studia = 9th professional Conference of Postgraduate Students : sborník anotací : 24.1.2007. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 2007, 254-261 s. ISBN 978-80-214-3337-3. Dostupné z: [http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce\\_4.1/Kalivoda\\_Karel\\_CL.pdf](http://www.fce.vutbr.cz/veda/JUNIORSTAV2007/pdf/Sekce_4.1/Kalivoda_Karel_CL.pdf)
- [40] INDRA, Bc. Ivo. Kompozitní materiály na bázi alkalicky aktivované vysokopecní strusky s přídavkem elektrárenských popílků. Brno, 2010. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=25657](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=25657). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [41] VEHOVSKÁ, Ludmila. Juniorstav 2007: 9. odborná konference doktorského studia = 9th professional Conference of Postgraduate Students : sborník anotací : 24.1.2007. *Fluidní popílek pro přípravu směsného cementu* [online]. 2007 [cit. 2015-02-12]. DOI: 978-80-214-3337-3.
- [42] OPRAVIL T.: Příprava kompozitů netradičního složení na bázi tuhých zbytků fluidního spalování uhlí, Diplomová práce FCH VUT Brno, 2005.
- [43] ŠMEJKAL, Zdeněk. *Anorganické experimentální metody I. I. vyd.* Pardubice: Vysoká škola chemicko-technologická, 1990, s. 96. ISBN 80-85113-32-5.
- [44] SOMMER, Lumír; ŠIMEK, Zdeněk; VOZNICA, Petr. *Základy analytické chemie II.* první. Brno : Vutium, 2000. 347 s. ISBN 80-214-1742-0.
- [45] XRD. Chempoint [online]. 2013 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-anorganickych-pojiv/rentgenovy-difraktometr/?preview=3bf4f81fd6d5fe3f694bdc1473e86e1c>
- [46] Elektronová mikroskopie pro biology: Skenovací elektronový mikroskop (SEM). *Parazitologický ústav BC AV ČR* [online]. 2010-2012 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.paru.cas.cz/lem/book/Podkap/7.0.html>
- [47] Rastrovací elektronový mikroskop. Centrum materiálového výzkumu [online]. 2013 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-kovu-a-koroze/rastrovací-elektronovy-mikroskop-zeiss/?preview=3bf4f81fd6d5fe3f694bdc1473e86e1c>
- [48] Laboratoře: Centrum materiálového výzkumu [online]. 2013 [cit. 2015-02-12]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/>
- [49] Kadlec a kol.: *Procesy potravinářských a biotechnologických výrob*, VŠCHT Praha 2003.
- [50] Laserový analyzátor velikosti částic. Centrum materiálového výzkumu [online]. 2013 [cit. 2015-02-13]. Dostupné z: <http://www.materials-research.cz/cz/laboratore/laborator-anorganickych-pojiv/laserovy-analyzator-velikosti-castic/?preview=3bf4f81fd6d5fe3f694bdc1473e86e1c>

- [51] ČSN EN 13454-2+A1. *Pojiva, kompozitní pojiva a průmyslově vyráběné maltové směsi pro podlahové potěry ze síranu vápenatého - Část 2: Zkušební metody*. Praha: Český normalizační institut, Únor 2008.
- [52] CHROMÁ, RNDr. Markéta. *Studium a modelování karbonatace betonu*. Brno, 2012. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=47247](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=47247). Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [53] Betonsystem [online]. [cit. 2015-02-13]. Zkušební pracoviště DESTTEST 3310. Dostupné z: <http://www.betonsystem.cz/PDF/TL%20DESTTEST%203310.pdf>

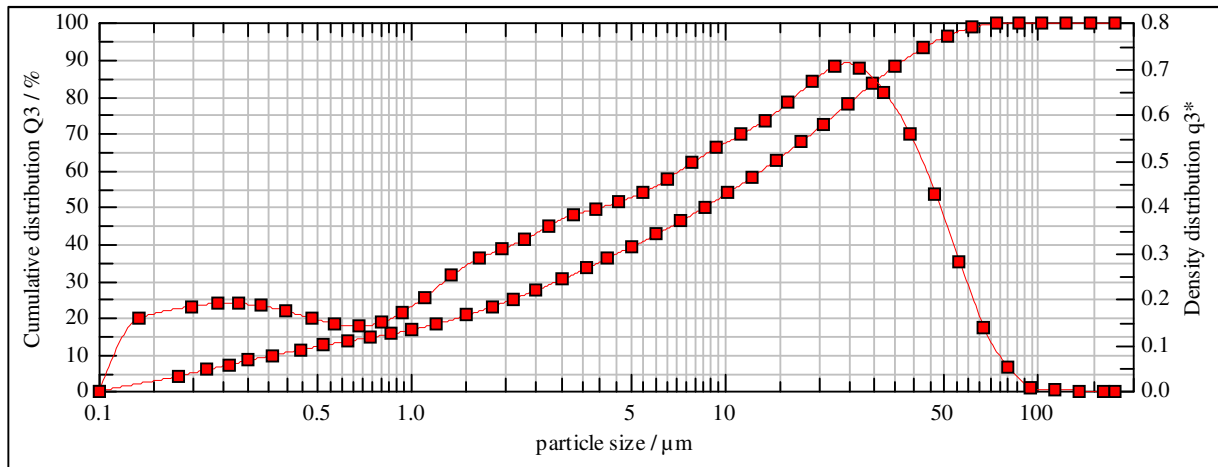
## 7 Přílohy

### Analýza velikosti částic vstupních surovin

**Tabulka 40**

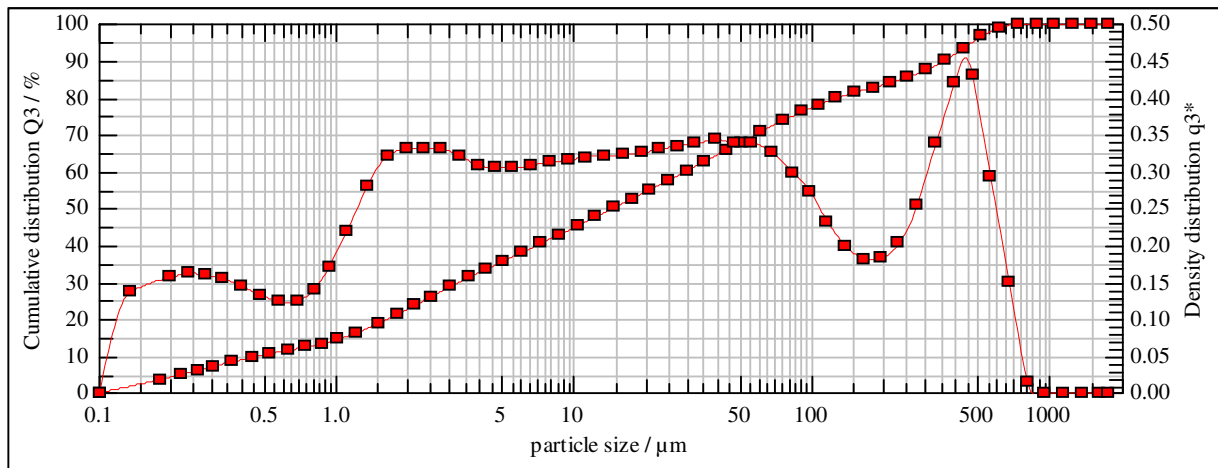
Velikost částic

		Cement I 42,5 R	Fluidní filtrový popílek	Fluidní ložový popílek	Vápenný hydrát
$x_{50}$	[ $\mu\text{m}$ ]	8,63	14,52	11,54	1,69
$x_{90}$		37,86	359,01	339,89	4,03



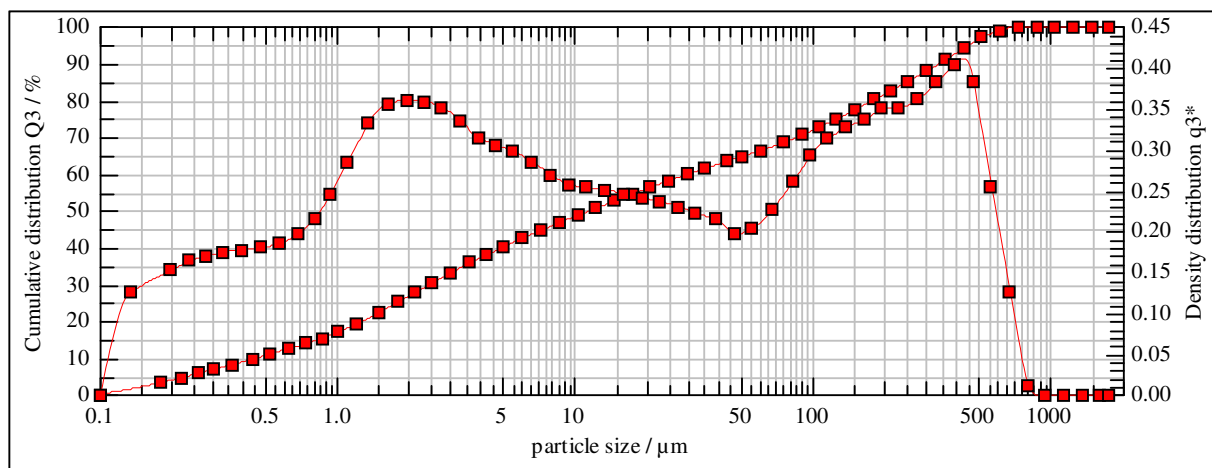
**Obrázek 64**

*Cement I 42,5 R – granulometrie*



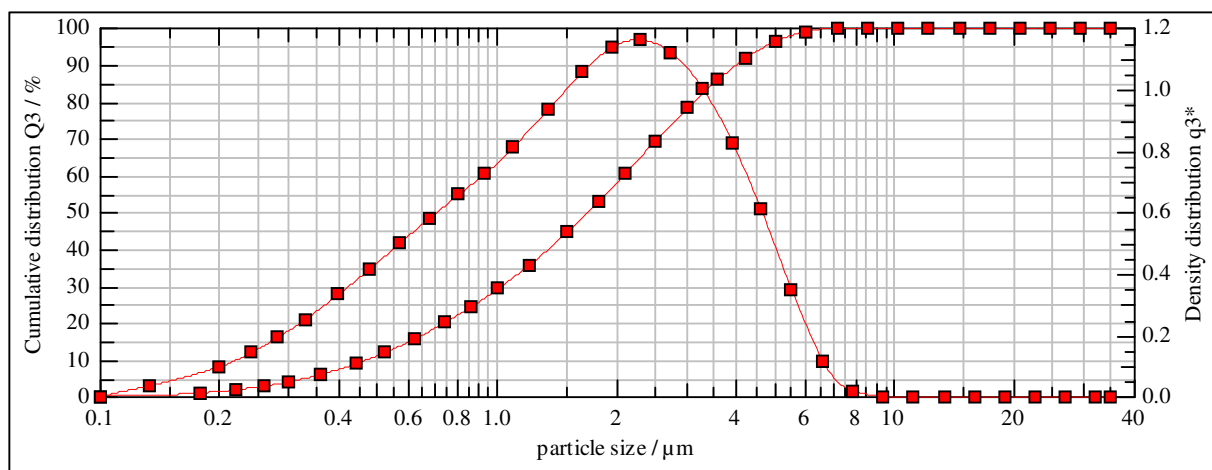
**Obrázek 65**

*Fluidní filtrový popílek - granulometrie*



**Obrázek 66**

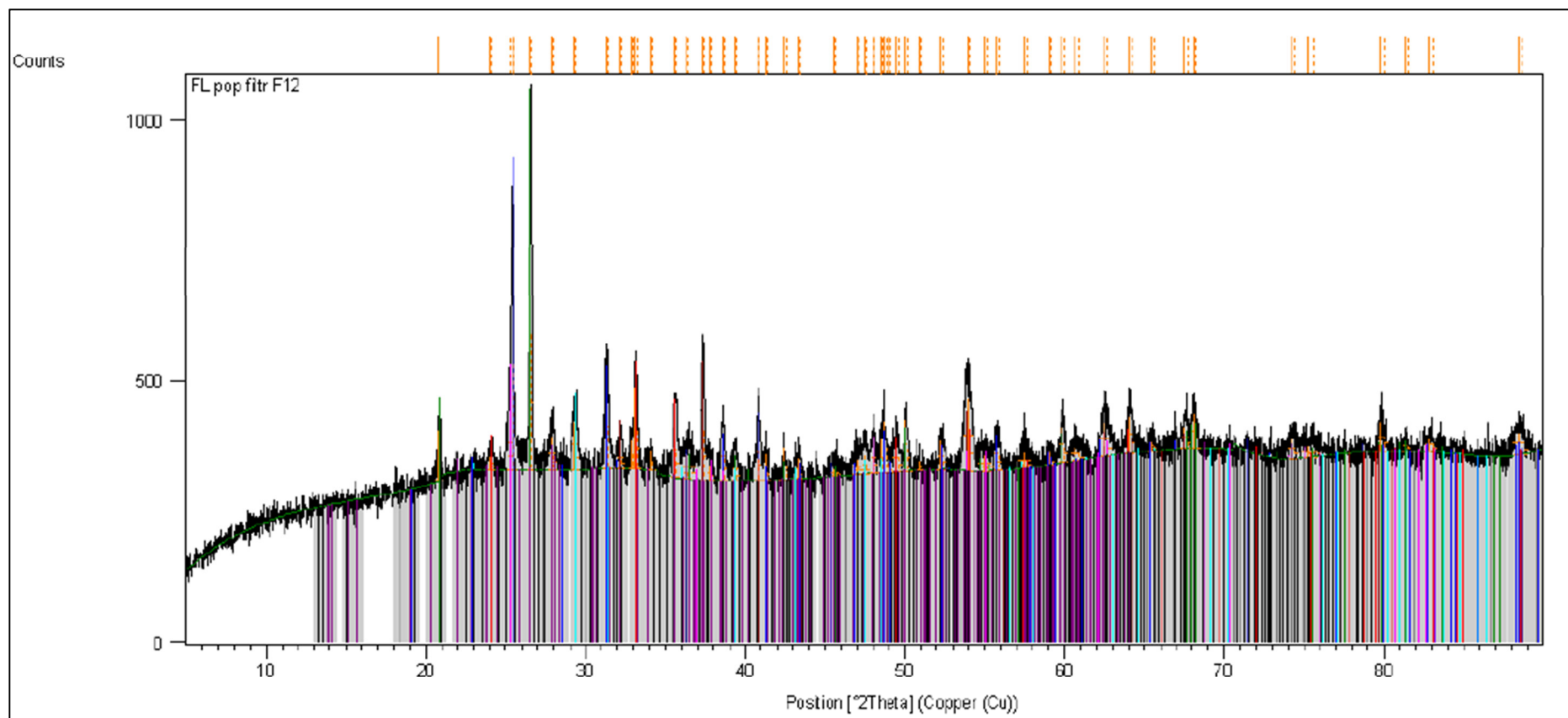
*Fluidní ložový popílek – granulometrie*



**Obrázek 67**

*Vápený hydrát – granulometrie*

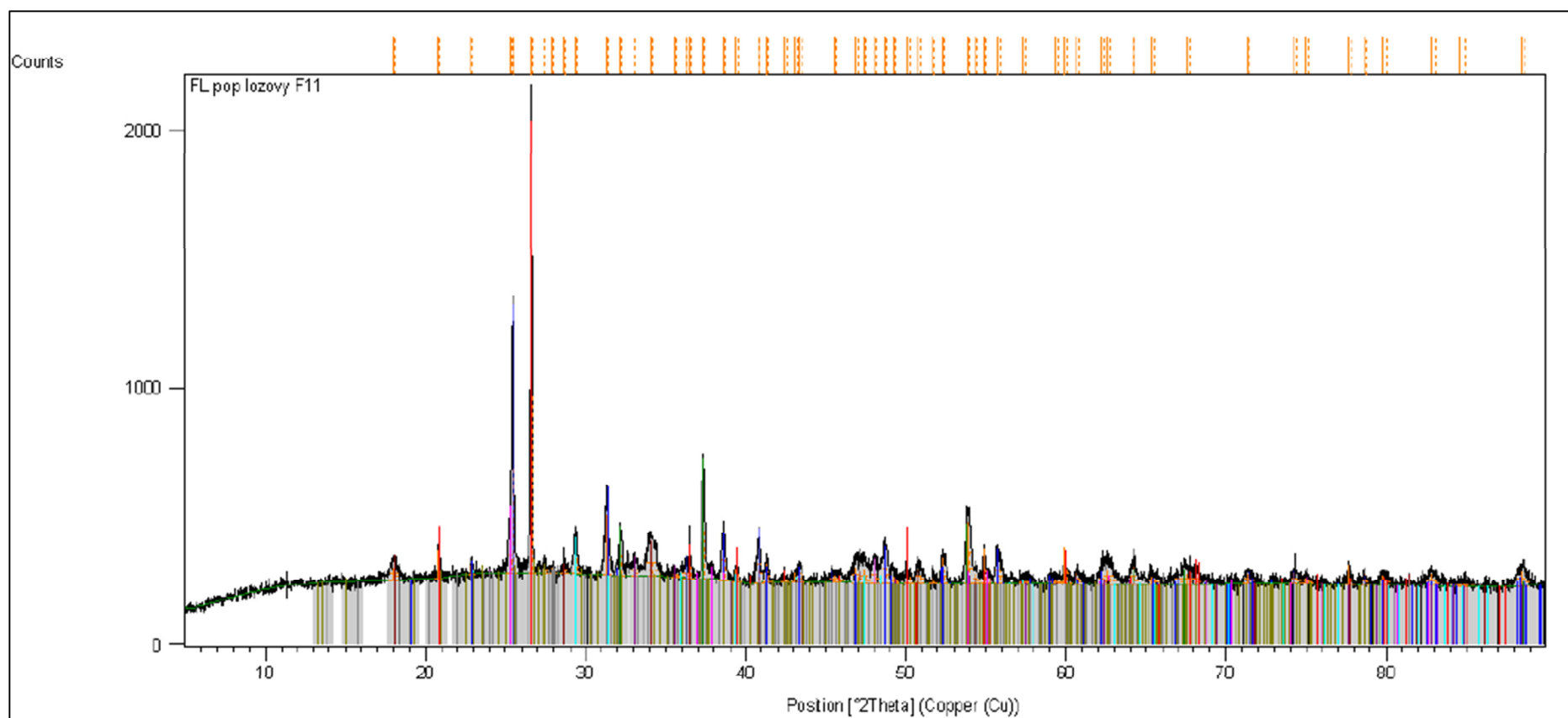
## XRD analýza vstupních surovin



**Obrázek 68**

*Fluidní filtrový popílek*

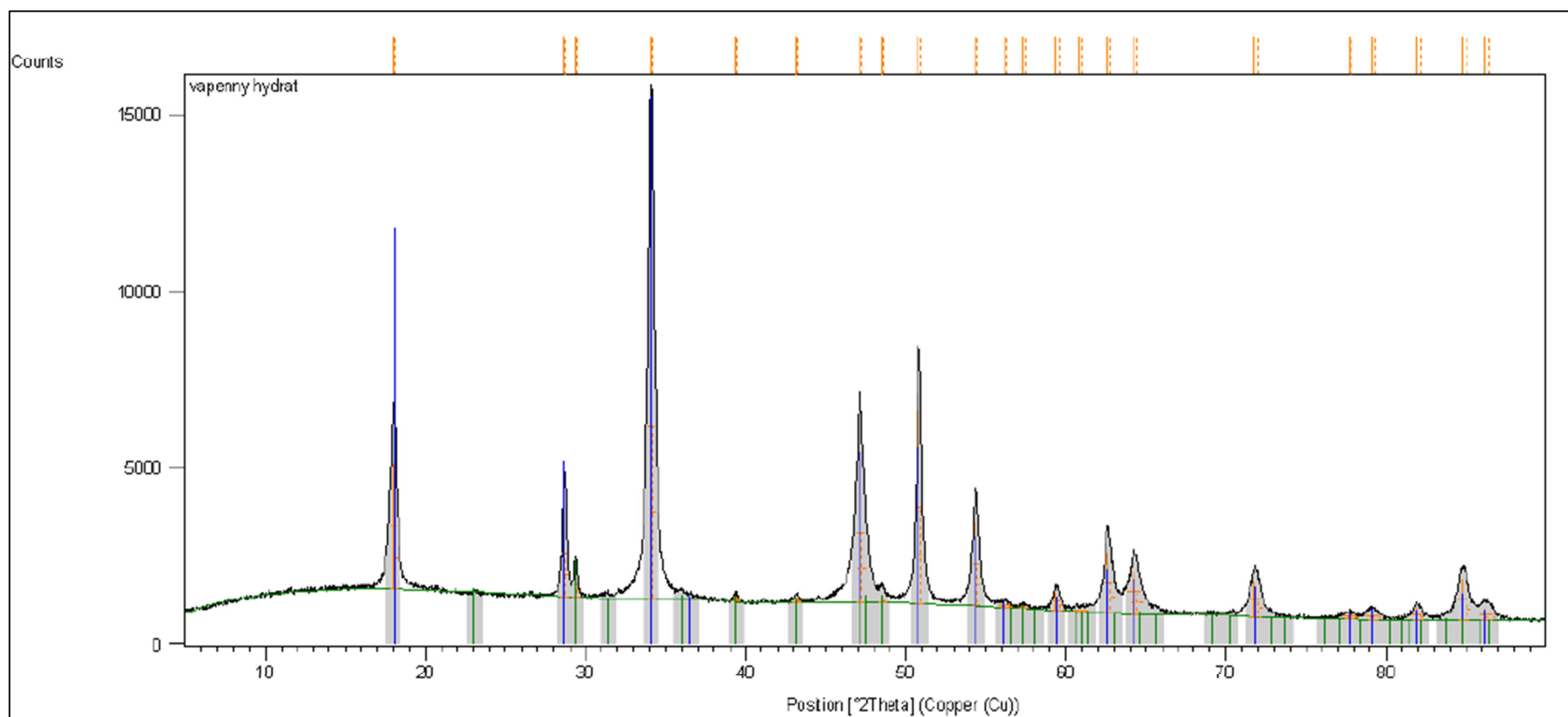
*Legenda: CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, SiO<sub>2</sub> - Křemen, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, CaO - Vápno, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, TiO<sub>2</sub> - Anatas*



**Obrázek 69**

*Fluidní ložový popílek*

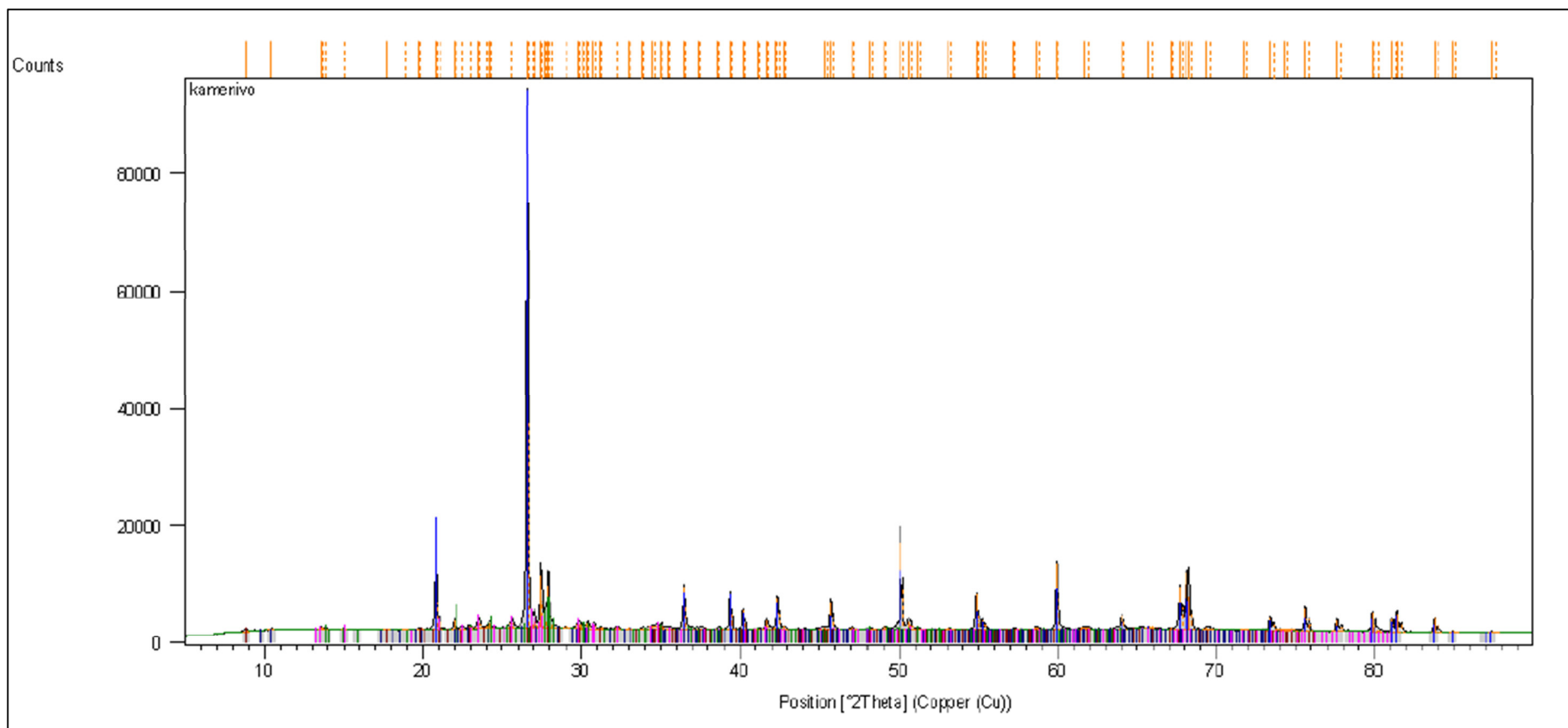
*Legenda: CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, SiO<sub>2</sub> - Křemen, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, CaO - Vápno, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, TiO<sub>2</sub> - Anatas*



**Obrázek 70**

Vápenny hydrat

Legenda: Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit



**Obrázek 71**

*Kamenivo*

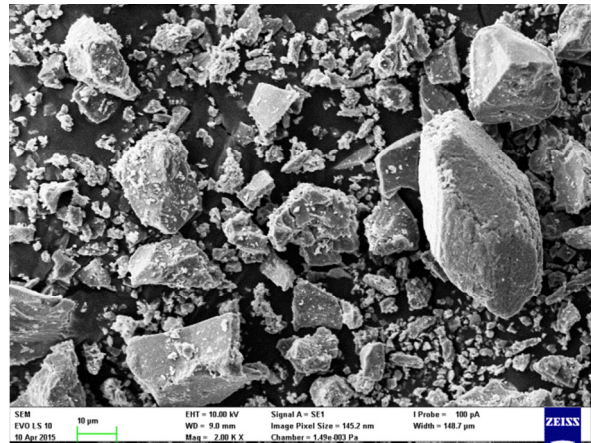
*Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub> - Muskovit, Ca<sub>2</sub>Mg<sub>5</sub>(Si<sub>8</sub>O<sub>22</sub>)(OH)<sub>2</sub> - Tremolit*

## Světelná a skenovací mikroskopie



**Obrázek 72**

*Záznam světelné mikroskopie pro CEM 42,5 R*



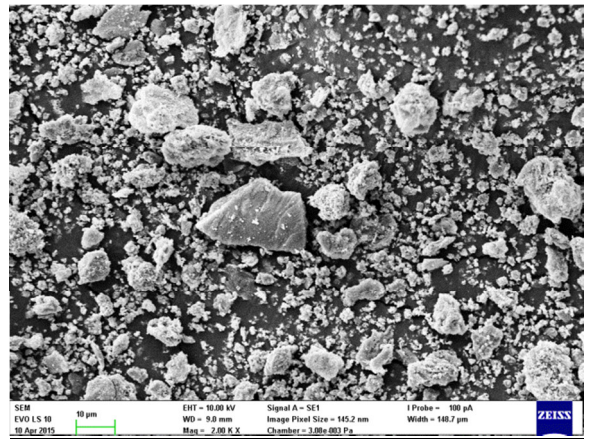
**Obrázek 75**

*Záznam SEM analýzy pro CEM 42,5 R*



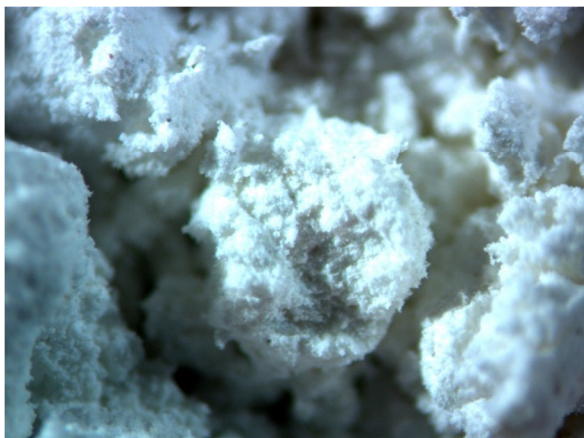
**Obrázek 73**

*Záznam světelné mikroskopie pro fluidní filtrový popílek FK 12*



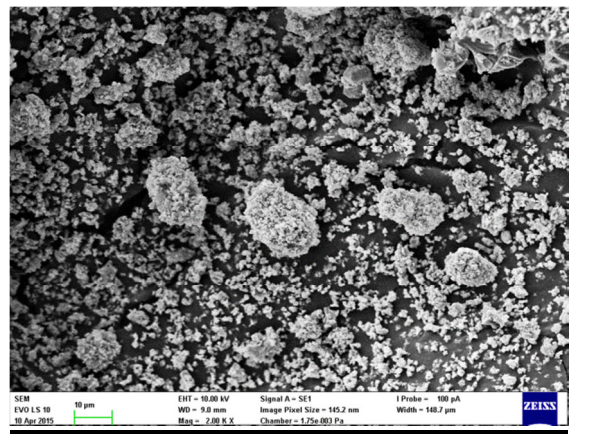
**Obrázek 76**

*Záznam SEM analýzy pro fluidní filtrový popílek FK 12*



**Obrázek 74**

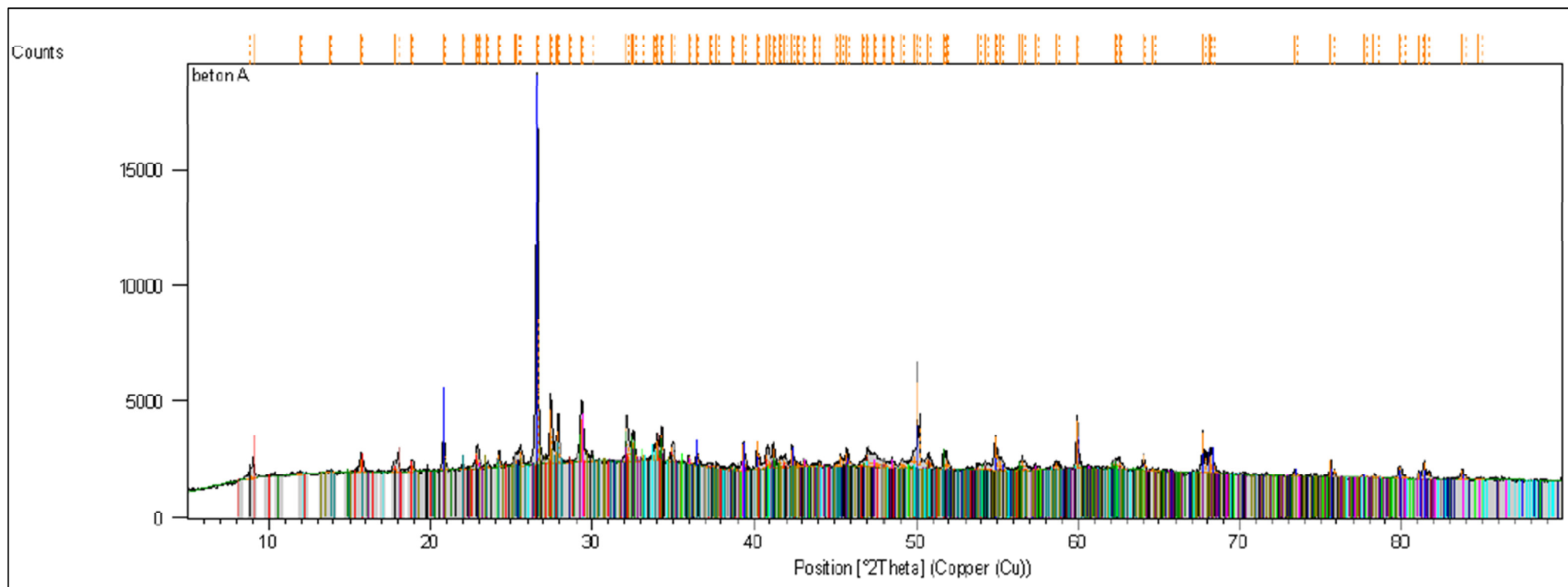
*Záznam světelné mikroskopie pro vápenný hydrát CL 90 S*



**Obrázek 77**

*Záznam SEM analýzy pro vápenný hydrát CL 90 S*

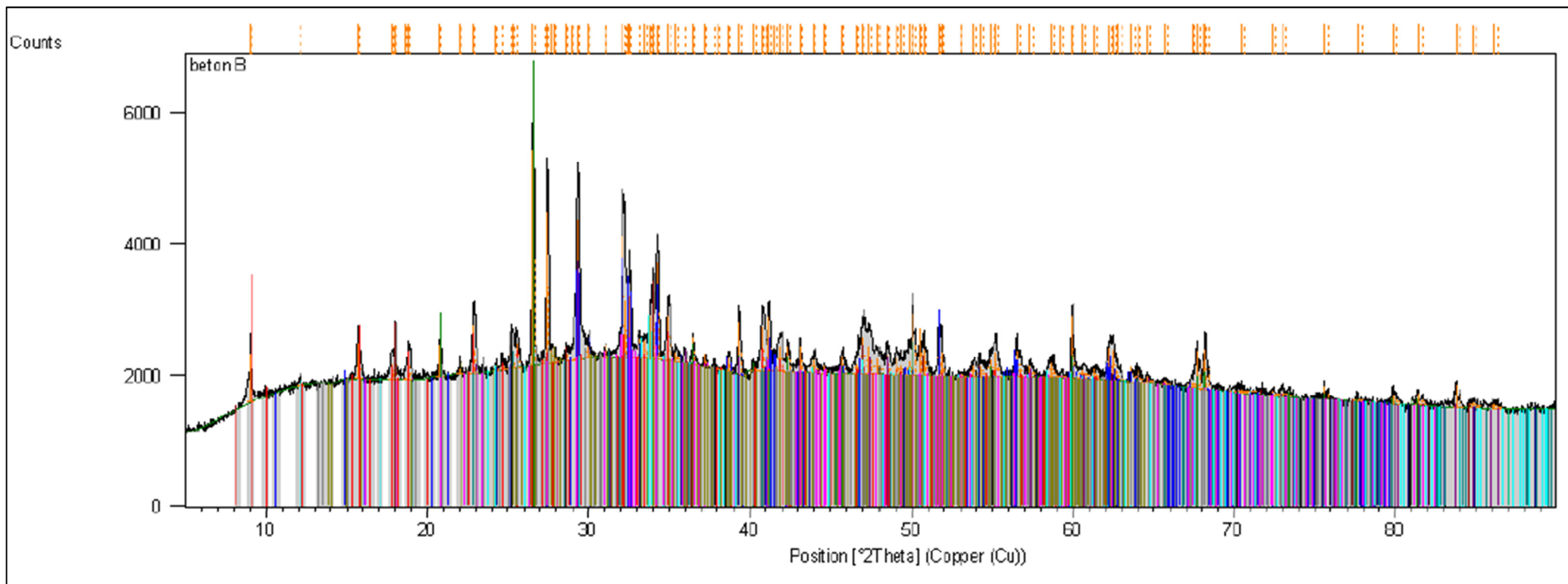
## Výsledky XRD analýzy vzniklých betonů



**Obrázek 78**

Beton A

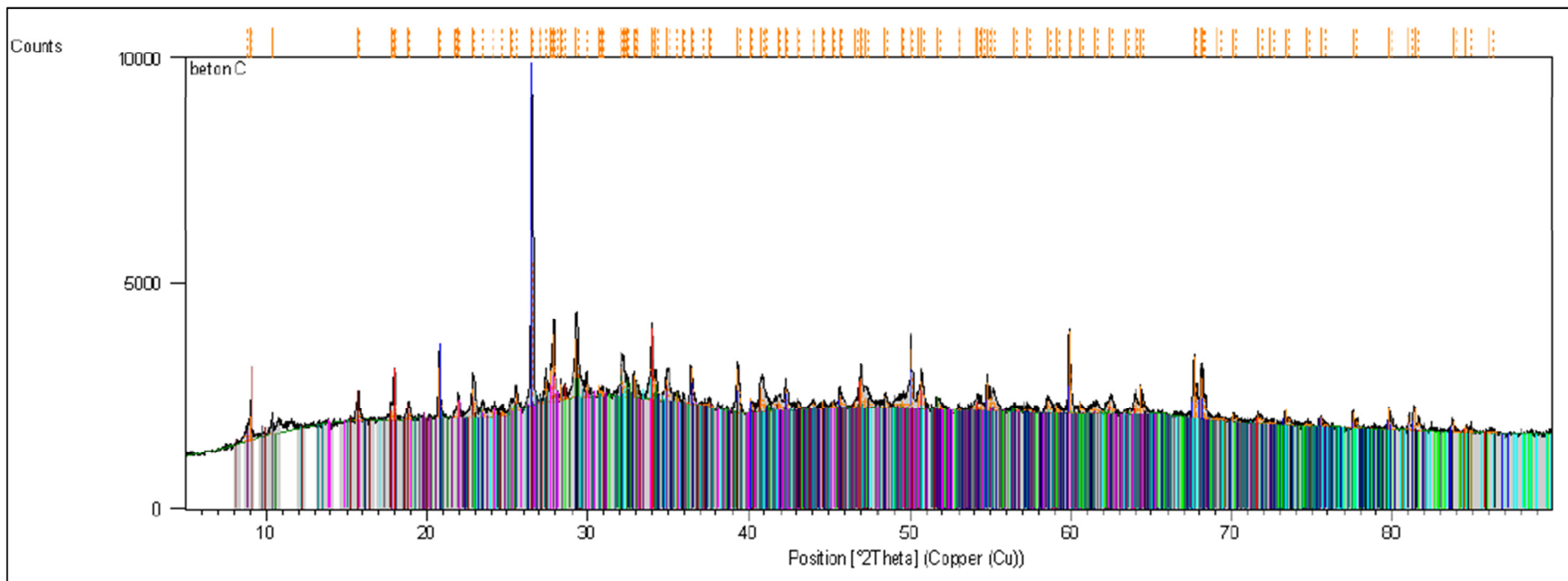
Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, KAl<sub>2</sub>(AlSi<sub>3</sub>O<sub>10</sub>)(OH)<sub>2</sub> - Muskovit, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, TiO<sub>2</sub> - Anatas, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> - Hatrurit, Ca<sub>2</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - Brownmillerit, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> - Larnit, Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub> · 26H<sub>2</sub>O - Ettringit



**Obrázek 79**

*Beton B*

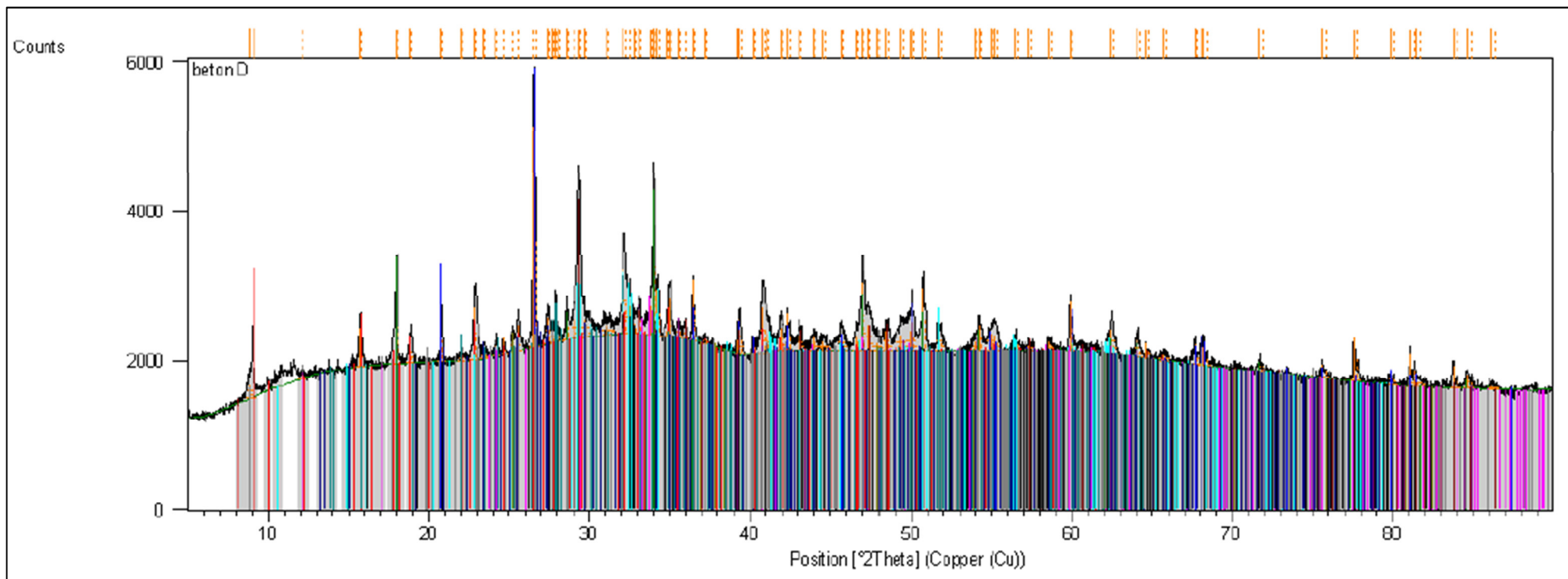
*Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, TiO<sub>2</sub> - Anatas, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> - Hatrurit, Ca<sub>2</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - Brownmillerit, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> - Larnit, Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub> · 26H<sub>2</sub>O - Ettringit*



**Obrázek 80**

*Beton C*

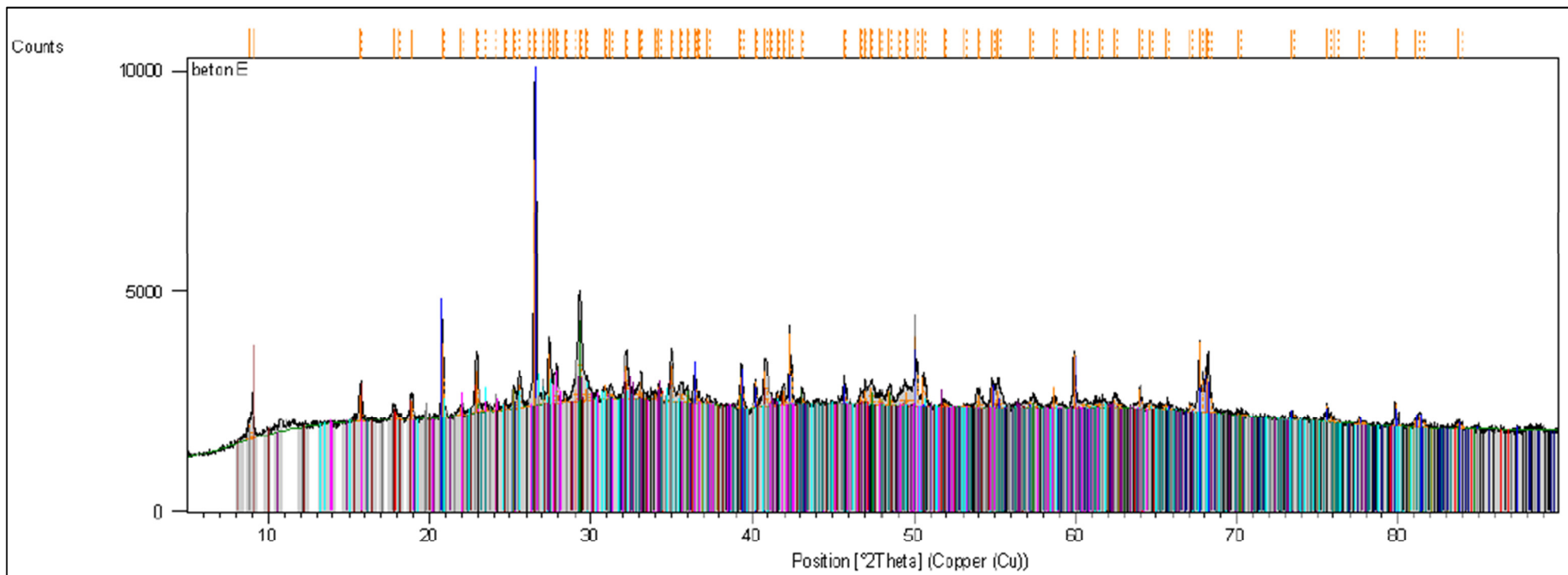
*Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, TiO<sub>2</sub> - Anatas, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> - Hatrurit, Ca<sub>2</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - Brownmillerit, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> - Larnit, Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub> · 26H<sub>2</sub>O - Ettringit*



**Obrázek 81**

*Beton D*

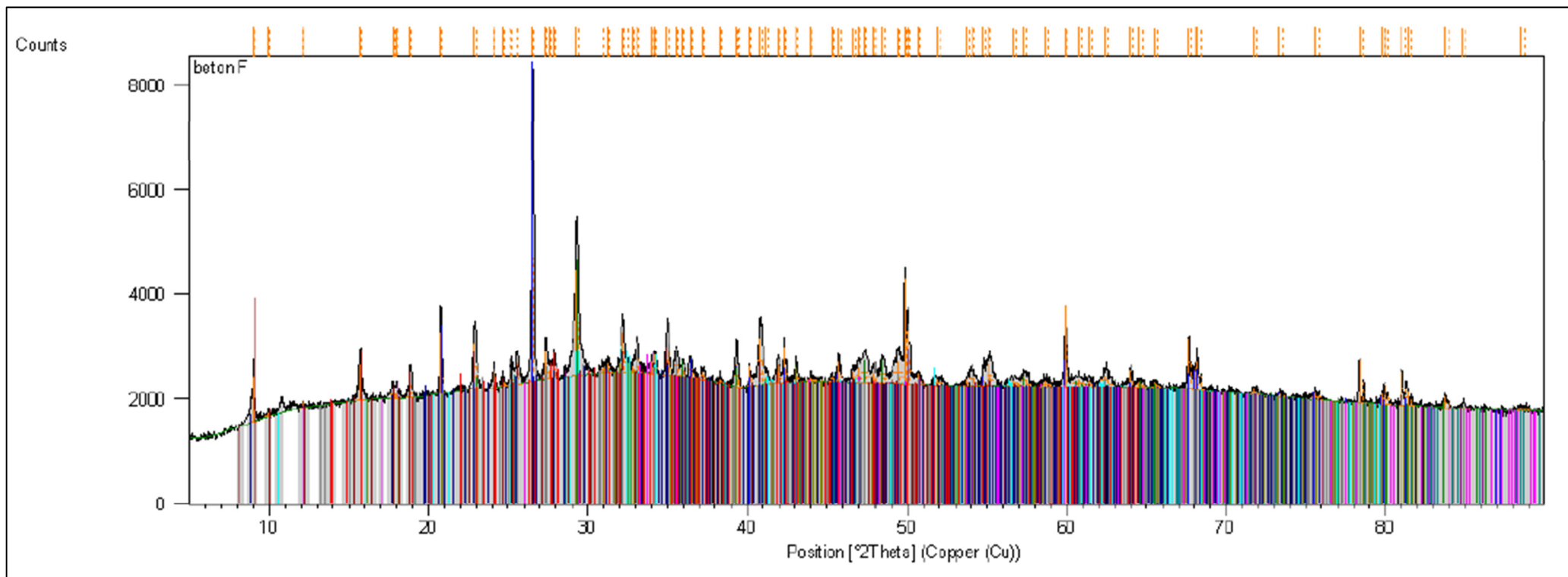
*Legenda:  $\text{SiO}_2$  - Křemen,  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  - Albit,  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  - Ortoklas,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  - Portlandit,  $\text{CaCO}_3$  - Kalcit,  $\text{CaSO}_4$  - Anhydrit,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  - Hematit,  $\text{TiO}_2$  - Anatas,  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$  - Hatrurit,  $\text{Ca}_2(\text{Fe}_2\text{O}_5)$  - Brownmillerit,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$  - Larnit,  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}$  - Ettringit*



**Obrázek 82**

*Beton E*

*Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, TiO<sub>2</sub> - Anatas, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> - Hatrurit, Ca<sub>2</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - Brownmillerit, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> - Larnit, Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub> · 26H<sub>2</sub>O - Ettringit*



**Obrázek 83**

*Beton F*

*Legenda: SiO<sub>2</sub> - Křemen, NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Albit, KAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> - Ortoklas, Ca(OH)<sub>2</sub> - Portlandit, CaCO<sub>3</sub> - Kalcit, CaSO<sub>4</sub> - Anhydrit, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Hematit, TiO<sub>2</sub> - Anatas, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub> - Hatrurit, Ca<sub>2</sub>(Fe<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - Brownmillerit, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> - Larnit, Ca<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(OH)<sub>12</sub> · 26H<sub>2</sub>O - Ettringit*