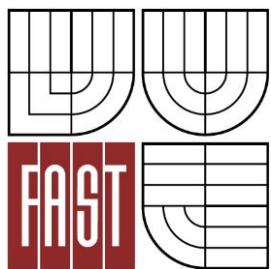




**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STAVEBNÍ**  
**ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A**  
**DÍLCŮ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND  
COMPONENTS

## **SMĚSNÝ CEMENT PRO SPECIÁLNÍ ÚČELY**

MIXING CEMENT FOR SPECIAL PURPOSES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

Matěj Hrdina

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

prof. Ing. MARCELA FRIDRICOVÁ, CSc.

BRNO 2013



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

<b>Studijní program</b>	B3607 Stavební inženýrství
<b>Typ studijního programu</b>	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
<b>Studijní obor</b>	3607R020 Stavebně materiálové inženýrství
<b>Pracoviště</b>	Ústav technologie stavebních hmot a dílců

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

<b>Student</b>	Matěj Hrdina
<b>Název</b>	Směsný cement pro speciální účely
<b>Vedoucí bakalářské práce</b>	prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.
<b>Datum zadání bakalářské práce</b>	30. 11. 2012
<b>Datum odevzdání bakalářské práce</b>	24. 5. 2013

V Brně dne 30. 11. 2012

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

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

## **Podklady a literatura**

Dílčí zpráva záměru VVZ MSM 0021630511 - DT1 2008,2009,2010

DUDA, H.,W., Cement Data-book, Bauverlag GmbH Wiesbaden und Berlin, 1975

HLAVÁČ, J., Základy technologie silikátů, 1. vydání. Praha: SNTL, 1981.

VAVŘÍN, F., Maltoviny, 3. vydání. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1987.

ŠAUMAN, Z., Maltoviny I, VUT v Brně, 1993

LACH, V., DAŇKOVÁ, M., Mikrostruktura stavebních látek, 2. vydání, VUT Brno, ISBN 80-214-0309-8.

BÁRTA, R. Chemie a technologie cementu

## **Zásady pro vypracování**

V rámci bakalářské práce bude uskutečněna úvodní studie vývoje směsného pojiva na bázi portlandského cementu, sloužícího jako premix ambulantně připravovaných maltových a omítkových směsí. Práce bude provedena v souladu s následujícím zadáním:

- rešerše současného stavu poznání
- návrh premixu na bázi portlandského cementu
- aplikační zkoušky premixu jako pojiva jádrové omítky a zdící malty
- orientační stanovení základních technologických vlastností

Rozsah práce cca 40 stran formátu A4 včetně příloh.

## **Předepsané přílohy**

.....  
prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Bakalářská práce se v teoretické části zabývá technologií výroby portlandského cementu. Jeho surovinovým složením, mineralogickým složením, teorií vzniku slínekových minerálů při výpalu a jeho možným mísením s jinými surovinami vhodného charakteru. Je uveden přehled speciálních druhů cementů.

V experimentální části byl vypracován návrh cementových směsí normativně označovaných jako „Cement pro zdění“. Na cementech byly zkoumány normou požadované vlastnosti v závislosti na množství a druhu použitých modifikujících přísad.

## **Klíčová slova**

Portlandský cement, směsný cement, cement pro zdění, odprašky, plastifikační přísada, provzdušňující přísada

## **Abstract**

Thesis deals with the technology of production of portland cement its raw material composition, mineralogical composition, theory of clinker minerals during firing and possible mixing with other materials suitable character. It provides an overview of specialty cements.

It was prepare a proposal cement mixtures normatively called "Masonry cement." Cement was examined on required properties depending on the amount and the type of chemical additives.

## **Keywords**

Portland cement, blended cement, masonry cement, stone dust, plasticizer agent, air-entraining agent

### **Bibliografická citace VŠKP**

HRDINA, Matěj. *Směsný cement pro speciální účely*. Brno, 2013. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce prof. Ing. Marcela Fridrichová, CSc.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 24. 5. 2013

.....  
podpis autora  
Matěj Hrdina

**Poděkování:**

Na tomto místě chci poděkovat zejména paní prof. Ing. Marcele Fridrichové, CSc., za odborné a pedagogické vedení, dále pak panu Ing. Dominiku Gazdičovi, PhD. a všem zaměstnancům z ÚTHD FAST VUT Brno, kteří mi v průběhu bakalářské práce pomohli.

# Obsah

ÚVOD.....	11
<b>I. TEORETICKÁ ČÁST .....</b>	<b>12</b>
1. PORTLANDSKÝ CEMENT.....	12
1.1 Historie.....	12
1.2. Rozdělení cementů .....	13
1.3. Suroviny .....	14
1.3.1. Základní suroviny .....	14
1.3.2. Korekční suroviny.....	15
1.3.3. Zušlechťující přísady .....	15
1.4. Technologie výroby .....	16
1.4.1. Suchý způsob.....	16
Těžba.....	17
Drcení .....	17
Mletí.....	18
Homogenizace.....	18
Výpal.....	18
Chlazení .....	21
Mletí cementu.....	21
Skladování, balení a expedice .....	22
1.5. Návrh složení surovin pro výrobu portlandského cementu .....	22
Hydraulický modul.....	23
Silikátový modul .....	23
Hlinitanový modul.....	23
Kalorický modul.....	23
Modul agresivity.....	24
Stupeň sycení vápnem podle Lea a Parkera.....	24
1.6. Mineralogické složení slínku a jejich hydratace .....	24
1.6.1. Trikalciumsilikát – Alit ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ; $\text{C}_3\text{S}$ ) .....	24
1.6.2. Dikalciumsilikát – Belit ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ; $\text{C}_2\text{S}$ ).....	25
1.6.3. Trikalciumaluminát ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{C}_3\text{A}$ ).....	25
1.6.4. Tetrakciumaluminátferit – Brownmillerit ( $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{C}_4\text{AF}$ )....	26
1.6.5. Skelná fáze .....	26

1.6.6.	Vedlejší složky .....	26
	Volné CaO.....	27
	Volné MgO .....	27
	Alkálie.....	27
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....	27
	Cl <sup>-</sup> .....	27
1.7.	Vznik portlandského slínku.....	27
1.7.1.	Přehřívací stádium (do 750 °C) .....	27
1.7.2.	Kalcinační stádium (750 – 1250 °C).....	28
1.7.3.	Stádium suchého slinování (1250 – 1350 °C).....	28
1.7.4.	Stádium taveninového slinování (1350 – 1450 °C).....	28
1.7.5.	Chladicí stádium .....	29
2.	PORTLANDSKÉ CEMENT SMĚSNÉ .....	29
2.1.	Hlavní složky portlandských cementů směsných.....	31
2.1.1.	Struska.....	31
	Chemické složení .....	31
	Buzení vysokopeční strusky.....	32
2.1.2.	Vápenec.....	32
2.1.3.	Popílky .....	33
	Křemičité popílky (V).....	33
	Vápenaté popílky (W).....	34
2.1.4.	Křemičité úlety .....	34
2.1.5.	Přírodní pucolány.....	34
2.1.6.	Kalcinovaná břidlice .....	34
2.2.	Portlandský směsný cement (CEM II-M) .....	35
2.2.1.	Vlastnosti.....	35
3.	CEMENTY SPECIÁLNÍ .....	36
3.1.	Silniční cement .....	36
3.2.	Síranovzdorný cement .....	36
3.3.	Hydrofobní cement .....	36
3.4.	Bílý cement .....	37
3.5.	Hlinitanový cement.....	37
4.	CEMENT PRO ZDĚNÍ.....	37
4.1.	Fyzikální a mechanické vlastnosti.....	37

4.2.	Zkušební metody .....	38
4.2.1.	Stanovení hodnoty penetrace.....	38
4.2.2.	Stanovení retence vody .....	38
4.2.3.	Stanovení obsahu vzduchu .....	39
4.3.	Cementy pro zdění na trhu .....	39
<b>II.</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....</b>	<b>40</b>
1.	CÍL PRÁCE.....	40
2.	METODIKA .....	40
3.	POSTUP PRÁCE .....	41
4.	POUŽITÉ SUROVINY A PŘÍSTROJE.....	42
4.1.	Suroviny .....	42
4.2.	Přístroje .....	44
5.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	45
6.	DISKUZE VÝSLEDKŮ .....	50
<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>.....</b>	<b>52</b>
	Seznam použité literatury .....	53
	Seznam tabulek .....	55
	Seznam obrázků .....	55

## Úvod

S rozvojem vědy a techniky v oblasti organické i anorganické chemie, který vedl k vývoji celé řady přísad, schopných cíleně modifikovat vlastnosti stavebních hmot, došlo v posledním desetiletí minulého století k rozmachu průmyslově vyráběných maltových směsí. Tyto stavební materiály umožnily podstatné snížení pracnosti stavební činnosti a současně i její výrazné časové zefektivnění. Díky významnému technickému přínosu začaly průmyslové směsi masově nahrazovat maltové směsi vyráběné in situ z jednotlivých výchozích surovin, a to i za cenu jejich vyšší nákladnosti.

Průmyslově vyráběné maltové směsi se z ekonomického hlediska stávají stále méně dostupnými pro stavební práce, tudíž se začal hledat způsob, jak snížit náklady. Jelikož však stavební veřejnost přivykla aplikačně jednoduššímu použití průmyslově vyráběných směsí, začalo se hledat vhodné kompromisní řešení. To pak bylo nalezeno pro lokality se zdrojem písku ve vývoji a výrobě tzv. pojivových premixů, ke kterým je na stavbě přidáváno již jen toto plnivo. Premixy, normativně označované jako cement pro zdění, se mají vyznačovat značnou universálností, neboť pouhou změnou dávky a granulometrie plniva mohou být použity buď jako omítkové směsi, malty pro zdění, či postřiky pod omítky. Aby bylo dosaženo potřebné universálnosti, je třeba pojivou bázi modifikovat vhodně volenými přísadami.

V současné době se na našem trhu vyskytují pouze tři producenti pojivého premixu, cementárny Hranice, Prachovice a Čížkovice, které jako základní pojivový systém používají odprašky ze žárového konce pece na výpal slínku. Protože tento surovinový základ je dosažitelný pouze pro cementárny, hledal se v předchozích etapách práce alternativní pojivový systém s obecnou dosažitelností. Na základě provedeného výzkumu byl vyvinut systém na bázi portlandského cementu, vápenného hydrátu a odprašků z výroby stavebního kamene. Pro další výzkum v této oblasti je proto nutné zabývat se vývojem vhodné modifikace základního pojivového systému, kterou by se docílilo požadované universálnosti pojivového premixu.

# I. Teoretická část

## 1. Portlandský cement

Cement je hydraulické pojivo, které vzniká výpalem nad mez slinutí a jemným pomletím anorganické surovinové směsi specifického složení. Po smíchání s vodou se stává plastickým a následně tuhne, tvrdne a nabývá pevnosti za současné změny svého chemicko-mineralogického složení, a to jak na vzduchu, tak pod vodou.

### 1.1 Historie

Hydraulických vlastností cementu ve větším měřítku začali první využívat Římané. Některé ze staveb stále stojí (Pantheon). Malta, kterou používali, byla tvořena směsí vápna a sopečného popela (pucolánů).

V průběhu času byly snahy o zdokonalení původní římské receptury, až v 18. století John Smeaton zjistil, že cement vyrobený z vápna měkkých, jily silně znečištěných vápenců vykazuje lepší vlastnosti než při využití v té době používaného vápna z vápenců co nejčistších. Na základě chemického rozboru stanovil Louis Joseph Vicat optimální poměr složek pro výrobu tehdejšího cementu.

Za vynálezce portlandského cementu je však považován skot John Aspdin, který si nechal roku 1824 patentovat výrobek nazvaný podle podobnosti s vysoce jakostní šedobílou horninou nacházející se na jihoanglickém ostrovu Portland. [1]

První pokus o výrobu portlandského cementu podnikl Ferdinand Bárta v roce 1860. V roce 1865 byla založena první cementárna v Čechách v Bohosudově. Další pak v Podolí (1870), Radotíně (1872) a v Berouně (1900). [2]

V současné době funguje v české republice pět cementáren (dvě na Moravě a tři v Čechách). Cementárny v Mokré a Radotíně náleží společnosti Českomoravský cement, a.s., jež je součástí koncernu Heidelberg Cement Group. V cementárně Králův Dvůr, náležící stejné společnosti, byla v roce 2003 zastavena výroba a je zde v provozu moderní balicí linka a expedice baleného i volně loženého cementu. Cementárna v Čížkovicích patří společnosti Lafarge Cement, a.s., dále pak cementárna Prachovice spadající pod koncern Holcim (Česko), a.s. a společnost Cement Hranice, a.s.



*Obr. 1: Výrobci cementu v ČR*

## 1.2. Rozdělení cementů

V důsledku odlišných vlastností jednotlivých cementů vyplývajících z jejich rozdílného chemicko-mineralogického složení je lze dělit na cementy pro obecné použití a na cementy speciální (jejich složení se řídí většinou podnikovými normami).

*ČSN EN 197 – 1 – Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití* podle směsnosti:

- ❖ CEM I – portlandský cement
- ❖ CEM II – portlandský cement směsný
- ❖ CEM III – vysokopecní cement
- ❖ CEM IV – pucolánový cement
- ❖ CEM V – směsný cement

Na základě poměru jednotlivých vedlejších složek k poměru portlandskému slinku norma definuje 27 různých cementů pro obecné použití.

Norma *ČSN EN 196 – 1 – Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti* stanovuje tři normalizované pevnosti a to 32,5; 42,5 a 52,5 [MPa]. Dané číslo vyjadřuje pevnost v tlaku po 28 dnech hydratace. Dále tato norma stanovuje, zda se jedná o cement

s vysokými počátečními pevnostmi, které nesou značení R, anebo o cementy s normální rychlostí nabývání pevnosti, které jsou označovány písmenem N. [3]

**Tab. 1: Druhy cementu pro obecné použití dle ČSN EN 197-1**

Hlavní druhy	Označení 27 výrobků (cementy pro obecné použití)		Složení (poměry složek podle hmotnosti <sup>a)</sup> )										Doplňující složky			
			Slínek	Vysokopepční struska	Křemičitý úlet	Pucolány		Popílky		Kalcinovaná břidlice	Vápenec					
						přírodní	kalcinované	křemičité	vápenaté		L	LL				
K	S	D <sup>b)</sup>	P	Q	V	W	T	L	LL							
CEM I	Portlandský cement	CEM I	95 - 100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
CEM II	Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	80 - 94	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/B-S	65 - 79	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
	Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	90 - 94	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
	Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	80 - 94	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/B-P	65 - 79	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-Q	80 - 94	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
	Portlandský popílkový cement	CEM II/B-Q	65 - 79	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-V	80 - 94	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/B-V	65 - 79	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-W	80 - 94	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	-	0 - 5		
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/B-W	65 - 79	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-T	80 - 94	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	-	0 - 5		
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/B-T	65 - 79	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-L	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	-	0 - 5		
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/B-L	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	-	0 - 5		
		CEM II/A-LL	80 - 94	-	-	-	-	-	-	-	-	6 - 20	-	0 - 5		
Portlandský směsný cement <sup>c)</sup>	CEM II/B-LL	65 - 79	-	-	-	-	-	-	-	-	21 - 35	-	0 - 5			
	CEM II/A-M	80 - 94	6 - 20										0 - 5			
CEM III	Vysokopepční cement	CEM II/B-M	65 - 79	21 - 35										0 - 5		
		CEM III/A	35 - 64	36 - 65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5		
CEM IV	Pucolánový cement <sup>c)</sup>	CEM III/B	20 - 34	66 - 80	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5			
		CEM III/C	5 - 19	81 - 95	-	-	-	-	-	-	-	-	0 - 5			
		CEM IV/A	65 - 89	-	11 - 35										0 - 5	
CEM V	Směsný cement <sup>c)</sup>	CEM IV/B	45 - 64	-	36 - 55										0 - 5	
		CEM V/A	40 - 64	18 - 30	-	18 - 30										0 - 5
		CEM V/B	20 - 38	31 - 50	-	31 - 50										0 - 5

a) Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu hlavních a doplňujících složek  
b) Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %  
c) Hlavní složky použité v těchto cementech (kromě slínku) musí být deklarovány v označení cementu

### 1.3. Suroviny

Složky pro výrobu portlandského slínku musí vyhovovat nárokům pro použití daného cementu a lze je rozdělit do tří skupin: základní, korekční a zušlechťující.

#### 1.3.1. Základní suroviny

Jedná se o vápenatou složku, která je zdrojem CaO, a o zeminy, které zajišťují dostatek hydraulických oxidů.

## Vápenec

Nejvhodnější jsou měkké vápence, které ideálně mají takové složení, aby se nemusely přidávat další složky obsahující  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a  $\text{SiO}_2$ . Nevhodné jsou dolomitické vápence z důvodu vyššího obsahu  $\text{MgO}$ . Ideální obsah  $\text{CaCO}_3$  je 76-78 %.

Vápenec obsahuje i složky, jejichž množství je nutno omezit, jelikož mají špatný vliv na výsledný slínek. Jedná se o  $\text{MgO}$  (max. 7%), S (max. 1%),  $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$  (max. 0,5%),  $\text{MnO}$  (max. 0,3%),  $\text{P}_2\text{O}_5$  (max 0,1%). [4]

## Zeminy

Přidávají se pouze pokud se ve vápenci nenachází dostatek hydraulických oxidů. Jedná se převážně o jíly, slíny, břidlice či lupky. Ty jsou tvořeny různými druhy jílových minerálů patřících do skupin: kaolinitu, montmorillonitu, illitu, palygarskitu, chloritů, slíd a amfibolů. Důležité je sledovat obsah alkálií a také velikost jílovitých částic. [4]

### 1.3.2. Korekční suroviny

Tyto složky se přidávají v malém množství oproti základním surovinám a vždy jen ten oxid, který v soustavě chybí. Při nedostatku  $\text{CaO}$  se přidává vysokoprocenní vápenec. Pro korekci  $\text{SiO}_2$  se přidává křemenná písek, popílek či křemelina. Bauxit se dodává, pokud je surovina chudá na  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Ve všech našich cementárnách se musí provádět korekce  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  a to kyzovými výpražky. [5]

### 1.3.3. Zušlechťující přísady

Z hlediska působení lze tyto přísady rozdělit do tří skupin:

1. intenzifikátory: snižují viskozitu taveniny a teplotu výpalu
2. mineralizátory: vliv na průběh tvorby minerálů
3. legující přísady: zlepšují melitelnost a hydraulické vlastnosti

Účinnost některých látek se vzájemně překrývá, takže je nelze zařadit jednoznačně. Mimoto názory na účinnost se různí. Všeobecně se doporučuje fosforit, apatit, silikofluoridy a především sádrovec v množství 2 – 4 %. Podporuje vznik  $\text{C}_3\text{S}$ , snižuje obsah volného vápna, zvyšuje počáteční pevnosti, ale snižuje pevnosti 28 denní. Dají se použít i chemosádrovce. [5]

## 1.4. Technologie výroby

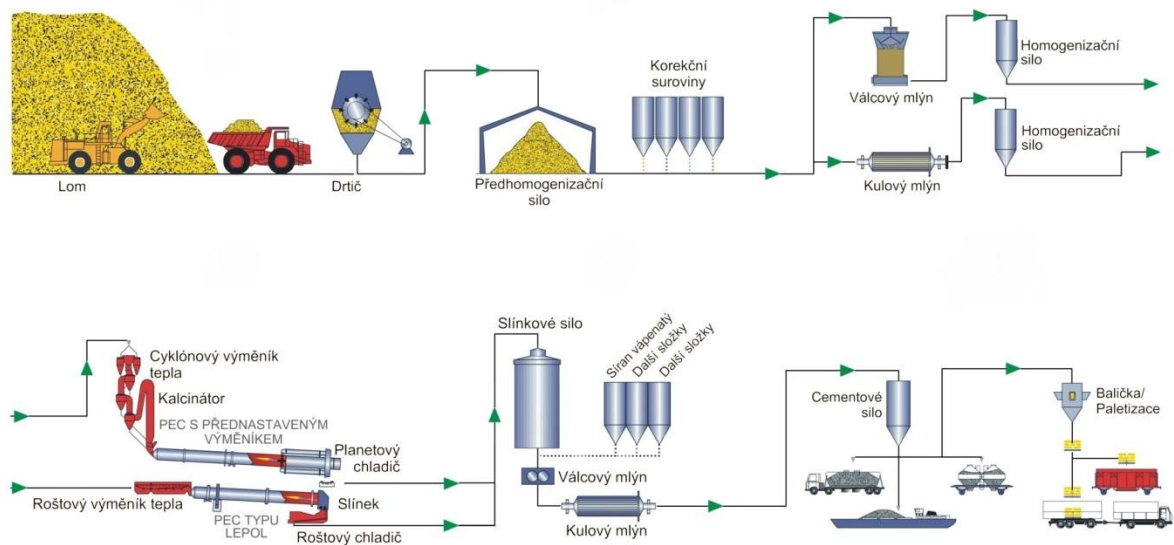
Výrobu cementu lze rozdělit na 4 technologické procesy a to mokrý, polomokrý, polosuchý a suchý.

- ❖ **Mokrý:** suroviny se melou ve vodě na čerpatelný kal. Ten se dopravuje buď přímo do pece, anebo nejprve do sušičky kalu.
- ❖ **Polomokrý:** nejprve ze surovinového kalu ve filtračních lisech odstraňuje voda. Z filtračního koláče se lisují granule a ty se dávkuje buď do roštového předehříváče, nebo do sušičky filtračního koláče na výrobu surovinové moučky.
- ❖ **Polosuchý:** suchá surovinová moučka se granuluje s vodou a přivádí se do roštového předehříváče před pecí nebo do dlouhé pece vybavené řetězy.
- ❖ **Suchý:** surovina se mele a suší na surovinovou moučku v podobě sypkého prášku. Suchá surovinová moučka se přivádí do pece s předehříváčem či méně často do dlouhé suché pece.

Z důvodů energetické náročnosti, stoupajících cen paliv a šetrnosti k životnímu prostředí se v naší republice používá výhradně suchý způsob (poslední mokrá výroba byla zastavena v roce 1998). Proto bude rozebrán pouze suchý způsob výroby. [6]

### 1.4.1. Suchý způsob

U tohoto způsobu se zpravidla postupuje takto: natěžené suroviny se podrtí a melou v mlýnech, kde se současně i vysušují. Následně se surovina homogenizuje v sílech, kde se upravují i její chemické složení. Potom se přivádí do předehříváče, kde se zahřívá spalinami. Výpal se provádí v krátké rotační peci. Slinek se chladí a semílá s dalšími složkami na výsledný cement, který se ukládá do sil. Expeduje se jako balený, nebo volně ložený. [5]



**Obr 2:** Schéma suché výroby cementu [18]

## Těžba

Těžba probíhá v povrchových lomech. Měkké hlíny se těží převážně rypadly, vápence a zpevněné zemin clonovými odstřely (rovnoměrná velikost). Lomy jsou zpravidla jedno až třítážové. Je snaha o co nejrovnoměrňjší zrnitost rubaniny (pro usnadnění pozdějších úprav), která bude mít vhodné chemické složení a co největší homogenitu. [5]

## Drcení

K primárnímu drcení se surovina dopravuje převážně dumpery (méně často lanovkami či kolejovou dopravou). Jako primární drtiče se používají pouze čelistové. Jejich výhodou je jednoduchost, dlouhá životnost a malé opotřebení částí. Drtiče mají výstupní frakci 100 mm (200 mm).

Od primárního drtiče k sekundárnímu drcení se surovina dostane pásovým dopravníkem. Jako sekundární drtiče jsou používány kuželové, kladivové, odrazové a nejpoužívanější – kladivoodrazové.

Takto podrcená surovina je opět pásovým dopravníkem přemístěna na předhomogenizační skládku, kde se halduje. [4]

## **Mletí**

Suroviny se v kontrolovaných poměrech melou a mísí tak, aby výsledná směs byla homogenní s požadovaným chemickým složením. Surovinová směs se v mlýnu i suší, přičemž se využívají hlavně výstupní plyny z pece a odpadní vzduch z chladiče. Dnes je téměř výhradně používán kulový (trubnatý) mlýn. Čistota a velikost částic jsou stěžejní pro následný proces výpalu. Z mlýna je surovina pneumaticky dopravena do vzduchového třídíče, který nevyhovující velikosti vrací zpět do mlýna na domletí. Nejúčinnější jsou rotační klecové třídíče. Mletí a drcení je po výpalu energeticky nejnáročnější položka výroby cementu. [6]

## **Homogenizace**

Před vstupem do pece musí surovinová moučka být dále homogenizována. To se děje v homogenizačních silech, kam se surovina dostala ze mlýna pneumatickou dopravou. Dnem sil se přivádí jemně rozptýlený tlakový vzduch, který zajišťuje čerení i homogenizaci. [4]

## **Výpal**

Nejdůležitější a energeticky nejnáročnější část procesu. Má zásadní vliv na kvalitu konečného produktu. Při výpalu slinku se surovinová moučka přivádí do systému pece, kde se vysušuje, předehřívá, kalcinuje, slinuje a nakonec chladí. U různých typů pecí jsou jednotlivé fáze zajištěny různými technologiemi.

## **Palivo**

Při vytápění cementářských pecí jsou používány především tři druhy paliv:

- ❖ Práškové uhlí a petrolkoks
- ❖ Topný olej
- ❖ Zemní plyn

Hlavními složkami popelovin těchto paliv jsou sloučeniny oxidu hlinitého a oxidu křemičitého, které vstupují do slinku. To je nutno brát v potaz při návrhu surovinové moučky.

V současnosti je snaha o využití odpadních surovin jako paliva, což má dobrý vliv nejen na životní prostředí, ale i na ekonomickou stránku výroby cementu. Mohou být páleny i nebezpečné odpady, které obsahují zejména těžké kovy, halogeny, síru a chlór a to díky vysoké pálicí teplotě (2100°C) a dostatečnému času v pásnu s teplotou nad 1200°C. Tím dojde ke zničení škodlivých látek, které by se uvolnily do ovzduší. Nejčastěji se takto

likvidují použité pneumatiky, guma, starý papír, plasty, použité oleje, rostlinné zbytky, komunální odpad atd. [6]

**Tab. 2:** Používaná alternativní paliva v našich cementárnách [7]

Společnost	Závod	Spalovaný odpad
Českomoravský cement, a.s.	Radotín	Masokostní moučka (MKM), tuhá alternativní paliva (TAP), mazací tuky, řezné emulze, izolační a teplotonosné oleje, filtrační textilie, zemina znečištěná ropnými látkami
Českomoravský cement, a.s.	Mokrá	Hořlavé kapalné odpady, regenerované aditivní oleje, tuhá paliva z destilace ropy, pneumatiky, TAP
Lafarge Cement, a.s.	Čížkovice	MKM, kafilérní tuk, KORMUL, TAP, tuhá topná směs (plast, pryž, textil, dřevo, papír), lipix, upotřebené oleje s PCB, vlastní odpady, pneumatiky
Cement Hranice, a.s.	Hranice	PALOZO (dřevo, plasty, textil, papír, pneu, pryž)
Holcim (Česko), a.s.	Prachovice	TAP

### **Pecní systém**

Výpal cementářského slínku lze provádět v šachtových nebo rotačních pecích. Ovšem všechny velké závody používají modernější rotační pece. Za nejmodernější vypalovací techniku se považuje krátká rotační pec se suchým výrobním způsobem, s vícestupňovým výměníkem a předkalcinátorem.

#### *Šachtová pec*

Dosahují výšky 8 až 10 metrů a průměr válce 2,5 – 3 metry. Surovinu je nutno do pece dodávat granulovanou. Slínek se odebírá ze spodní části pece. Pece mají malý výkon (cca do 300 tun za 24 hodin) a výsledný produkt není tak jakostní a stejnorodý jako u pecí rotačních. [5]

#### *Dlouhá rotační pec*

Má délku až 200 metrů. Používá se především pro mokrý způsob výroby. Má velmi vysokou spotřebu tepla. Dlouhé rotační pece jsou konstruovány k vysušování, předehřívání, kalcinaci a slinování, takže musí být připojen pouze systém dávkování a chlazení. Produkce těchto pecí je 3600t/den. [6]

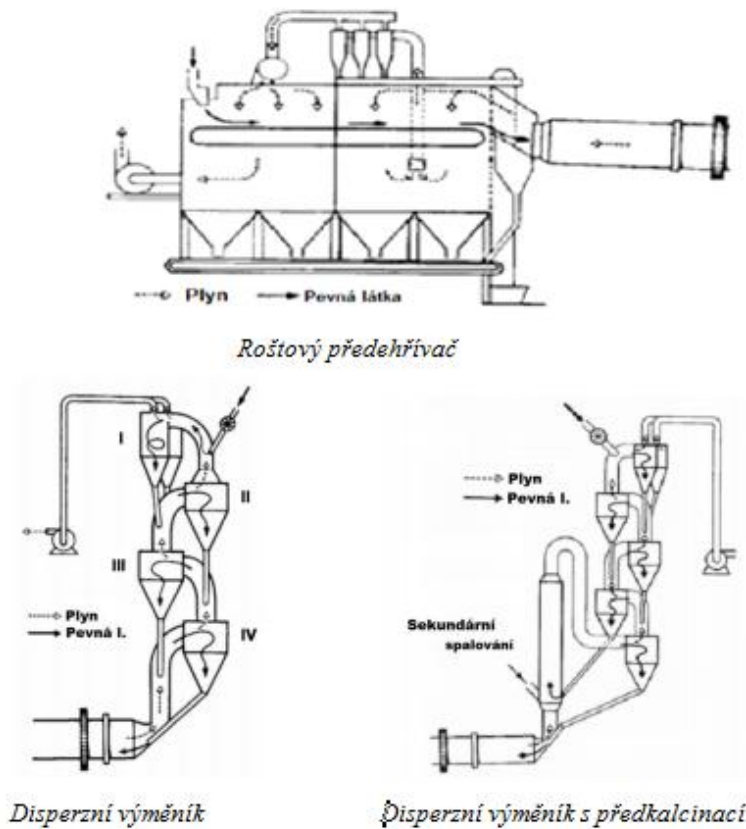
### *Krátká rotační pec*

Předehřev a chlazení bylo umístěno mimo vlastní těleso pece, což umožnilo její zkrácení. Rotační pec se sestává z ocelové roury s poměrem délky k průměru mezi 10:1 a 17:1. Roura má spád 2,5 až 4,5 % a pohon pecí otáčí kolem její osy při 0,5 až 5,0 otáčkách za minutu. Existují dva typy předehříváčů: roštové předehříváče a disperzní výměníky tepla.

Roštové výměníky jsou tvořeny dvěma komorami s posuvným roštem kam se surovina přivádí ve formě granulí. V první komoře se dosahuje teplot až 1100°C v druhé do 300°C.

Disperzní výměníky jsou nejčastěji soustava cyklonů (4-6 stupňů) uspořádaných jeden nad druhým do věže 50-120 metrů vysoké. Surovinová moučka se suší ve vznosu spalinami.

Předkalcinační technika je dostupná pro průmyslové odvětví výroby cementu asi od roku 1970. K primárnímu spalování paliva dochází v pálicí zóně pece. Sekundární spalování probíhá ve zvláštní spalovací komoře mezi rotační pecí a výměníkem. V předkalcinační peci se může spálit až do 65 % celkového množství paliva. Lze dosáhnout úrovně kalcinace hodně nad 90 %. Horký vzduch se ke spalování v kalcinátoru vede od chladiče. Materiál opouští kalcinátor asi při 870 °C. [6]



**Obr. 3:** Typy výměníků tepla [6]

### Chlazení

Chlazení slínku má rozhodující vliv na provoz a hospodárnost výroby. Chladič má dva úkoly: rekuperovat z horkého slínku co nejvíce tepla za účelem jeho vrácení do výrobního procesu a snižovat teplotu slínku na úroveň vhodnou pro následující zařízení. V zásadě se chladiče dělí na rotační (stejný princip jak rotační pec, ale opačná výměna tepla) a roštové (vzduch proudí směrem nahoru přes vrstvu slínku spočívající na roštu). Po zchlazení se slínek nechá odležet v sílech nebo na haldách v hale. [6]

### Mletí cementu

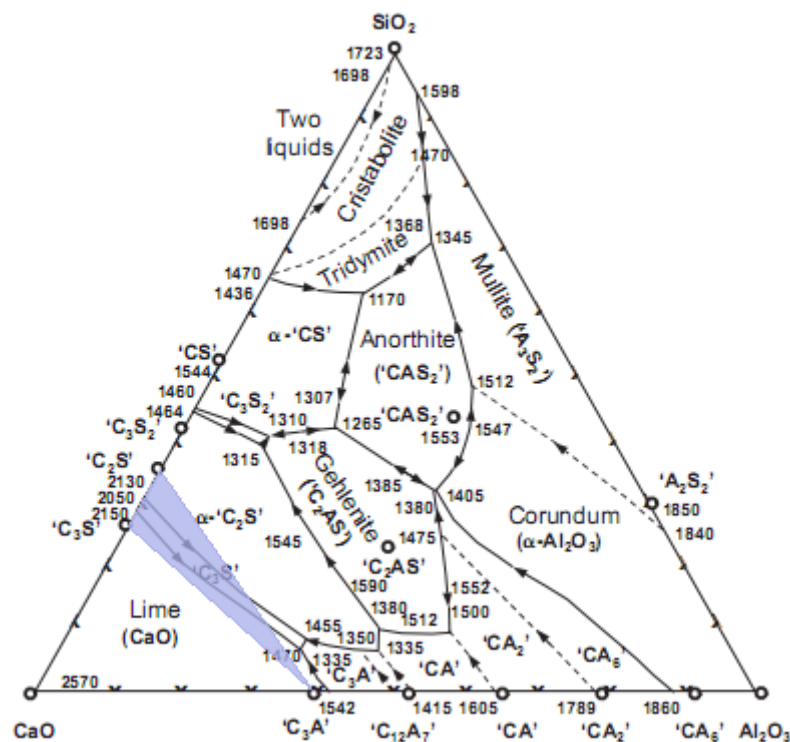
Portlandský cement se vyrábí současným mletím cementového slínku a síranů, jako je sádrovec a anhydrid. U směsných cementů existují další složky, jako je granulovaná vysokopeční struska, popílek, přírodní nebo umělé pucolány, vápenec nebo inertní plniva. Ty mohou být mlety současně se slínkem nebo může být potřeba mlít je a sušit odděleně. Většina mlýnů je kulových a pracuje v uzavřeném cyklu, to znamená, že mohou oddělovat cement s požadovanou jemností od mletého materiálu a vracet hrubý materiál do mlýna. [6]

## Skladování, balení a expedice

K dopravě cementu do skladovacích sil se používá jak pneumatických, tak mechanických dopravníkových systémů. Nejčastěji používaným dopravníkovým systémem je kombinace vzdušného žlabu nebo šnekových dopravníků s řetězovým korečkovým elevátorem. Cement se ze sil přepravuje silničními nebo železničními cisternami jako volně ložený nebo do pytlovacího balícího procesu. [6]

### 1.5. Návrh složení surovin pro výrobu portlandského cementu

Hlavní snahou při sestavování správné cementářské suroviny je plné zreagování přítomného CaO na vhodné slinkové minerály. Těmi jsou Alit ( $C_3S$ ), Belit ( $C_2S$ ), Trikalciualuminát ( $C_3A$ ) a Brownmillerit ( $C_4AF$ ) popřípadě další, podle druhu vyráběného slínku. Pro sestavení optimální směsi se užívá takzvaných modulů, což jsou empiricky stanovená pravidla. Pomocí nich je možno řídit složení suroviny a chemickou a fázovou skladbu slínku. [4]



Obr. 4: Ternární fázový diagram oblasti existence slinkových minerálů [8]

### Hydraulický modul

Je to procentuální poměr mezi CaO a součtem hydraulických oxidů:

$$M_H = \frac{CaO}{SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Tento modul kolísá v rozmezí 1,7 – 2,4. Cementy s vyšším hydraulickým modulem se vyznačují větším hydratačním teplem, většími počátečními pevnostmi, ale menší odolností proti agresivním látkám a je nutné je vypalovat na vyšší teplotu. Je to způsobené větším obsahem C<sub>3</sub>S a C<sub>3</sub>A. [5]

### Silikátový modul

Je dán vztahem:

$$M_S = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

Pohybuje se v rozmezí 1,7 – 2,7. S rostoucím modulem roste i teplota výpalu a cementy pomaleji tuhnou a tvrdnou, ale mají lepší chemickou odolnost. [5]

### Hlinitanový modul

$$M_A = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

Hodnota hlinitanového modulu by se měla pohybovat v rozmezí 1,5 – 2,5. Se zvyšující se hodnotou se zvyšuje počáteční pevnost, zrychluje se tuhnutí, zvětšuje se hydratační teplo a smrštění, zmenšuje se jejich chemická odolnost. Je to dáno stoupajícím obsahem C<sub>3</sub>A. Když je hodnota  $M_A \geq 8$ , jedná se o bílý cement. Naopak, je-li hodnota  $M_A \leq 0,64$ , jsou cementy vysoce chemicky odolné (tzv. Ferrarické cementy). [5]

### Kalorický modul

$$M_{CAL} = \frac{C_3S + C_3A}{C_2S + C_4AF}$$

Dosahuje hodnot 0,3 – 1,8. Jde o podíl minerálů s vysokým hydratačním teplem ku minerálům s nižším hydratačním teplem. S rostoucím  $M_{CAL}$  klesá chemická odolnost. [4]

### Modul agresivity

$$M_{AG} = \frac{SiO_2 + Fe_2O_3}{CaO + Al_2O_3 + MgO}$$

Hodnota by měla být vyšší než 0,3. Se zvyšujícím se modulem se zvyšuje i chemická odolnost cementu. [4]

### Stupeň sycení vápnem podle Lea a Parkera

$$S_{SLP} = \frac{100 CaO}{2,8 SiO_2 + 1,18 Al_2O_3 + 0,65 Fe_2O_3}$$

Jedná se o poměr skutečně obsaženého CaO ve směsi k jeho teoretickému množství potřebnému k úplnému zreagování s hydraulickými oxidy. Stupeň sycení se pohybuje většinou 92 % a výše. Při vyšších hodnotách cementy vykazují větší počáteční pevnosti z důvodu vysokého obsahu  $C_3A$  a  $C_3S$ . [4] [5]

## 1.6. Mineralogické složení slínku a jejich hydratace

Skládá ze čtyř hlavních slinkových minerálů, ze skelné fáze a z vedlejších složek.

### 1.6.1. Trikalciumsilikát – Alit ( $3CaO \cdot SiO_2$ ; $C_3S$ )

Jedná se o nejdůležitější slinkový minerál. Vyznačuje se vysokou reaktivností, která způsobuje vysoké pevnosti jak počáteční, tak konečné, vysokou hydratační rychlost a vývin hydratačního tepla  $500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Existenční oblast je mezi 1250 až 1900°C. Ve slínku se nachází v nestabilním podchlazeném stavu, to znamená, že chlazení musí probíhat dostatečně rychle, aby zůstal zachován. Obsah alitu ve slínku se udává okolo 65%. Je známo sedm polymorfních modifikací, ale ve slínku se nachází pouze dvě (monoklinické). Může se v něm nacházet i menší množství  $C_3A$ ,  $MgO$ ,  $FeO$ ,  $MnO$ ,  $Fe_2O_3$  a  $P_2O_5$ .

Hydratace je popisována rovnicí:



Zkráceně:



[1]

### 1.6.2. Dikalciumsilikát – Belit ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ; $\text{C}_2\text{S}$ )

Je druhý nejčastější minerál ve slínku, jeho obsah se běžně pohybuje okolo 20 %. Dříve byl jeho obsah vyšší z důvodů špatného chlazení (až 60 %). Má nízký vývin hydratačního tepla, které se udává  $250 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , což je vhodné pro betonáž masivních konstrukcí. Belit nabývá pevností pozvolněji než alit, ale konečné pevnosti jsou srovnatelné. Je chemicky odolnější, protože při hydrataci se uvolňuje pouze jeden mol portlanditu  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Může se vyskytovat ve všech čtyřech modifikacích –  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $\beta$  a  $\gamma$ . Modifikace  $\alpha'$  je metastabilní. V běžně vyráběném slínku se nachází modifikace  $\beta - \text{C}_2\text{S}$ . Při nesprávně vedeném chlazení přejde za teploty  $675^\circ\text{C}$   $\beta - \text{C}_2\text{S}$  na  $\gamma - \text{C}_2\text{S}$ , což je doprovázeno zvětšením objemu o 10 %, což způsobí rozpad slínku. Modifikace  $\gamma$  postrádá hydraulické schopnosti.

Rovnice hydratace:



Zkráceně:

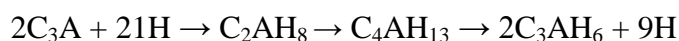
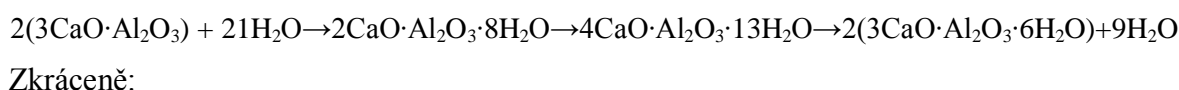


[1]

### 1.6.3. Trikalciualuminát ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{C}_3\text{A}$ )

Je součástí tzv. tmavé mezerní hmoty (společně s  $\text{MgO}$  a skelnou fází), ve slínku se nachází v množství 8 – 10 % a je znečištěn sodnou alkálií. Ze všech slinkových minerálů má nejvyšší vývin hydratačního tepla, a to  $860 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Nedává vysoké konečné pevnosti a velmi rychle tuhne. Proto se jako regulátor tuhnutí přidává sádrovec v množství 5 – 6 %. Ten způsobí na povrchu zrn trikalciualuminátu tvorbu primárního ettringitu ( $\text{C}_3\text{A}\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), čímž omezí transport vody k povrchu zrna a zpomalí tím hydrataci. V bílých cementech nahrazuje brownmillerit. Je přímou příčinou síranové koroze.

Rovnice hydratace bez přítomnosti sádrovce ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) je popisována takto:



Hydratace za přítomnosti sádrovce:

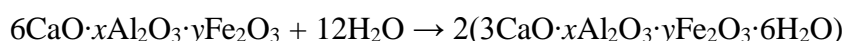


[1]

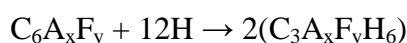
#### 1.6.4. Tetrakalciumaluminátferit – Brownmillerit ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ , $\text{C}_4\text{AF}$ )

Nachází se ve slínku v množství zhruba 10 %. Je součástí světlé mezerní hmoty. Jde o tuhý roztok a udávaný vzorec je průměrná hodnota, jelikož složení se pohybuje mezi  $\text{CaO} - \text{C}_{12}\text{A}_7 - \text{C}_2\text{F}$ . Jeho hydratační teplo je  $420 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  a dosahuje nízkých pevností. Brownmillerit má nejvyšší chemickou odolnost ze slinkových minerálů, a proto je snaha o zvýšení jeho obsahu v síranovzdušných cementech na úkor trikalciualuminátu.

Rovnice hydratace:



Zkráceně:



[1]

#### 1.6.5. Skelná fáze

Je součástí tmavé mezerní hmoty. Jedná se o ztuhlou taveninu, která nestihla zkrystalizovat při chlazení. Její množství ve slínku se pohybuje od 2 % do 25 %. Zlepšuje chemickou odolnost a pevnost cementu, má malé smrštění a značnou vaznost. Zhoršuje melitelnost slínku. [1]

#### 1.6.6. Vedlejší složky

Jedná se především o volné  $\text{CaO}$  a  $\text{MgO}$ , alkálie. Dále  $\text{P}_2\text{O}_5$  a  $\text{Cl}^-$ . Obsah těchto složek musí být limitován, protože způsobují hydratační a pohydratační změny, či problémy při výpalu.

## **Volné CaO**

V dobře vypáleném slínku se jeho množství pohybuje do 1 % a nezpůsobuje žádné změny. Při vyšším obsahu dochází k vápenatému rozpínání. Příčinou vzniku je nedopal, nedokonalé chlazení nebo přílišný stupeň sycení. [1]

## **Volné MgO**

Může vykrystalizovat ve formě minerálu periklas, který reaguje s vodou za vzniku burcitu  $Mg(OH)_2$ . Tato opožděná hydratace je podstatou hořečnatého rozpínání. [9]

## **Alkálie**

Jsou zastoupeny jako  $Na_2O$  a  $K_2O$  z živíc a slíd. Při výpalu tvoří přednostně síranové sloučeniny -  $K_2SO_4$  (arkanit),  $Na_2SO_4$  (thénardit). V průběhu výpalu mohou zapříčinit tvorbu pecních nálepků. Cementy s vyšším obsahem alkálií vykazují vyšší počáteční pevnosti, jsou náchylnější k tvorbě výkvětů a za přítomnosti amorfního  $SiO_2$  v kamenivů způsobí alkálievé rozpínání. [9]

## **$P_2O_5$**

V obsahu do 1 % působí pozitivně na výpal slínku (zintenzivňuje výpal), ve vyšším množství způsobuje zpomalení hydratačního procesu z důvodu tvorby těžce rozpustného fosforečnanu vápenatého na povrchu zrn cementu. [9]

## **Cl<sup>-</sup>**

Dostávají se do slínku v důsledku používání sekundárních paliv (pneumatik). Způsobují tvorbu pecních nálepků. [9]

## **1.7. Vznik portlandského slínku**

Vznik slínkových minerálů je složitý fyzikálně-chemický proces při výpalu v peci. Stádia výpalu lze rozdělit na pět částí.

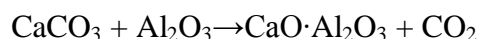
### **1.7.1. Předehřívací stádium (do 750 °C)**

Při teplotách do 200 (300) °C dochází k dehydrataci suroviny. Nejprve odchází volná voda a následně i hydrátová voda. V rozmezí teplot 300 – 400 °C je nejintenzivnější dehydroxylace, tedy odpařování vody mřížkové ( $OH^-$ ) z jílových minerálů. Po dosažení teploty 573 °C se přemění křemen z modifikace  $\beta - SiO_2$  na  $\alpha - SiO_2$ .  $CaCO_3$  se začíná

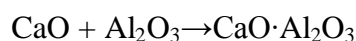
rozkládat při 600°C. Na konec lze v tomto stádiu pozorovat počátek vzniku nízkovápenatých minerálů CA a C<sub>2</sub>F, které se tvoří substitučně. [1]

### 1.7.2. Kalcinační stádium (750 – 1250 °C)

Rozklad vápence se zrychluje se vzrůstající teplotou. Pokračuje tvorba nízkovápenatých minerálů CA a C<sub>2</sub>F substitučně:



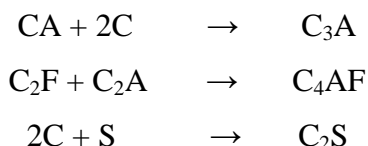
Po rozkladu  $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$  probíhá tvorba adičně:



Ke konci stádia již probíhá vznik vysokovápenatých minerálů trikalciualuminát C<sub>3</sub>A, tetrakalciualuminátferit C<sub>4</sub>AF a dikalciumsilikát C<sub>2</sub>S.

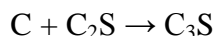
### 1.7.3. Stádium suchého slinování (1250 – 1350 °C)

Toto stádium se vyznačuje exotermickou krystalizací, přičemž uvolněné teplo je asi 500 kJ·kg<sup>-1</sup>. Probíhá intenzivní tvorba C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF a C<sub>2</sub>S adičně podle rovnic:



### 1.7.4. Stádium taveninového slinování (1350 – 1450 °C)

V tomto stádiu dochází k tvorbě taveniny. Jako první se taví alumináty a ferity, dále zbylý CaO a MgO a jako poslední belit. V této fázi probíhá reakce mezi CaO a C<sub>2</sub>S za vzniku alitu podle rovnice:



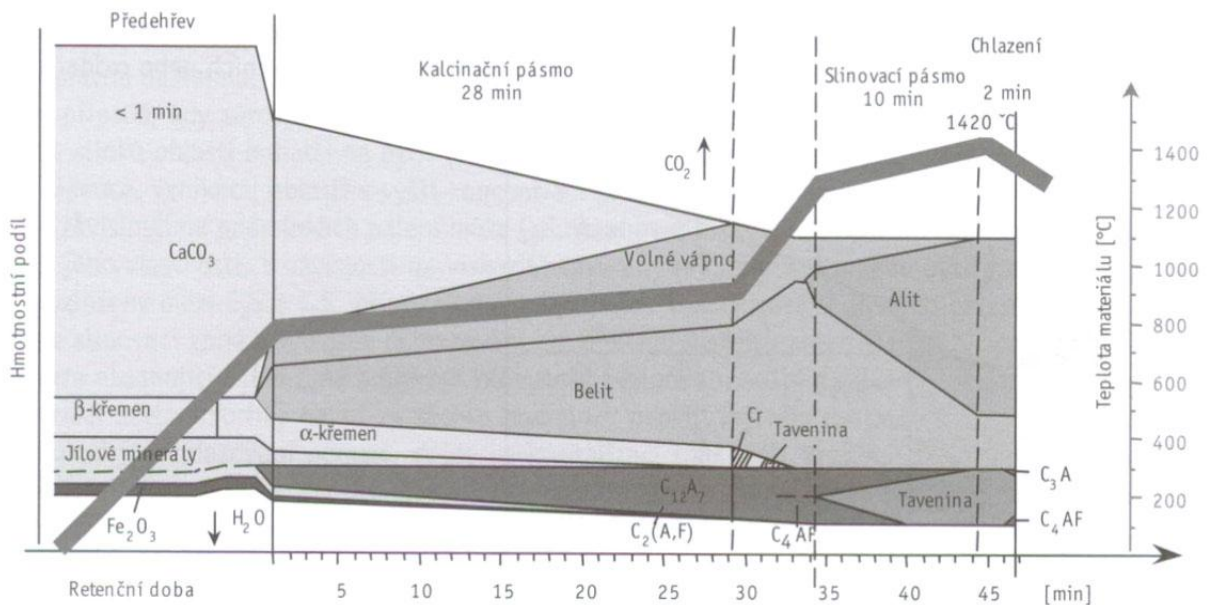
Alit je v tavenině téměř nerozpustný, tudíž se vyskytuje ve formě nestabilních krystalků obsahujících malé množství Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a MgO. Ideální obsah taveniny je 12 – 20 %.

### 1.7.5. Chladicí stádium

Proces chlazení je velmi důležitou fází výroby slínku zejména pro zachování  $C_3S$  a  $\beta - C_2S$ . Intenzivní chlazení se vyžaduje zejména při teplotě  $1250\text{ }^\circ\text{C}$ , kdy by při pomalém chlazení  $C_3S$  přešel na  $C_2S$  a volné  $\text{CaO}$ .

Při teplotě  $675\text{ }^\circ\text{C}$  je taktéž nutno rychle chladit z důvodu modifikační přeměny  $\beta - C_2S$  na  $\gamma - C_2S$ , která nemá prakticky žádné hydraulické vlastnosti a navíc přeměnu doprovází nárůst objemu.

Slínky vystavené prudkému zchlazení se v porovnání s pomalu chlazenými snadněji melou a cementy z nich vykazují rychlejší nárůst pevností, menší smrštění a vyšší odolnost vůči působení síranových vod. [1]



**Obr. 5:** Vznik základních slínkových minerálů v závislosti na době a teplotě výpalu [10]

## 2. Portlandské cement směsné

Obsahují více než jednu hlavní složkou, kterou je slínek. Jejich účel je zejména snížit obsah slínku v cementu, dále využít jejich vlastností a v neposlední řadě snížení emisí  $\text{CO}_2$ . Dle jejich povahy je lze rozdělit do tří kategorií:

### ❖ **Hydraulicky aktivní**

Mají vysoký podíl amorfního  $\text{SiO}_2$ , díky čemuž jsou schopny tvořit za přítomnosti vody a  $\text{CaO}$  sloučeniny podobné hydratačním produktům portlandského cementu. Mohou být přírodní, sopečného původu (tufy, pemzy) či vzniklé sedimentací (křemelina, křemičité slíny), nebo umělé (elektrárenské popílký, Si – úlety, metakaolin).

### ❖ **Latentně hydraulické**

Samy o sobě nemají hydraulické schopnosti. Pro dosažení této vlastnosti je třeba přidat vhodnou budící látku. Zástupcem této skupiny je vysokopecní granulovaná struska.

### ❖ **Inertní**

Tyto látky plní zejména funkci fillerů. Mohou však svými vlastnostmi zlepšovat i vlastnosti cementů. V současnosti jde hlavně o jemně mletý vápenec, či odprašky jakož to alternativní látka. [11]

Portlandské cementy směsné obsahující kromě slínku jedinou další hlavní složku a nesou označení CEM II dle *ČSN EN 197-1*. Označení CEM II-M nese cement s kombinací hlavních složek.

**Tab. 3: Přehled portlandských cementů směsných.**

Druh CEM II	Označení	Obsah složek <sup>a)</sup> [%hm]	Druh složek: označení
Portlandský struskový cement	CEM II/A-S	6 - 20	kranulovaná vysokopecní struska: S
	CEM II/B-S	21 - 35	
Portlandský cement s křemičitým úletem	CEM II/A-D	6 - 20	křemičitý úlet: D
Portlandský pucolánový cement	CEM II/A-P	6 - 20	přírodní pucolán: P
	CEM II/B-P	21 - 35	
	CEM II/A-Q	6 - 20	kalcinovaný pucolán: Q
	CEM II/B-Q	21 - 35	
Portlandský popílkový cement	CEM II/A-V	6 - 20	křemičité popílký: V
	CEM II/B-V	21 - 35	
	CEM II/A-W	6 - 20	vápenaté popílký: W
	CEM II/B-W	21 - 35	
Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	6 - 20	kalcinovaná břidlice: T
	CEM II/B-T	21 - 35	
Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	6 - 20	vápenec s $\text{TOC} < 0,5$ : L
	CEM II/B-L	21 - 35	
	CEM II/A-LL	6 - 20	vápenec s $\text{TOC} > 0,2$ : LL
	CEM II/B-LL	21 - 35	
Portlandský směsný cement <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	6 - 20	$S + D^{b)} + P + Q + V + W + T + L + LL$
	CEM II/B-M	21 - 35	

a) Obsah jiných hlavních složek, než je portlandský slínek  
b) Podíl 6 – 10 % hm

Produkce směsných cementů roste. Tento jev je způsoben mnoha aspekty. Jako nejvýznamnější můžeme uvést rostoucí ceny energií, a tudíž snahu snížit podíl slínku v cementech. Z ekologického hlediska jde především o snížení produkce CO<sub>2</sub>, což je opět spojeno se snížením obsahu slínku a také využití dalších odpadových surovin. Dalším důvodem mohou být vhodné vlastnosti směsných cementu, které se dají využít pro konkrétní stavební účely. V současnosti nabývají na významu především směsné portlandské směsné cementy. [12]

## 2.1. Hlavní složky portlandských cementů směsných

V českých zemích se jedná především o strusku (S), vápenec (L, LL) a popílek (V, W). Dále jsou to křemičité úlety (D), přírodní pucolány (P, Q) a kalcinovaná břidlice (T).

### 2.1.1. Struska

V cementářství nachází uplatnění pouze vysokopecní struska vznikající při výrobě surového železa. Prudkým ochlazením struskové taveniny dochází k zatuhnutí ve skelném stavu, což způsobuje její latentně hydraulické vlastnosti. Struska se mele na specifický měrný povrch, který co nejvíce odpovídá měrnému povrchu cementu (300 – 400 m<sup>2</sup>·kg<sup>-1</sup>). Požadavky na vysokopecní strusky do cementů jsou definovány v normě ČSN EN 197-1.

V portlandských cementech se nachází v množství 6 % až 35 %. Podle obsahu má pozitivní vliv na nepropustnost a tím i trvanlivost betonu. Odolnost vůči síranům a chloridům je rovněž vyšší, ovšem proti karbonatům nižší.

### Chemické složení

Složení strusky značně kolísá v závislosti na složení rudy, vyráběného železa, použitého paliva aj. Převážně se však jedná o CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a MgO.

**Tab. 4:** Typické chemické složení vysokopecní strusky

Složka	Obsah [%]
CaO	42
SiO <sub>2</sub>	36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11,5
MgO	6 - 12
MnO	0,75
FeO	0,4
S <sup>2-</sup>	1,3
TiO <sub>2</sub>	1,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,1

Z chemického hlediska je důležitý index bazicity, což je poměr mezi zásaditými a kyselými oxidy. Pro cementářské účely se spíše hodí zásadité strusky ( $I_B > 1$ ) [13]

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

Rovněž se musí zohlednit vliv CaS a MnO, jenž popisuje struskový index navržený dle Keila:

$$I_F = \frac{CaO + CaS + 0,5MgO + Al_2O_3}{SiO_2 + MnO}$$

Do cementu je nevhodná struska s  $I_F$  nižším než 1. Struska s rozmezím hodnot 1 – 1,5 je průměrná (většina strusek v ČR).  $I_F = 1,5 – 1,9$  je dobrá struska a nad tuto hodnotu je nejkvalitnější struska. [4]

### **Buzení vysokopecní strusky**

Hlavním nositelem hydraulických vlastností je skelná fáze, která zajišťuje dostatečně velkou vnitřní energii a tudíž i reaktivitu. Při kontaktu s vodou dochází na povrchu skel k tvorbě křemičitého gelu, jenž brání dalšímu pronikání vody do jádra a tím zabraňuje hydrataci. Z tohoto důvodu je nutno strusku tzv. aktivovat, což lze dvěma způsoby:

#### **❖ Zásadité buzení**

Přídavkem  $Ca(OH)_2$  nebo NaOH se vytvoří roztok s dostatečnou koncentrací hydroxylových iontů, který způsobí rozpad skla a umožní tím krystalizaci hydrosilikátů a hydroaluminátů.

#### **❖ Síranové buzení**

Aktivátorem je sádrovec, který reaguje s hlinitanovými složkami roztoku za vzniku ettringitu, který se při přebytku vápna částečně přemění na monosulfát. [1]

### **2.1.2. Vápenc**

Je-li v cementu přítomen do 5 %, je pouze vedlejší složka. V portlandských směsných cementech může jeho zastoupení být až 35 %. Cementy s vápencem se dostávají

do popředí zejména kvůli nízké ceně vápence a také kvůli téměř totožným vlastnostem s běžným portlandským cementem.

Vápenec se skládá z kalcitu, dále pak z podílů křemene, dolomitu a jílových minerálů. Požadavky na vápenec jsou definovány v ČSN EN 197-1 následovně:

- ❖ Obsah  $\text{CaCO}_3$ , vypočítaný z obsahu  $\text{CaO}$  musí být nejméně 75 % hmotnosti
- ❖ Obsah jílových podílů nesmí překročit hranici 1,20 g/100 g. Musí být pomlet na jemnost  $5000 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
- ❖ Obsah organického uhlíku (TOC)
  - LL: obsah TOC nesmí být větší než 0,2 % hmotnosti
  - L: obsah TOC nesmí být větší než 0,5 % hmotnosti

[3]

### 2.1.3. Popílky

Popílek je tuhý zbytek získávaný elektrostatickým nebo mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů. Složení a kvalita závisí na druhu použitého paliva. Jsou dvě základní metody spalování: klasické vysokoteplotní spalování a modernější fluidní spalování, které spaluje palivo ve vznosu.

V ČR se pálí především hnědé uhlí. Ročně vznikne přibližně 10 milionů tun minerálních zbytků. Uplatnění nachází pouze 10 % - 15 %. [14]

Popílky můžeme rozdělit na:

- ❖ **Vysokoteplotní**
  - křemičité (obsah aktivního  $\text{CaO}$  do 10 %)
  - vápenaté (obsah aktivního  $\text{CaO}$  nad 10 %)
- ❖ **Fluidní**
  - ložové
  - úletové

Ztráta žiháním popílku nesmí být po hodině žihání větší než 5 %. Popílky se ztrátou žihání 5 % - 7 % se mohou používat za předpokladu, jsou-li splněny požadavky na trvanlivost.

### Křemičité popílky (V)

Velmi jemný prášek s kulovými částicemi, které mají pucolánové vlastnosti. Skládá se převážně aktivního oxidu křemičitého a hlinitého, dále pak z oxidu železitého a jiných

sloučenin. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být větší než 25 % hmotnosti. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být nižší než 10 % hmotnosti a obsah volného oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1 % hmotnosti.

### **Vápenaté popílky (W)**

Jemný prášek s hydraulickými vlastnostmi. Skládá zejména z aktivního oxidu vápenatého, aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého, ve zbytku je pak obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Vápenatý popílek obsahující aktivní oxid vápenatý mezi 10 % a 15 % hmotnosti musí obsahovat nejméně 25 % hmotnosti aktivního oxidu křemičitého. [3]

### **2.1.4. Křemičité úlety**

Křemičité úlety vznikají jako odpad při výrobě krystalického křemíku. Nyní se ovšem vyrábějí i účelně. Mají pucolánové vlastnosti a veliký měrný povrch. Obsahují 85 % – 98 % amorfního  $\text{SiO}_2$  ve tvaru kulatých a měrný povrchu 15 000 až 25 000  $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ . Ztráta žiháním po hodině žihání nesmí být vyšší než 4 % hmotnosti. [3]

### **2.1.5. Přírodní pucolány**

Jsou křemičité nebo hlinito-křemičité povahy (viz výše). Dělíme je na:

#### **❖ Přírodní pucolány (P)**

Jsou většinou vulkanického původu anebo sedimentární horniny s vhodným chemickým a mineralogickým složením

#### **❖ Přírodní kalcinované pucolány (Q)**

Jsou látky vulkanického původu, hlíny, břidlice, nebo sedimentované horniny, aktivované tepelnou úpravou. [3]

### **2.1.6. Kalcinovaná břidlice**

Kalcinované břidlice se vyrábí ve speciálních pecích při teplotě přibližně 800 °C. Podle složení materiálu a podle výrobního procesu obsahuje kalcinovaná břidlice slínkové fáze, zvláště dikalciumsilikát a monokalciumaluminát. Dále obsahuje oxid křemičitý malé množství volného oxidu vápna a síranu vápenatého. Kalcinovaná břidlice má v jemně pomletém stavu výrazné hydraulické vlastnosti. Musí vykazovat pevnost v tlaku po 28 dnech alespoň 25 MPa. [3]

## **2.2. Portlandský směsný cement (CEM II-M)**

Portlandský směsný cementu umožňuje díky kombinování několika hlavních složek vyžít výhody (i nevýhody) jednotlivých hlavních složek. Takto lze docílit vytvoření stabilního materiálového systému. Je ovšem potřeba přihlížet na možnosti výrobního procesu. Kromě snížení emisí CO<sub>2</sub> a šetření přírodních zdrojů lze tak optimalizovat i vliv cementů na vlastnosti z nich vyráběných betonů.

### **2.2.1. Vlastnosti**

Průkazní zkoušky provedl Výzkumný ústav cementářského průmyslu za spolupráce s FEhS (Institut stavebních materiálů). Cílem těchto výzkumů bylo poskytnout výsledky pro úpravu německých normativních předpisů. Jako nejefektivnější se ukázala kombinace granulované vysokopecní strusky a vápence. [12]

#### **Pórovitost a rozložení velikosti pórů**

Škodlivé látky pronikají do materiálu na bázi cementu pórovinovým systémem. Nižší relativní pórovitost vykazují cementy s vyšším obsahem strusky než vápence. [12]

#### **Karbonatace**

Rychlost a hloubka karbonatace závisí hlavně na vodním součiniteli a na obsahu slínku. Proto je v laboratorních podmínkách hloubka karbonatace větší u cementů s granulovanou vysokopecní struskou než u portlandského cementu. I se zvyšujícím se obsahem vápence roste hloubka karbonatace. Při kombinaci vápence (10 % až 20 %) a granulované vysokopecní strusky (15 % až 25 %) vykazují betony s jednotným obsahem slínku (65 %) určité zvýšení hloubky karbonatace. Podobně jako u cementů s vysokopecní struskou je z hlediska použití v praxi toto zvětšení málo významné. [12]

#### **Odolnost vůči působení chloridů**

Ke značnému nárůstu odolnosti vůči chloridům, tedy ke snížení koeficientu difúze chloridových iontů přispívá použití cementů s obsahem granulované vysokopecní strusky. U portlandských směsných cementů obsahujících vápenec a granulovanou vysokopecní strusku jsou sledované hodnoty na dolní hranici portlandských cementů a portlandských struskových cementů, tedy lepší. [12]

## **Odolnost proti zmrazování a rozmrazování**

Podle zkoušení odolnosti betonů proti zmrazování a rozmrazování testem CIF vyhověly vedle portlandského cementu i cementy CEM II obsahující alespoň 65 % portlandského slínku, vždy spolu s vápencem (až 35 %), případně s vysokopecní granulovanou struskou (až 15 %). [12]

### **3. Cementy speciální**

S přibývajícímí náročnými stavbami vyvstává i požadavek na výrobu cementů se specifickými vlastnostmi. Pro tyto speciální druhy cementů zatím platí pouze podnikové normy. Vyrábí se buď úpravou surovinové směsi na požadované vlastnosti, nebo přidavkem zvláštních přísad při mletí slínku, nebo úpravou jemnosti mletí cementu.

#### **3.1. Silniční cement**

Má vyšší obsah  $C_3S$  a nižší obsah  $C_3A$  což způsobuje nižší vývin hydratačního tepla. Má také co nejmenší obsah volného  $CaO$ . Počátek tuhnutí nesmí nastat dříve než za 90 minut a jemnost mletí je zpravidla do  $350 \text{ m}^2 \cdot \text{Kg}^{-1}$ . U silničních cementů je důležitější spíše pevnost v ohybu. Používá se při stavbě silnic, dálnic letištních a odstavných ploch, velkoplošných garáží atd. [15]

#### **3.2. Síranovzdorný cement**

Odolává agresivnímu prostředí síranových iontů. Pro výrobu se musí upravovat surovina na přesné chemické složení. Vyznačuje se nízkým obsahem  $C_3A$  pod 3,5 %. Používá se pro výrobu betonů dlouhodobě vystavených působení síranů nebo jiných agresivních látek, na kanalizační roury aj. Mohou se vyrábět i armované betony. [15]

#### **3.3. Hydrofobní cement**

Je určený pro výrobu betonů s vysokou odolností proti prosakování vody. Obsahuje 1 % - 1,5 % velmi jemně dispergované bitumenové přísady (silniční dehet). Jsou vhodné pro vodní stavby, nádrže, jímky, stoky, na stavbu ČOV i na betony přicházející do styku s ropnými látkami. [15]

### 3.4. Bílý cement

Na výrobu se používají snadno melitelné vysokoprocentní vápence, nebo křídly vysoké čistoty. Důležité je, aby směs obsahovala naprosté minimum  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , který způsobuje šedé zbarvení. Pálí se při vyšších teplotách. Limitován je i obsah  $\text{SO}_3$  pod 3,5 % a obsah vedlejších přísad pod 20 %. Používá se pro architektonické účely, úpravě vnějších fasád, či k přípravě omítkových směsí. [15]

### 3.5. Hlinitanový cement

Vyrábí se ze směsi vápence a bauxitu (1:1). Hlavními složkami jsou  $\text{Al}_2\text{O}_3$  a  $\text{CaO}$ . Podle obsahu vápna se dělí na vysokovápennaté (nad 40 %) a nízkovápennaté (pod 40 %). Nemusí se tak jemně mlít, protože jsou velmi reaktivní. Mají rychlý nárůst pevnosti a vysoké konečné pevnosti, avšak i velký vývin hydratačního tepla. Životnost se ovšem pohybuje v rozmezí 25 – 35 let, tudíž nesmí být použity ke konstrukčním účelům.

Pro žárovzdorné účely se vyrábí s obsahem  $\text{Al}_2\text{O}_3$  asi 65 % - 85 %. [15]

## 4. Cement pro zdění

Norma *ČSN EN 413-1 Cement pro zdění – část 1: Složení, specifikace a kritéria shody* je definuje jako průmyslově vyráběné jemně mleté hydraulické pojivo, u něhož je dosahováno vývoje pevnosti hlavně přítomností portlandského slínku. Po smíchání jen s pískem a vodou bez přidavku dalších látek poskytuje zpracovatelnou maltu vhodnou k používání pro vnitřní a vnější omítky a pro zdění.

Do těchto cementů lze zakomponovat až 75 % druhotné suroviny. Značí se písmeny MC, rozeznávají se tři pevnostní třídy: 5; 12,5 a 22,5. Písmenem X za pevnostní třídou se značí cementy, do kterých nebyla přidána provzdušňující přísada. [16]

### 4.1. Fyzikální a mechanické vlastnosti

Norma stanovuje následující požadavky:

- ❖ Zbytek na síť 90  $\mu\text{m}$  nesmí být větší než 15 % hmotnosti
- ❖ Počátek doby tuhnutí nesmí nastat dříve než za 60 minut
- ❖ Pokud počátek tuhnutí nastane do šesti hodin, nepožaduje se stanovení konce tuhnutí. V opačném případě nesmí konec tuhnutí nastat později než za 15 hodin

- ❖ Objemová stálost nesmí být větší než 10 mm
- ❖ Na čerstvé maltě se stanovuje penetrace ( $35 \pm 3$  mm). Retence vody a obsah vzduchu v závislosti na druhu cementu.
- ❖ Pevnost v tlaku po 7 a 28 dnech normového zrání

[16]

## 4.2. Zkušební metody

Zkušební metody jsou prováděné podle normy *413-2 Cement pro zdění – Část 2: Zkušební metody*. Níže jsou uvedené podstaty zkoušek.

### 4.2.1. Stanovení hodnoty penetrace

Vlastnosti čerstvé malty určené pro zdění se posuzují na maltě normalizované konzistence. Správná konzistence se stanovuje přístrojem na stanovení penetrace jako referenční metoda. Alternativní metodou je užití střešacího stolku, je však důležité, aby k hodnotě rozlité byla zjištěna ekvivalentní hodnota penetrace při použití stejného druhu cementu.

Ihned po ukončení normalizovaného míchání se naplní nádoba na maltu ve dvou vrstvách. Každá vrstva se zhutní deseti lehkými údery dusadla. Nádoba se umístí pod penetrační váleček, který se uvolní a změří se hloubka penetrace.

Pro maltu normalizované konzistence musí být naměřena hloubka penetrace  $35 \pm 3$  mm. Pokud zkoušená malta nemá normalizovanou konzistenci, musí se připravit směs nová. [17]

### 4.2.2. Stanovení retence vody

Z čerstvé malty normalizované konzistence se odsává voda pomocí filtračních papírů. Retence vody je vyjádřena hmotností vody, která zůstane v maltě po odsání a vyjadřuje se v procentech k původnímu množství vody.

Po zkoušce penetrace se malta promíchá nízkou rychlostí po dobu 15 sekund. Nádoba se zvaží a naplní maltou, uhladí se povrch a opět zvaží. Překryje se bavlněnou gázou, na kterou se umístí osm filtračních papírů. Na papírky se umístí tuhá deska a nádoba se obrátí a zatíží 2 kg závažím. Po  $300 \pm 5$  sekund se sejme závaží a zvaží se hmotnost filtračních papírů. Vypočítaná hodnota retence se uvede s přesností 1 %. [17]

### **4.2.3. Stanovení obsahu vzduchu**

Referenční metodou je metoda tlaková. Obsah vzduchu v čerstvé maltě se stanoví ze zmenšení objemu působením tlaku. Alkoholová metoda je metodou alternativní.

Ihned po ukončení míchání se nádoba na vzorek naplní maltou ve dvou přibližně stejných vrstvách. Poslední vrstva malty musí lehce přesahovat okraj nádoby na vzorek. K odstranění vzduchových bublin se každá vrstva malty rozprostře 10 lehkými údery dusadla, rovnoměrně rozloženými po celém povrchu malty. Přebytečná malta se setře v úrovni okraje nádoby na vzorek.

Stanovení obsahu vzduchu musí být provedeno v době 5 až 10 minut po namíchání malty. Víko se usadí na nádobu a vzduchotěsně se spojí uzavřením svorek. Pomocí stříčky se připouští voda ventilem, až se veškerý vzduch z přístroje vypudí druhým ventilem. Spustí se vzduchové čerpadlo, až ukazatel vzduchu dosáhne počáteční předepsané polohy. Ventily se uzavřou a vyrovnávací ventil se otevře. Po ustálení rafičky se odečte obsah vzduchu. [17]

### **4.3. Cementy pro zdění na trhu**

Na českém trhu je několik druhů cementů pro zdění, které vyrábějí firmy Lafarge, Holcim a Cement Hranice. Vyrábí se ve třídách MC 5 a MC 12,5. Jsou baleny v pytlích po 25 nebo 30 kg a míchají se na staveništi pouze s vodou a pískem. Jsou určeny především na přípravu jádrových omítek vnitřních a vnějších, na přípravu zdicích malt, event. i na přípravu postříku pod omítky. Jsou vyhledávány především v oblastech, kde je levný a snadno dostupný zdroj písku.

## II. Experimentální část

### 1. Cíl práce

Cílem bakalářské práce je vypracování studie, sloužící jako podklad pro pokračování vývoje směsného pojiva na bázi portlandského cementu, normativně označovaného jako cement pro zdění. Technicky lze toto směsné pojivo charakterizovat jako premix pojiv pro ambulantní přípravu maltových a omítkových směsí.

### 2. Metodika

Průmyslově vyráběný premix pojiv lze použít jako pojivový základ pro výrobu malt, omítek a tmelů in situ, ke kterému je podle potřeby stavebníků přidáván jen místně dostupný písek či drcené kamenivo. Co do uživatelské sféry představuje premix vysoce žádanou sortimentní novinku, neboť v současných ne zcela příznivých ekonomických podmínkách slučuje výhody průmyslové výroby pojiv garantovaných vlastností s finanční dostupností místních zdrojů plniva, a umožňuje tak výrazné zvýšení ekonomické efektivity stavby.

V návaznosti na předchozí etapu řešení ÚTHD FAST VUT Brno, jejímž výsledkem byla ověřená koncepce základní surovinové báze a návrh modifikujících přísad, bylo konkrétní náplní bakalářské práce sledování vlivu provzdušňovací přísady a vybraných ztekuovačů na vlastnosti vyvíjeného premixu.

Základní receptura pro přípravu cementového premixu byla převzata z předchozí etapy řešení, kde sestávala z portlandského cementu, jakožto nositele pevnosti, odprašků z výroby stavebního kamene a vápenného hydrátu k zajištění dostatečné plasticity:

Základní vzorek byl navržen takto:

- ❖ 40 % cementu CEM I 42,5 R
- ❖ 55 % odprašků z lomu Předklášteří
- ❖ 5 % vápenného hydrátu

Tento základní vzorek byl v předkládané bakalářské práci modifikován plastifikačními přísadami Melment F10 a Melflux 1641 F v dávkách 0; 0,1 a 0,3% (v případě plastifikátoru Melment byla jednorázově zkoušena i koncentrace 0,6%), a to jednak bez a jednak s 0,1 % provzdušňovací přísady Berolan.

Výsledky byly porovnávány s hodnotami, předepsanými normou ČSN EN 413-1 „Cement pro zdění“.

### 3. Postup práce

Vzorky premixů byly připraveny nadávkováním a společnou homogenizací jednotlivých komponent. Konkrétní složení vzorků je uvedeno v tab. 5.

**Tab. 5:** Složení jednotlivých vzorků cementu

Složka [%]	Označení vzorku											
	1R	2R	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	4B	5B	
CEM I 41,5 R	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Vápenný hydrát	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Odprašky	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55
Berolan		0,1				0,1	0,1			0,1	0,1	
Melment F10			0,1	0,3	0,6	0,1	0,3					
Melflux 1641F								0,1	0,3	0,1	0,3	

Ze vzorků premixů byly poté připraveny vždy 3 šarže normové malty jejich společnou homogenizací a následným rozmícháním s vodou a s normovými písky (450 g pojiva plus 3x450 g normového písku složeného ze tří frakcí) postupem dle ČSN EN 196. Na rozdíl od citované normy byla voda dávkována v množství, které odpovídá stanovení kaše normální konzistence penetrometrickou zkouškou dle ČSN EN 413-2.

První šarže normové malty byla použita ke zkoušce penetrace, retence vody a obsahu vzduchu postupy dle ČSN EN 413-2.

Druhá a třetí šarže normové malty byla v souladu s postupem dle ČSN EN 196 zaformována do zkušebních těles rozměrů 40x40x160 mm za účelem stanovení pevností a objemové hmotnosti. Po odformování byla zkušební tělesa po dobu prvních sedmi dnů exponována v prostředí nasycené vodní páry a poté v prostředí laboratorním. Zkoušky pevnosti v tlaku, tahu za ohybu a objemové hmotnosti byly realizovány po 7 a 28 dnech hydratace.

## 4. Použité suroviny a přístroje

### 4.1. Suroviny

V rámci experimentálních prací byl pro základní pojivou bázi použit portlandský cement CEM I 42,5 R společnosti Českomoravský cement, a.s. závod Mokrý, odprašky z hadicových filtrů výroby stavebního kamene v lomu Kámen Zbraslav, spol. s r.o. závod Předklášteří a vápenný hydrát CL 90 společnosti Carmeuse, a.s. závod Mokrý.

Základní pojivová báze byla modifikována plastifikátory Melment F 10 a Melflux 164 F, dodavatel Stachema CZ, s.r.o. Brno a dále provzdušňující přísadou Berolan LP 50, dodavatel HSH Chemie, s.r.o. Praha.

#### Portlandský cement

CEM I 42,5 R od společnosti českomoravský cement ze závodu Mokrý. Jeho chemické složení uvádí tab. 6 a mineralogické složení, stanovené výpočtem dle Boguea, uvádí tab. 7.

**Tab. 6:** Chemické složení cementu

Chemické složení [%]									
CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	S <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
64	20	4	4	1	2,9	0,04	0,049	0,74	0,18

**Tab. 7:** Mineralogické složení cementu

Mineralogické složení [%]				
C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	MgO
67	11	7	11	1,4

Z tabulky je patrné, že se jedná o kvalitní jednosložkový portlandský cement s vysokým obsahem alitu a obvyklými podíly C<sub>3</sub>A a C<sub>4</sub>AF.

#### Odprašky

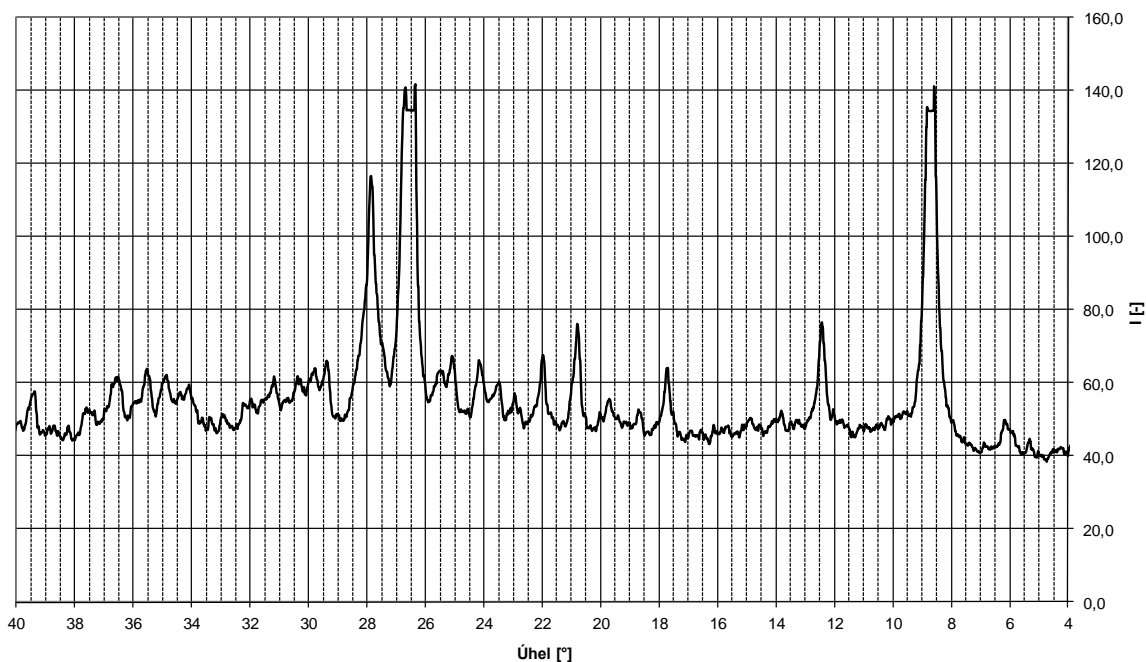
Odprašky z hadicových filtrů z lomu Kámen Zbraslav v Předklášteří. Jde o odpad, který má proměnlivou zrnitost většinou do velikosti zrna 4 mm. Použité odprašky měly střední velikost zrna 20 μm. Mineralogické složení odprašek (viz rentgenogram na obr. 6) se stávalo z:

- ❖ Křemen, SiO<sub>2</sub>
- ❖ Živce, Na<sub>2</sub>O.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.6SiO<sub>2</sub> až CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.4SiO<sub>2</sub>
- ❖ Muskovitické slídy, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.4SiO<sub>2</sub>.H<sub>2</sub>O

❖ Chlority,  $3\text{MgO}\cdot 4\text{SiO}_2\cdot \text{H}_2\text{O}$

Bylo tedy prakticky shodné se složením výchozí suroviny (svratecká ortorula).

Hodnoty měrné hmotnosti, vlhkosti a měrného povrchu udává tabulka 8.



**Obr. 6:** Rentgenogram odprašků Předklášteří

**Tab. 8:** Fyzikální vlastnosti odprašků

Sledovaná vlastnost	Odprašky
Měrný povrh [ $\text{m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ]	789
Měrná hmotnost [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	2740
Vlhkost [%]	0,46

### Vápenný hydrát

Vápenný hydrát CL 90 firmy Carmeuse, a.s., závod Mokrý je velmi jemný a objemově stálý. Vhodný pro suché omítkové směsi nebo pro úpravu vod včetně neutralizace odpadních vod.

**Tab. 9:** Vlastnosti vápenného hydrátu CL 90

Sledovaná vlastnost	Rozmezí hodnot
CaO+MgO [%]	92,0 – 95,5
z toho MgO [%]	0,3-0,6
CO <sub>2</sub> [%]	1,0-3,0
SO <sub>3</sub> [%]	0,1-0,4
Ztráta žíháním [%]	23,5-25,0
Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	93,0-95,0
Objemová stálost [-]	vyhovuje
Zbytek na síť 0,2 mm [%]	0
Zbytek na síť 0,09 mm [%]	3,5-5,5
Sypná hmotnost [kg·m <sup>-3</sup> ]	330-400

### **Berolan LP 50**

Berolan je prášková provzdušňující přísada na bázi laurylsulfonanu sodného vyráběná firmou Berolan GmbH. Byl vyvinut speciálně pro použití malt na bázi sádry, vápna či cementu. Jeho dávkování se pohybuje obvykle kolem 0,1 % hm. na hmotnost pojiva

### **Melment F10**

Je prášková plastifikační přísada na bázi vodorozpustné melaminformaldehydové pryskyřice. Melment vyrábí firma BASF Construction Polymers. Je navržen pro plastifikaci a snížení vodního součinitele v cementech a pojivech na bázi vápna a sádry. Dávkuje se do 0,3 % hm. na hmotnost pojiva.

### **Melflux 1641F**

Je práškový superplastifikátor na bázi polykarboxyl éteru vyráběný rovněž firmou BASF Construction Polymers. Tyto plastifikátory se vyznačují polyethylenglykolovými postranními řetězci. Je navržen pro cementová pojiva a dávkuje se v množství do 0,3 % hm. na hmotnost pojiva.

## **4.2. Přístroje**

V průběhu řešení bakalářské práce bylo využito následujících zařízení, které jsou v majetku ÚTHD VUT Brno:

- ❖ Laboratorní váhy s váživostí na setiny gramu

- ❖ Laboratorní míchačka dle normy ČSN EN 196-1
- ❖ Přístroj pro stanovení hodnoty penetrace dle ČSN EN 413-2, obr. 7
- ❖ Přístroj na stanovení obsahu vzduchu v maltě dle ČSN EN 413-2, obr. 8
- ❖ Formy na zkušební tělesa
- ❖ Střásací stolek
- ❖ Zatěžovací lis



**Obr. 7:** Přístroj pro stanovení hodnoty penetrace



**Obr. 8:** Přístroj pro stanovení obsahu vzduchu

## 5. Vyhodnocení výsledků

Přehled vlastností referenčních cementů, tj. bez modifikace přísadami a s přísadou Berolan v množství 0,1 % uvádí tab. 10a, tab. 10b.

**Tab. 10a:** Technologické vlastnosti referenčních vzorků

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1R	2R
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X		
Vodní součinitel w/c	-		-		0,596	0,527
Hloubka penetrace [mm]	35 ± 3		35 ± 3		35	37
Retence vody [%]	≥ 80		≥ 75		85	99
Obsah vzduchu [%]	≥ 8 a ≤ 22		≤ 6		6	23

**Tab. 10b:** Technologické vlastnosti referenčních vzorků

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1R	2R
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X		
<b>Pevnost v tahu za ohybu</b>						
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	2,9	1,0
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	nestanoveno	nestanoveno
<b>Pevnost v tlaku</b>						
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	≥ 7	≥ 10	≥ 10	8,4	1,8
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	≥ 5 a ≤ 15	≥ 12,5 a ≤ 32,5	≥ 22,5 a ≤ 42,5	≥ 22,5 a ≤ 42,5	nestanoveno	nestanoveno
<b>Objemová hmotnost</b>						
7 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	2190	1590
28 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	nestanoveno	nestanoveno

Přehled vlastností normových malt, připravených z premixů modifikovaných plastifikátorem Melmentem F 10 a ztekucovačem Berolan LP 50, je uveden v tab. 11a , tab. 11b.

**Tab. 11a:** Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melment F10

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1A	2A	3A	4A	5A
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X					
Vodní součinitel w/c	-	-	-	-	0,593	0,589	0,586	0,511	0,467
Hloubka penetrace [mm]	35 ± 3	35 ± 3	35 ± 3	35 ± 3	34	33	34	37	37
Retence vody [%]	≥ 80	≥ 75	≥ 75	≥ 75	90	96	nestanoveno	96	97
Obsah vzduchu [%]	≥ 8 a ≤ 22	≤ 6	≤ 6	≤ 6	5	5	nestanoveno	24	43

**Tab. 11b: Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melment F10**

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1A	2A	4A	5A
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X				
<b>Pevnost v tahu za ohybu</b>								
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	2,2	3,0	0,3	0,6
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	2,7	4,1	1,7	2,4
<b>Pevnost v tlaku</b>								
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	≥ 7	≥ 10		5,4	8,4	0,7	2,2
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	≥ 5 a ≤ 15	≥ 12,5 a ≤ 32,5	≥ 22,5 a ≤ 42,5		10,1	13,7	4,0	6
<b>Objemová hmotnost</b>								
7 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	2110	2140	1630	1770
28 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	1980	2040	1560	1700

Na základě dosažených výsledků je možno konstatovat:

- ❖ při dodržení požadavku na konzistenci, charakterizovanou hodnotou hloubky penetrace, je vodní součinitel normových malt závislý nejen na použití a dávce plastifikátoru Melment, ale i na použití provzdušňovací přísady Berolan. Přitom je zřejmé, že tato provzdušňovací přísada snižuje potřebné množství záměsové vody více než přísada plastifikační. Nejnižší hodnoty vodního součinitele proto dosahovala malta 5A s kombinovaným účinkem 0,3% plastifikátoru Melment a 0,1% provzdušňovače Berolan, nikoli předpokládaná malta 3A s nejvyšší koncentrací tohoto plastifikátoru. Ze stanovených hodnot vodního součinitele vzorků 2A s 0,3% a 3A s 0,6% plastifikátoru Melment F 10 je dále patrné, že použití této přísady v dávce vyšší než 0,3% je již prakticky neúčinné, a proto bylo od dalšího zkoušení tohoto vzorku upuštěno
- ❖ normovému požadavku na vodní retenci vyhověly všechny zkoušené vzorky. Z podrobného vyhodnocení závislosti vodní retence na ostatních sledovaných parametrech vyplynulo, že tato veličina je při konstantní konzistenci/penetraci malty ovlivněna jednak použitím provzdušňovací přísady a dále i výší vodního součinitele. Co se týká mechanismu zádrže vody vlivem provzdušnění je jasné, že se jedná o přerušení kapilárních pórů póry vzdušnými, které znesnadňují transport vody, a tudíž zvyšují retenci. Co do vlivu vodního součinitele lze konstatovat, že

čím nižší je u vzorku celkový obsah vody, tím nižší bude poměrný díl, který se může uvolnit, tudíž retence vzroste. Mimo to vzorek s nižším vodním součinitelem bude obsahovat nižší poměr vody volné ku vodě hydratační než vzorek s vyšším vodním součinitelem, což dále přispěje ke zlepšení vodní retence

- ❖ normovému požadavku na obsah vzduchu nevyhověly malty 1R, 1A, 2A bez modifikace provzdušňovací přísadou Berolanu na straně jedné a malta 5A s 0,3% plastifikátoru Melment plus 0,1% provzdušňovače Berolan na straně druhé. V prvním případě byl kvůli absenci provzdušňovače obsah vzduch příliš nízký, ve druhém případě posílila přítomnost zvýšené dávky Melmentu účinek provzdušňovací přísady do té míry, že stanovený obsah vzduchu byl naopak příliš vysoký
- ❖ dosahované pevnosti normových malt byly závislé jednak na dávce plastifikátoru a dále na použití provzdušňovače. Zatímco napěnění malty vlivem použití provzdušňovací přísady vedlo k podstatnému snížení pevností, ztekucení malty plastifikátorem tento negativní dopad částečně zmírňovalo. Přesto pouze jediný vzorek 5A vyhověl normovému požadavku, a to pouze pro nejnižší třídu MC5. Současně však tento vzorek nevyhověl normovému požadavku na obsah vzduchu, který byl příliš vysoký
- ❖ objemová hmotnost zkoušených malt závisela přímo úměrně na dávce plastifikátoru a nepřímo úměrně na použití napěňovací přísady. Zatímco se zvyšující se dávkou plastifikátoru vzrůstala objemová hmotnost jen nepatrně, cca do 2 %, s přidáním Berolanu poklesla její hodnota oproti vzorkům neprovzdušňovaným v průměru o 20%. Další rozdíl v objemové hmotnosti byl zaznamenán v souvislosti dobou a způsobem uložení. Vzorky po 7 dnech expozice v prostředí nasycené vodní páry vykázaly o cca 4% vyšší objemovou hmotnost než po dalších třech týdnech expozice v laboratorním prostředí, kdy docházelo k jejich postupnému vysychání.

Technologické vlastnosti normových malt, připravených z premixů modifikovaných plastifikátorem Melflux a ztekucovačem Berolan, uvádějí tab. 12a , 12b.

**Tab. 12a: Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melflux 1641F**

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1B	2B	4B	5B
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X				
Vodní součinitel w/c	-		-		0,555	0,461	0,483	0,438
Hloubka penetrace [mm]	35 ± 3		35 ± 3		34	36	34	33
Retence vody [%]	≥ 80		≥ 75		99	99	96	99
Obsah vzduchu [%]	≥ 8 a ≤ 22		≤ 6		8	6	30	nestanoveno

**Tab. 12a: Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melflux 1641F**

Sledovaná vlastnost	ČSN EN 413 - 1				1B	2B	4B	5B
	MC 5	MC 12,5	MC 12,5 X	MC 22,5 X				
<b>Pevnost v tahu za ohybu</b>								
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	2,5	3,7	0,9	3,0
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	-	-	-	3,5	5,0	1,9	nestanoveno
<b>Pevnost v tlaku</b>								
7 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	-	≥ 7	≥ 10		7,9	12,2	2,1	7,7
28 denní [N/mm <sup>2</sup> ]	≥ 5 a ≤ 15	≥ 12,5 a ≤ 32,5	≥ 22,5 a ≤ 42,5		11,2	19,1	4,6	nestanoveno
<b>Objemová hmotnost</b>								
7 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	2130	2170	1610	2000
28 denní [kg/m <sup>3</sup> ]	-	-	-	-	2020	2080	1580	nestanoveno

Z dosažených výsledků lze učinit tyto závěry:

- ❖ ve srovnání s plastifikační přísadou Melment F 10 byl ztekucovací účinek plastifikátoru Melflux 1641 F podstatně intenzivnější. Zatímco při 0,3% dávce Melmentu došlo u vzorku 2A bez napěňovače ke snížení vodního součinitele pouze o 1,0% oproti referenčnímu vzorku 1R, při použití téhož dávkování Melfluxu se snížil vodní součinitel odpovídajícího vzorku 2B o 22%. Co se týče vlivu napěňovací přísady Berolanu, přispělo její použití k dalšímu snížení vodního součinitele, pozorovaný účinek byl však již podstatně méně výrazný než při kombinaci Berolanu s plastifikátorem Melment

- ❖ retence vody všech vzorků vyhověla požadavkům normy. Naměřené hodnoty vodní retence pak potvrdily výše uvedený závěr o vlivu vodního součinitele na tuto sledovanou vlastnost. V daném případě, kdy nejen vodní součinitel vzorků s Berolanem, ale i vodní součinitel vzorků 1B a 2B bez provzdušňovače byl velmi nízký, došlo vždy k téměř dokonalé retenci vody ve výši cca 99% (poněkud nižší hodnotu u vzorku 4B lze považovat za subjektivní chybu měření)
- ❖ obsah vzduchu nevyhověl požadavku normy u žádného ze sledovaných vzorků. U malt bez provzdušňovací přísady byl totiž příliš nízký, naopak u malty 4B s provzdušňovačem byl příliš vysoký. S přihlédnutím k výsledkům obdobných vzorků modifikovaných plastifikátorem Melment nebyl vzorek 5B na obsah vzduchu testován
- ❖ naměřené pevnosti malt modifikovaných plastifikátorem Melflux byly o 20 až 50% vyšší než odpovídajících malt s plastifikátorem Melment. Přesto ani jeden vzorek této skupiny komplexnímu požadavku normy na hodnotu obsahu vzduchu a tlakových pevností nevyhověl
- ❖ co se týče objemových hmotností, byly vlivy na jejich výši obdobné jako u vzorků modifikovaných plastifikátorem Melment F 10. To znamená, že největší vliv vykazalo použití provzdušňovací přísady Berolanu, které vedlo k zásadnímu snížení objemové hmotnosti, již méně doba a způsob expozice vzorků a v nepatrné míře i dávka použitého plastifikátoru.

## 6. Diskuze výsledků

- ❖ provedenými experimenty bylo ověřeno, že základní pojivý systém vyvíjeného premixu je pro daný účel plně vyhovující. Pro dosažení normou požadovaných vlastností, které zabezpečují universální použití premixu pro přípravu malt i omítek, je však zapotřebí základní pojivý systém modifikovat přísadou provzdušňovací, event. i plastifikační
- ❖ použití provzdušňovací přísady je zcela nezbytné pro zabezpečení dostatečného obsahu vzduchu v připravené maltě. Provzdušnění vhodně upravuje konzistenci malty a vodní retenci, co do aplikačních vlastností se též podílí na zlepšení plasticity malty. Na druhé straně však velmi negativně ovlivňuje dosahované pevnosti

- ❖ použití plastifikátoru slouží při konstantní konzistenci/penetraci malty ke snížení vodního součinitele a následně ke zvýšení pevností. Působí tedy proti negativnímu vlivu provzdušňovací přísady na pevnosti. Na druhé straně však bylo pozorováno, že v kombinaci s provzdušňovací přísadou výrazně přispívá ke zvýšení obsahu vzduchu
- ❖ ze dvou zkoušených plastifikačních přísad byla z hlediska požadovaného ztekucovacího efektu a následného zvýšení pevností jako mnohem účinnější vyhodnocena plastifikační Melflux. Přesto však se nepodařilo ani s použitím této přísady úplně odstranit negativní vliv provzdušňovače Berolanu na výšku dosahovaných pevností
- ❖ dávka provzdušňovací přísady Berolan ve výši 0,1% byla vyhodnocena jako nadbytečně vysoká, neboť společně s plastifikačními přísadami dává maltě takový obsah vzduchu, který je buď při anebo dokonce nad horní hranicí přípustného normového rozmezí. Na základě provedené predikce lze mít za to, že pro dosažení normou požadovaného obsahu vzduchu by postačovala dávka poloviční, cca 0,05%. Tato úprava by dále mohla přispět až k takovému zvýšení pevností, že pro nižší třídy vyvíjeného premixu by mohlo být dávkování plastifikační přísady minimalizováno, event. zcela vynecháno a naopak při zachování dávky plastifikátoru ve výši cca 0,3% by vzniklý premix mohl být zařazen do vyšší pevnostní kategorie.

## Závěr

Závěrem je možno konstatovat, že cíle bakalářské práce, zabývající se vývojem premixu pro přípravu omítkových a maltových směsí, byly splněny.

V rámci experimentálních prací byla navržena a laboratorně odzkoušena modifikace pojivé báze vyvíjeného premixu jednak dvěma plastifikačními přísadami a dále přísadou provzdušňovací. Na základě vyhodnocení výsledků se dospělo k závěru, že pro daný účel je použití provzdušňovací přísady nezbytné a pro vyšší třídu vyvíjeného premixu je nezbytná i modifikace plastifikační přísadou. Co do technického účinku byla jako vhodnější vyhodnocena přísada Melflux 1641F, pro reálné průmyslové podmínky je však nutné podmínit její použití i ekonomickým hlediskem.

Z dosažených výsledků dále vyplynulo, že navržená dávka provzdušňovací přísady Berolan LP 50 byla příliš vysoká. V jejím důsledku podstatně klesaly pevnosti a při vyšší koncentraci obou plastifikátorů navíc neúměrně vzrůstal obsah vzduchu v maltě. Proto se pro další výzkum v dané oblasti doporučuje zaměřit se na zpřesnění dávkování této provzdušňovací přísady, přičemž doporučená výchozí dávka by měla činit 0,05%. Na základě optimalizovaného dávkování ztekuovače by bylo možné dále přistoupit i k úpravě dávky použitého plastifikátoru, zde však bude patrně rozhodující hledisko ekonomické efektivity výroby.

## Seznam použité literatury

- [1] BÁRTA, R. *Chemie a technologie cementu*. 1. vyd. Praha: Nakladatelství československé akademie věd, 1961, 1107 s.
- [2] SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR, VÝZKUMNÝ ÚSTAV MALTOVIN PRAHA. *Výroba cementu v České republice*. [online]. [cit. 2013-03-21]. Dostupné z: [www.svcement.cz](http://www.svcement.cz)
- [3] ČSN EN 197 - 1 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cement pro obecné použití. Praha: Český normalizační institut, 2012
- [4] ŠAUMAN, Z. *Maltoviny I*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 198s .ISBN 80-214-0509-0
- [5] VAVŘÍN, F. *Maltoviny*. 2. vyd. Praha 1: SNTL, 1982, 250 s
- [6] *Referenční dokument o nejlepších dostupných technikách*. Průmyslová odvětví výroby cementu, vápna a oxidu hořečnatého. Květen 2010. 439 s
- [7] TOMANCOVÁ, L. Využití odpadů a sekundárních surovin jako alternativní suroviny v cementářském průmyslu. In: *12th International Conference Ecology And New Building Materials And Products* [online]. [cit. 2013-03-25]. ISBN 978-80-254-2029-4. Dostupné z: [www.vustah.cz](http://www.vustah.cz)
- [8] MACLAREN, D. C., WHITE, M. A. Cement: It's Chemistry And Properties. *Journal of Chemical Education*. [online]. 2003, červen, roč. 80, č. 6 [cit. 2013-03-24].
- [9] DUDA, W. H. *Cement-data-book*. 3., Neubearbeitete und Erweiterte Aufl. Wiesbaden: Bauverlag, 1985, 635 s. ISBN 37-625-2137-9
- [10] AÍTCIN, Pierre-Claude. *Vysokohodnotný beton*. 1. české vyd. Praha: ČKAIT, 2005, 320 s. ISBN 80-86769-39-9
- [11] SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR, VÝZKUMNÝ ÚSTAV MALTOVIN PRAHA. *Portlandské směsné cementy a portlandské cement s vápencem*. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [www.svcement.cz](http://www.svcement.cz)
- [12] SVAZ VÝROBCŮ CEMENTU ČR, VÝZKUMNÝ ÚSTAV MALTOVIN PRAHA. *Vlastnosti portlandských cementů směsných*. [online]. [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: [www.svcement.cz](http://www.svcement.cz)
- [13] DROCHYTKA, R., MATULOVÁ, P. *Lehké stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 206 s.

- [14] *Mimořádná příloha časopisu Odpadové fórum: Současná paliva v cementářském průmyslu*. Praha: České ekologické manažerské centrum, 2009, roč. 2009, č. 2.  
Dostupné z: [www.odpadoveforum.cz](http://www.odpadoveforum.cz)
- [15] ADÁMEK, J., NOVOTNÝ, B., KOUKAL, J. *Stavební materiály*. 1 vyd. Brno: CERM, 1997, 205 s. ISBN 80-214-0631-3
- [16] ČSN EN 413 – 1 Cement pro zdění - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody. Praha: Český normalizační institut, 2011
- [17] ČSN EN 413 - 2 Cement pro zdění - Část 2: Zkušební metody. Praha: Český normalizační institut, 2006
- [18] HEIDELBERG CEMENT. *How cement is made*, Germany, 2008. [online]. [cit. 2013-05-15] Dostupné z: [www.heidelbergcement.com](http://www.heidelbergcement.com)
- [19] GAZDIČ, D., FRIDRICHOVÁ, M., NOVÁK, J. Využití vysokopecní strusky a přírodního anhydritu k přípravě struskosíranového pojiva. In: Informační zpravodaj- cement, vápno, sádra. 1. Skalský dvůr, Výzkumný ústav maltovin Praha. 2008. p. 140-146.
- [20] FRIDRICHOVÁ, M., GAZDIČ, D., VEHOVSKÁ, L. Struskosíranový cement na bázi anhydritu. In: Maltoviny 2008. 1. Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební. 2008. p. 174-180. ISBN 978-80-214-3772-2.

## Seznam tabulek

<b>Tab. 1:</b>	Druhy cementu pro obecné použití	14
<b>Tab. 2:</b>	Používaná alternativní paliva v našich cementárnách	19
<b>Tab. 3:</b>	Přehled portlandských cementů směsných	30
<b>Tab. 4:</b>	Typické chemické složení vysokopecní strusky	31
<b>Tab. 5:</b>	Složení jednotlivých vzorků cementu	41
<b>Tab. 6:</b>	Chemické složení cementu	42
<b>Tab. 7:</b>	Mineralogické složení cementu	42
<b>Tab. 8:</b>	Fyzikální vlastnosti odprašků	43
<b>Tab. 9:</b>	Vlastnosti vápenného hydrátu CL 90	44
<b>Tab. 10a:</b>	Technologické vlastnosti referenčních vzorků	45
<b>Tab. 10b:</b>	Technologické vlastnosti referenčních vzorků	46
<b>Tab. 11a:</b>	Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melment F 10	46
<b>Tab. 11b:</b>	Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melment F 10	47
<b>Tab. 12a:</b>	Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melflux 1641F	49
<b>Tab. 12b:</b>	Technologické vlastnosti malt s plastifikátorem Melflux 1641F	49

## Seznam obrázků

<b>Obr. 1:</b>	Výrobci cementu v ČR	13
<b>Obr. 2:</b>	Schéma suché výroby cementu	17
<b>Obr. 3:</b>	Typy výměníků tepla	21
<b>Obr. 4:</b>	Ternární fázový diagram oblasti existence slinkových minerálů	22
<b>Obr. 5:</b>	Vznik základních slinkových minerálů v závislosti na době a teplotě výpalu	29
<b>Obr. 6:</b>	Rentgenogram odprašků Předklášteří	43
<b>Obr. 7:</b>	Přístroj pro stanovení hodnoty penetrace	45
<b>Obr. 8:</b>	Přístroj na stanovení obsahu vzduchu v maltě	45