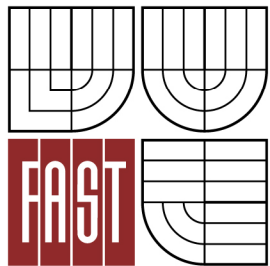


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ  
ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

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

# PORTLANDSKÉ CEMENTY S VÁPENCEM A PORTLANDSKÉ SMĚSNÉ CEMENTY - VLASTNOSTI, MOŽNOSTI POUŽITÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

TOMÁŠ MATYK

VEDOUCÍ PRÁCE  
SUPERVISOR

Ing. LENKA BODNÁROVÁ, Ph.D.



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

**Student** Tomáš Matyk

**Název** Portlandské cementy s vápencem a portlandské směsné cementy - vlastnosti, možnosti použití

**Vedoucí bakalářské práce** Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

**Datum zadání bakalářské práce** 30. 11. 2011

**Datum odevzdání bakalářské práce** 25. 5. 2012

V Brně dne 30. 11. 2011

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

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

## **Podklady a literatura**

Hela R.: Technologie betonu I (BJ09). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2005

Hela R.: Technologie betonu II (BJ15). Studijní opora Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2008

Drochytka, R.: Trvanlivost stavebních materiálů (CJ07). Studijní opora, Vysoké učení technické v Brně, FAST, 2008

Sborníky z českých a tuzemských zahraničních konferencí  
České a zahraniční technické normy

## **Zásady pro vypracování**

Současná výroba cementu výrazně zatěžuje životní prostředí a je energeticky náročná. Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem představují cementy s nižším obsahem energeticky náročného slínku a tím i s nižší produkcí CO<sub>2</sub>. Pro širší zavedení těchto cementů do praxe je přínosné sumarizovat informace o chování betonů s užitím těchto cementů.

V rámci bakalářské práce proveďte rešerši informací v oblasti portlandských směsných cementů a portlandských cementů s vápencem z produkce Cementárny Prachovice, Holcim (Česko), a.s., člen koncernu.

Proveďte rešerši informací v oblasti trvanlivosti betonů s portlandskými směsnými cementy a portlandskými cementy s vápencem v agresivních prostředích.

V experimentální části bakalářské práce se zaměřte na sledování vlastností betonů s portlandskými směsnými cementy a portlandskými cementy při působení vybraných agresivních prostředí.

Rozsah práce cca 40 stran.

## **Předepsané přílohy**

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....  
Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.  
Vedoucí bakalářské práce

## **Abstrakt**

Současná výroba cementu je ekologicky a ekonomicky náročná, proto je celosvětovým trendem snižování množství vyrobeného portlandského slínku a jeho nahrazení neslínkovými minerály. Portlandské směsné cementy představují ekologičtější a ekonomičtější variantu portlandských cementů. Pro zavedení těchto cementů do praxe je potřeba sumarizovat vlastnosti a chování betonů vyrobených z těchto cementů. Práce se zaměřuje na chování betonů s portlandskými cementy s vápencem a s portlandskými směsnými cementy v agresivním prostředí.

## **Klíčová slova**

Cement, portlandský cement s vápencem, portlandský směsný cement, trvanlivost, koroze, agresivní prostředí.

## **Abstract**

The current cement production is environmentally and economically challenging, that's why the global trend is reducing the amount of portland clinker produced and it's replacement by minerals without clinker. Portland blended cements are environmentally friendly and economical option. Accept of these cements into practice is necessary to summarize the properties and behavior of concrete made from these cements. The work focuses on the behavior of concrete with portland limestone cements and portland blended cements in aggressive environments.

## **Keywords**

Cement, portland cement with limestone, portland blended cement, durability, corrosion, aggressive environment.

## **Bibliografická citace VŠKP**

MATYK, Tomáš. *Portlandské cementy s vápencem a portlandské směsné cementy - vlastnosti, možnosti použití*. Brno, 2012. 55 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí práce Ing. Lenka Bodnárová, Ph.D.

**Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně, a že jsem uvedl(a) všechny použité, informační zdroje.

V Brně dne 23.5.2012

.....  
podpis autora

## **Poděkování**

Rád bych touto cestou poděkoval své vedoucí bakalářské práce paní Ing. Lence Bodnárové, Ph.D. za vstřícnou pomoc a konzultace během zpracovávání mé bakalářské práce a panu Ing. Jaroslavu Válkovi za pomoc s experimentální částí bakalářské práce.

## OBSAH

1. ÚVOD.....	10
2. PORTLANDSKÉ SMĚSNÉ CEMENTY .....	11
2.1. Cement.....	11
2.2. Rozdělení cementů .....	11
2.3. Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem .....	12
2.4. Hlavní složky portlandského cementu směsného (CEM II).....	13
2.4.1. Portlandský slínek (K).....	13
2.4.2. Granulovaná vysokopeční struska (S) .....	13
2.4.3. Přírodní pucolány (P, Q).....	13
2.4.4. Popílky (V, W) .....	14
2.4.5. Kalcinovaná břidlice (T).....	15
2.4.6. Vápenec (L, LL) .....	15
2.4.7. Křemičitý úlet (D) .....	15
2.5. Doplnující složky – síran vápenatý .....	16
2.6. Složení portlandských směsných cementů .....	16
2.7. Požadavky na chemické vlastnosti portlandských směsných cementů .....	16
2.8. Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu.....	17
2.9. Použití portlandských směsných cementů pro různá prostředí .....	17
2.10. Vyrábění portlandské směsné cementy cementárnou Prachovice .....	18
3.1. Chemická koroze betonu .....	21
3.1.1. Degradace betonů vlivem působení agresivního plynného prostředí - atmosférická koroze .....	22
3.1.1.1. Koroze betonu vlivem CO <sub>2</sub> - Karbonatace .....	22
3.1.1.2. Atmosférická koroze betonu oxidem siřičitým – sulfatace betonu .....	24
3.1.1.3. Synergická koroze směsí plynů CO <sub>2</sub> a SO <sub>2</sub> .....	25
3.1.2. Degradace betonů vlivem působení agresivního kapalného prostředí .....	25
3.1.2.1. Kapaliny (vody) způsobující korozi I. typu.....	26
3.1.2.2. Kapaliny způsobující korozi II. typu .....	26
3.1.2.3. Kapaliny způsobující korozi III. typu.....	26
3.1.3. Degradace betonů vlivem působení koroze tuhými látkami .....	27
3.2. Biologická koroze betonu.....	27
3.3. Fyzikálně mechanické vlivy na trvanlivost betonu .....	27
3.4. Degradace betonů vlivem chloridů.....	28



3.5. Degradace betonů vlivem vápenatého rozpínání.....	29
3.6. Degradace betonů vlivem hořčnatých iontů .....	29
3.7. Degradace betonů vlivem síranů: .....	29
3.8. Degradace betonů vlivem dusičnanů.....	30
3.9. Trvanlivost betonů s portlandskými směsnými cementy .....	30
4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....	33
4.1. Zkoušení korozní odolnosti betonu ČSN 73 1340 .....	34
4.1.1. Korozní prostředí.....	35
4.1.1.1. Plynné prostředí CO <sub>2</sub> .....	35
4.1.1.2. Kapalně prostředí SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , kapalně prostředí NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , kapalně prostředí Mg <sup>2+</sup> .....	35
4.1.1.3. Referenční prostředí .....	36
4.2. Fyzikálně-mechanické zkoušky.....	36
4.2.1. Stanovení pevnosti v tlaku.....	36
4.2.2. Stanovení pevnosti v příčném tahu.....	37
4.2.3. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou .....	37
4.3. Prováděné analýzy .....	37
4.3.1. Metoda Rentgenové difrakční analýzy (RTG) .....	37
4.3.2. Stanovení pH betonu .....	39
4.4. Charakteristika zkušebních vzorků.....	39
4.5. Složení zkoušených receptur .....	40
4.6. Charakteristika surovin.....	40
4.7. Prováděné experimentální práce.....	41
5. VÝSLEDKY A DISKUZE.....	42
5.1. Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek receptur T3, T4, T5, T16 pro jednotlivá agresivní prostředí .....	42
5.1.1. Tabulky výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek .....	42
5.1.2. Grafické závislosti mechanicko-fyzikálních vlastností betonů .....	44
5.1.2.1 Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v agresivním prostředí.....	44
5.1.2.2. Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v agresivním prostředí....	46
5.1.2.3. Závislost objemové hmotnosti na době uložení v agresivním prostředí .....	48
5.1.3. Diskuze a srovnání výsledků mechanicko-fyzikálních zkoušek .....	49
5.2. Výsledky zkoušek pH a RTG analýzy receptur T3, T4, T5, T16 pro jednotlivá agresivní prostředí .....	50
5.2.1. Tabulka naměřených hodnot pH.....	50

5.2.2. Vyhodnocení měření pH.....	51
5.2.3. Vyhodnocení RTG.....	51
6. ZÁVĚR.....	52
7. LITERATURA.....	53
8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ.....	55

# 1. ÚVOD

Současným trendem ve výrobě cementů je ekologie jeho výroby, ve smyslu snížení ekonomické náročnosti výroby a snížení emisí CO<sub>2</sub> do ovzduší při samotné výrobě cementu. Snížení výroby ekonomicky a ekologicky náročného portlandského slínku se může docílit částečnou substitucí portlandského slínku vhodným substituentem. Tím může být například vysokopeční struska, popílky, křemičité úlety, kalcinovaná břidlice, či vápenec. Vznikají tak tzv. portlandské směsné cementy. V České republice nejsou tyto cementy v praxi moc používané. Pro výraznější rozšíření užití portlandských směsných cementů je třeba ověřit chování těchto cementů s přísadami do betonu, či vliv agresivních prostředí na trvanlivost betonů vyrobených za použití těchto druhů cementů.

Cílem této bakalářské práce je vypracování rešerše informací v oblasti portlandských směsných cementů a trvanlivosti betonů s portlandskými směsnými cementy v agresivním prostředí. Práce je zaměřena na portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem z produkce Cementárny Prachovice, Holcim a.s., člen koncernu.

Experimentální část práce je zaměřena na sledování vlastností betonů s portlandskými směsnými cementy a portlandskými cementy při působení vybraných agresivních prostředí.

## 2. PORTLANDSKÉ SMĚSNÉ CEMENTY

### 2.1. 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. Cement podle EN 197-1 označovaný jako CEM, musí při odpovídajícím dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu betonu a malty zachovávající po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost. Hydraulické tvrdnutí cementu CEM probíhá v důsledku hydratace vápenatých křemičitanů. Na hydrataci se v průběhu tvrdnutí mohou podílet i jiné chemické sloučeniny (hlinitany) [1]. Chemické vlastnosti cementů jsou závislé na jejich mineralogickém složení, které ovlivňuje rychlost hydratace a výsledné pevnosti betonu. Základní slínkové minerály včetně jejich charakteristik jsou uvedeny v tabulce 1 [2].

*Tabulka 1: Základní slínkové minerály a jejich charakteristika [2].*

minerál	systematický název	zkratka	obsah v portlandském slínku [%]	teplota tvorby [°C]	hydratační teplo [kJ·kg <sup>-1</sup> ]	rychlost hydratace
alit	trikalcium silikát	C <sub>3</sub> S	37 – 75	od 1250	500	rychlá
belit	dikalcium silikát	C <sub>2</sub> S	5 – 40	od 700	250	střední
amorfní fáze	trikalcium aluminát	C <sub>3</sub> A	3 – 15	od 900	910	velmi rychlá
brownmillerit	tetrakalcium aluminát ferit	C <sub>4</sub> AF	9 – 14	od 700	420	rychlá

### 2.2. Rozdělení cementů

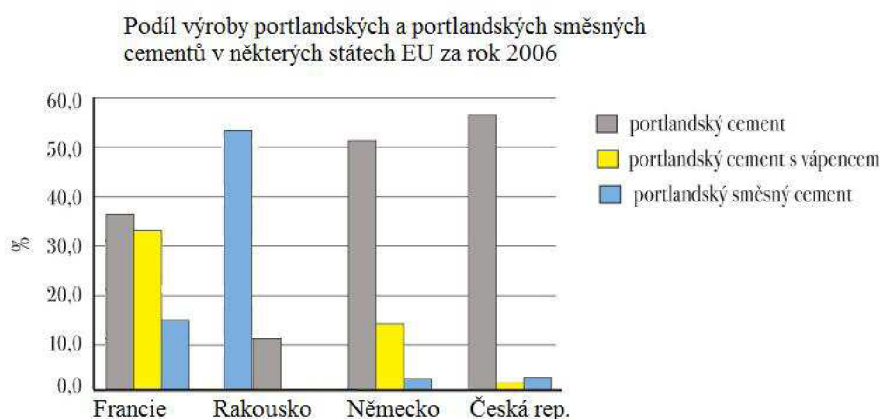
Cement se podle ČSN EN 197-1 dělí do pěti hlavních druhů cementů:

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

Cementy se dále dělí na tři třídy normalizované pevnosti tlaku, a to na 32,5, 42,5 a 52,5 (MPa). Cementy s vysokými počátečními pevnostmi se označují písmenem R (rapid) [1].

### 2.3. Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem

Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem představují ekologičtější alternativu energeticky náročných portlandských cementů. Zavedení těchto druhů cementů do praxe naráží na problém s nedostatečným probádáním chování betonů s užitím těchto druhů cementů. Masovější využívání portlandských směsných cementů by mělo za následek snížení emisí CO<sub>2</sub> z výroby portlandského slínku. Množství emisí CO<sub>2</sub> při výrobě portlandského slínku se pohybuje mezi 900-1000 kg.t<sup>-1</sup> vyrobeného slínku, při měrné spotřebě tepla 3500-4000 MJ.t<sup>-1</sup>. Šedesát procent emisí pochází z kalcinačního procesu, zbytek vzniká při spalování paliva. Snížení emisí CO<sub>2</sub> lze dosáhnout výrobou cementů s více hlavními složkami (portlandské směsné cementy). Portlandský cement vyžaduje obsah slínku nad 95 %. Portlandské směsné cementy umožňují dle ČSN EN 197-1 snížit obsah slínku na 65 % (CEM II/B-M). Portlandské směsné cementy jsou v porovnání s portlandskými cementy trhem málo akceptovány [3]. Podíl výroby portlandských a portlandských směsných cementů v roce 2006 v některých zemích Evropské unie informativně ukazuje Graf 1 [4]. Díky možnosti kombinovat několik hlavních složek umožňuje portlandský směsný cement (CEM II-M) využít výhody jednotlivých hlavních složek k vytvoření stabilních materiálových systémů. Ve vztahu k vlivu hlavních složek na trvanlivost betonu se uplatňují hlavně cementy, ve kterých jsou přítomny následující kombinace hlavních složek: vápenc/vysokopecní struska či vápenc/popílek [4].



**Graf 1: Podíl výroby portlandských a portlandských směsných cementů v některých státech EU za rok 2006 [4].**

## 2.4. Hlavní složky portlandského cementu směsného (CEM II)

### 2.4.1. Portlandský slínek (K)

Portlandský slínek se vyrábí pálením nejméně do slinutí přesně připravené surovinové směsi obsahující prvky, obvykle vyjádřené jako oxidy CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a malé množství jiných látek. Surovinová směs musí být homogenní. Portlandský slínek je hydraulická látka, která musí sestávat nejméně ze dvou třetin hmotnosti z křemičitanů vápenatých (3CaO.SiO<sub>2</sub> a 2CaO.SiO<sub>2</sub>). Ve zbytku jsou pak obsaženy slínkové fáze obsahující hliník a železo a jiné sloučeniny. Hmotnostní podíl CaO/SiO<sub>2</sub> ≥ 2. Obsah oxidu hořečnatého (MgO) nesmí být větší než 5 % hmotnosti [1].

### 2.4.2. Granulovaná vysokopecní struska (S)

Granulovaná vysokopecní struska vzniká rychlým ochlazením vhodně složené struskové taveniny vznikající při tavení železné rudy ve vysoké peci. Struska musí být nejméně ze dvou třetin hmotnosti sklovitá a při vhodné aktivaci musí vykazovat hydraulické vlastnosti. Granulovaná vysokopecní struska musí sestávat nejméně ze dvou třetin hmotnosti z oxidu vápenatého (CaO), oxidu hořečnatého (MgO) a oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>). Zbytek obsahuje oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) a malá množství jiných sloučenin. Hmotnostní podíl (CaO+MgO)/(SiO<sub>2</sub>) >1 [1].

### 2.4.3. Přírodní pucolány (P, Q)

Pucolány jsou přírodní látky křemičité nebo křemičito-hlinité povahy. Pucolány po smíchání s vodou samy netvrdnou, avšak jsou-li jemně semlety, reagují v přítomnosti vody za normální teploty s rozpuštěným hydroxidem vápenatým (Ca(OH)<sub>2</sub>) a tvoří sloučeniny křemičitanů vápenatých a hlinitanů vápenatých, které jsou nositeli narůstající pevnosti. Tyto sloučeniny jsou podobné těm, které vznikají při tvrdnutí hydraulických látek. Pucolány obsahují v podstatě aktivní oxid křemičitý (SiO<sub>2</sub>) a oxid hlinitý (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ve zbytku pak oxid železitý Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> a jiné oxidy. Obsah aktivního oxidu vápenatého je pro proces tuhnutí zanedbatelný. Obsah aktivního oxidu křemičitého musí být nejméně 25 % hmotnosti [1]. Používané pucolány jsou:

- **Přírodní pucolány (P)** jsou obvykle látky vulkanického původu, nebo

Gh sedimentární horniny vhodného chemického a mineralogického složení.

- **Přírodní kalcinované pucolány (Q)** jsou látky vulkanického původu, hlíny, břidlice, nebo sedimentované horniny, aktivované tepelnou úpravou [1].

#### 2.4.4. Popílký (V, W)

Popílek se získává elektrostatickým, nebo mechanickým odlučováním prachových částic z kouřových plynů topenišť otápěných práškovým uhlím. Popílek získaný jiným způsobem nesmí být dle ČSN EN 197-1 použit. Popílek může být svou podstatou křemičitý nebo vápenatý. První má pucolánové vlastnosti, druhý může mít navíc hydraulické vlastnosti. Ztráta žháním popílku, při době žhání 1 hodinu, nesmí být větší než 5 % hmotnosti. Popílký se ztrátou žháním 5-7 % hmotnosti (musí být uvedeno na obalu nebo v průvodní dokumentaci) mohou být rovněž použity za předpokladu, že jsou splněny požadavky na trvanlivost, zejména mrazuvzdornost a slučitelnost s přísadami [1]. Popílký rozlišujeme:

- **Křemičitý popílek (V)** je jemný prášek převážně sestávající z kulových částic s pucolánovými vlastnostmi. Sestává zejména z aktivního oxidu křemičitého a oxidu hlinitého, ve zbytku je pak obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého musí být nižší než 10 % hmotnosti, obsah volného oxidu vápenatého nesmí být vyšší než 1 % hmotnosti. Popílek s obsahem volného oxidu vápenatého 1 - 2,5 % hmotnosti může být použit za předpokladu, že jsou splněny požadavky na objemovou stálost. Obsah aktivního oxidu křemičitého nesmí být menší než 25 % hmotnosti [1].

- **Vápenatý popílek (W)** je jemný prášek, který má hydraulické, nebo pucolánové vlastnosti. Sestává zejména z aktivního oxidu vápenatého (CaO), aktivního oxidu křemičitého (SiO<sub>2</sub>) a oxidu hlinitého (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), ve zbytku je pak obsažen oxid železitý a jiné sloučeniny. Obsah aktivního oxidu vápenatého nesmí být menší než 10 % hmotnosti. Vápenatý popílek obsahující aktivní oxid vápenatý mezi 10 % a 15 % hmotnosti musí obsahovat nejméně 25 % hmotnosti aktivního oxidu křemičitého. Vhodně semletý vápenatý popílek (zbytek na síť 40 μm při mokřém prosívání mezi 10 % - 30 %) obsahující více než 15 % hmotnosti aktivního oxidu vápenatého musí vykazovat pevnost v tlaku po 28 dnech nejméně 10 MPa. Objemová stálost vápenatého popílku (dle ČSN EN 196-3) nesmí být větší než 10 mm s použitím směsi 30 % hmotnosti popílku a 70 % hmotnosti cementu (CEM I) [1].

#### **2.4.5. Kalcinovaná břidlice (T)**

Kalcinovaná břidlice, zejména olejnatá břidlice, se vyrábí ve speciální peci při teplotě přibližně 800 °C. Podle složení přírodního materiálu a výrobního postupu obsahuje kalcinovaná břidlice slínkové fáze, zvláště dikalciumsilikát a monokalciumaluminát. Obsahuje rovněž malá množství volného oxidu vápenatého a síranu vápenatého i značný podíl pucolánově reagujících oxidů, zejména oxidu křemičitého. Kalcinovaná břidlice má v jemně semletém stavu výrazné hydraulické vlastnosti jako portlandský cement a navíc má i vlastnosti pucolánové. Vhodně semletá kalcinovaná břidlice musí vykazovat pevnost v tlaku po 28 dnech nejméně 25 MPa. Objemová stálost kalcinované břidlice (dle ČSN EN 196-3) nesmí být větší než 10mm s použitím směsi 30 % hmotnosti semleté kalcinované břidlice a 70 % hmotnosti cementu (CEM I) [1].

#### **2.4.6. Vápenec (L, LL)**

Vápenec musí dle ČSN EN 197-1 splňovat tyto požadavky:

- Obsah uhličitanu vápenatého ( $\text{CaCO}_3$ ), vypočítaný z obsahu oxidu vápenatého, musí být nejméně 75 % hmotnosti.
- Obsah jílového podílu, stanovený zkouškou methylenovou modří, nesmí být větší než 1,2 g/100 g (vápenec musí být pomlet na jemnost 5000  $\text{cm}^2/\text{g}$ ).
- Celkový obsah organického uhlíku (TOC):

**LL** - obsah TOC nesmí být větší než 0,2 % hmotnosti.

**L** - obsah TOC nesmí být větší než 0,5 % hmotnosti [1].

#### **2.4.7. Křemičitý úlet (D)**

Křemičité úlety vznikají jako odpad některých hutnických provozů při výrobě krystalického křemíku. Nyní se také vyrábějí účelově a jsou dodávány v práškové formě nebo v suspenzi. Křemičité úlety se vyznačují mimořádně velkým měrným povrchem a dobrými pucolánovými vlastnostmi. Mají vysokou schopnost vázat hydroxid vápenatý vznikající při hydrataci cementu. Obsahují 85 – 98 % amorfního  $\text{SiO}_2$  ve tvaru kulatých zrn o průměru  $1\text{-}2 \cdot 10^{-7}$  m, při měrném povrchu 15 000 až 25 000  $\text{m}^2/\text{kg}$  [1; 5].

Křemičitý úlet musí splnit tyto požadavky:

- Ztráta žíháním nesmí být vyšší než 4 % hmotnosti, při době žíhání 1 hodina.
- Měrný povrch musí být nejméně 15  $\text{m}^2/\text{g}$ .



## 2.5. Doplnující složky – síran vápenatý

Síran vápenatý se přidává k ostatním složkám cementu v průběhu jeho výroby za účelem úpravy tuhnutí. Síran vápenatý může být přidáván ve formě sádrovce ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), sádry ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$  nebo anhydritu ( $\text{CaSO}_4$ ) popř. jejich směsi [1].

## 2.6. Složení portlandských směsných cementů

Tabulka 2 udává označení a množství (v %) jednotlivých hlavních složek v portlandských směsných cementech dle ČSN EN 197-1.

Tabulka 2: Složení portlandských směsných cementů [1].

Hlavní druhy	Druhy cementů pro obecné použití	Složení (poměry složek podle hmotnosti) <sup>a)</sup>											Doplňující složky		
		Hlavní složky													
		Slínek K	Vysokopec. struska S	Křemičitý úlet D <sup>b)</sup>	Pucolány přírodní P	přírodní kalcinované Q	Popílky křemičité V	Popílky vápenaté W	Kalcinovaná břidlice T	Vápenec obsah TOC max. 0,5 % L	Vápenec obsah TOC max. 0,2 % LL				
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	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	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
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský popílkový cement	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
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s kalcinovanou břidlicí	CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
		CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
	Portlandský cement s vápencem	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
		CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	0-5
	Portlandský směsný cement <sup>c)</sup>	CEM II/A-M	80-94	<----- 6-20 ----->									0-5		
CEM II/B-M		65-79	<----- 21-35 ----->									0-5			

### Poznámka k tabulce 2:

a) Hodnoty v tabulce se vztahují k součtu všech hlavních a doplňujících složek (v cementu je ještě nezbytné množství síranu vápenatého a případně přísady).

b) Obsah křemičitého úletu je omezen do 10 %.

c) Hlavní složky použité v těchto cementech (mimo slínku) musí být deklarovány v označení cementu.

## 2.7. Požadavky na chemické vlastnosti portlandských směsných cementů

Dle ČSN 197-1 má být obsah chloridů v cementu menší než 0,1 %. Obsah síranů v cementu (jako  $\text{SO}_3$ ) má být pro pevnostní třídu cementu 32,5 (N nebo R) menší než 3,5 %, pro pevnostní třídu 42,5 a 52,5 (N nebo R) má být menší než 4,0 %. Cement druhu CEM II/B-T smí u všech pevnostních tříd obsahovat až 4,5 % síranů [1].

## 2.8. Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu

Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu dle ČSN EN 197-1 udává tabulka 3.

*Tabulka 3: Požadavky na mechanické a fyzikální vlastnosti cementu [1].*

Pevnostní třída	Pevnost v tlaku [MPa]				Počátek tuhnutí [Min.]	Objemová stálost [mm]
	Počáteční pevnost		Normalizovaná pevnost			
	2 dny	7 dnů	28 dnů			
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$	$\geq 75$	$\leq 10$
32,5 R	$\geq 10,0$	-				
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$	$\geq 60$	
42,5 R	$\geq 20,0$	-				
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-	$\geq 45$	
52,5 R	$\geq 30,0$	-				

## 2.9. Použití portlandských směsných cementů pro různá prostředí

Norma ČSN EN 206-1/Z1 předepisuje použitelnost cementů pro různé druhy a stupně vlivu prostředí. Tabulka 4 uvádí použitelnost portlandských cementů směsných pro různé stupně vlivu prostředí. Klasifikace podle stupně vlivu prostředí:

- X0 – beton bez nebezpečí koroze ani narušení.
- XC1-4 – beton vystavený vlivu karbonatace.
- XD1-3 – beton vystavený vlivu chloridů, ne však z mořské vody.
- XF1-4 – beton vystavený korozi vlivem působení mrazu a rozmrazování

s rozmrazovacími prostředky nebo bez nich.

- XA1-3 – beton vystavený chemickému působení.
- XM1-3 – beton vystavený mechanickému působení.

**Tabulka 4: Použitelnost portlandských směsných cementů dle ČSN EN 206 [6].**

cementy dle ČSN EN 197-1	stupně vlivu prostředí											stupně vlivu prostředí						
	X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2	XM3
CEM II/A,B-S	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/A-D	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/A,B,PQ	x	x	x	x	x	x	x	x	x	-	x	-	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/A-V	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/B-V	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/A-W	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	-	-	-
CEM II/B-W	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	-	-	-
CEM II/A,B-T	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/A-L	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	-	-	-	x	x	x
CEM II/B-L	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM II/A-LL	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/B-LL	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM II/A-M	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x	x <sup>a(b)</sup>	x <sup>a(b)</sup>	x	x	x
CEM II/B-M	x	x	x	x	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	x <sup>(c)</sup>	-	-	-	x	x <sup>(d)</sup>	x <sup>(c)</sup>

**Poznámka k tabulce 4:**

**x** → cement je použitelný pro daný stupeň vlivu prostředí.

**x<sup>a),b),c),d)</sup>** → cement použitelný při splnění uvedených podmínek.

**-** → použití pro daný stupeň vlivu prostředí je vyloučeno.

**a)** Při chemické síranové agresivitě se stupněm vlivu prostředí vyšším než XA1 se musí použít SVC (síranovzdorný cement) cement podle ČSN 72 2103.

**b)** Pokud se jedná o stupeň XA2 až XA3 vyvolaný agresivním CO<sub>2</sub>, nepoužijí se portlandské směsné cementy CEM II, které obsahují vápenec jako hlavní složku.

**c)** Odolnost vůči působení vlivu prostředí musí být ověřena průkazní zkouškou.

**d)** Přípustné jen v případě, že obsah příměsí nepřesáhne 40 kg/m<sup>3</sup>.

## 2.10. Vyráběné portlandské směsné cementy cementárnou Prachovice

Sortiment portlandských směsných cementů vyráběných cementárnou Prachovice obsahuje 5 druhů cementů, vyráběných v pevnostních třídách 32,5, 42,5 a 52,5 (pevnost po 28 dnech, má být minimálně 52,5 MPa).

**Jedná se o tyto cementy:**

- **CEM II/(A, B)-S Portlandský cement struskový:**

Cement, kde je až 6 - 35 % portlandského slínku nahrazeno vysokopecní struskou, která pozitivně ovlivňuje plynulost nárůstu pevností a dosahování vyšších konečných pevností. Přídavek strusky snižuje počáteční pevnosti betonu a vývin hydratačního tepla, proto se tento cement hodí pro masivní konstrukce a objemné betonáže. Struska zvyšuje

odolnost betonu proti síranové korozi. Tento cement se vyrábí v pevnostních třídách 32,5R (R = rychle tuhnoucí), 42,5R, 52,5N (normálně tuhnoucí) [7]. Podrobné vlastnosti udává tabulka 5.

**Tabulka 5: Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/(A, B) – S [7].**

Období: 03 / 2012	Cement: CEM II / B - S 32,5 R				Cement: CEM II / A - S 42,5 R			Cement: CEM II / A-S 52,5 N		
	jedn.	průměr	min.	max.	průměr	min.	max.	průměr	min.	max.
FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI										
Specifický povrch	cm <sup>2</sup> /g	3920	3887	3944	3704	3559	3760	5537	5452	5633
Záměsová voda	%hm.	28.9	28.4	29.2	29.1	28.8	29.4	33.5	32.8	34.0
Počátek tuhnutí	min.	216	195	227	197	180	221	136	105	166
Doba tuhnutí	min.	369	321	402	313	265	331	250	221	296
Objemová stálost (Le Chat)	mm	1.0	1.0	1.0	0.3	0.0	1.0	0.5	0.0	2.0
PEVNOSTI										
Tlak 2-dny	MPa	20.1	18.8	21.0	29.6	29.0	30.4	29.0	28.3	30.3
Tlak 28-dny	MPa	48.8	47.6	49.6	53.8	52.7	54.8	39.2	37.9	41.1
Ohyb 2-dny	MPa	4.5	4.2	4.8	6.2	5.9	6.5	57.0	56.0	58.0
Ohyb 28-dny	MPa	9.2	8.9	9.8	9.6	9.2	10.1			
CHEMISMUS										
C <sub>3</sub> A (ve slínku )	%hm.	8.88	8.64	9.41	8.88	8.64	9.41	67.28	62.05	69.40
Ztráta žíháním	%hm.							7.99	7.78	8.47
Nerozpustný podíl	%hm.									
SO <sub>3</sub>	%hm.	3.04	2.96	3.13	3.34	3.25	3.42	2.95	2.82	3.14
Cl	%hm.	0.081	0.081	0.081	0.088	0.088	0.088	0.084	0.084	0.084
K <sub>2</sub> O	%hm.	0.75	0.74	0.76	0.76	0.75	0.78	0.61	0.57	0.74
Na <sub>2</sub> O	%hm.	0.34	0.33	0.34	0.31	0.30	0.32	0.28	0.25	0.34
Na <sub>2</sub> O-ekvivalent	%hm.	0.83	0.82	0.84	0.82	0.80	0.83	0.68	0.63	0.83

- **CEM II/B-M (S-V) 32,5R Portlandský cement směsný**

Jedná se o cement, kde je 21 - 35 % portlandského slínku nahrazeno křemičitým popílkem. Křemičitý popílek snižuje počáteční pevnosti betonu. Přídavek popílku způsobuje plynulý a dlouhodobý nárůst pevností. Popílek zvyšuje odolnost betonu proti agresivním prostředím. Díky svému nízkému vývinu hydratačního tepla se hodí pro velkoobjemové a velkoplošné betonáže. Méně vhodný je pro užití, kde se požaduje rychlý nárůst pevností a vysoká odolnost proti mrazu [7]. Statistické hodnocení kvality cementu udává tabulka 6.

**Tabulka 6: Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/B-M (S-V)32,5R [7].**

Cement:				
Období: 03 / 2012 CEM II / B-M (S-V) 32,5 R				
	jedn.	průměr	min.	max.
<b>FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI</b>				
Specifický povrch	cm <sup>2</sup> /g	4004	3925	4082
Záměsová voda	%hm.	29.3	29.0	30.2
Počátek tuhnutí	min.	235	210	255
Doba tuhnutí	min.	387	326	467
Objemová stálost (Le Chat)	mm	0.7	0.0	1.0
<b>PEVNOSTI</b>				
Tlak 2-dny	MPa	17.8	15.8	19.4
Tlak 28-dny	MPa	46.0	43.5	49.0
Ohyb 2-dny	MPa	3.9	3.5	4.3
Ohyb 28-dny	MPa	8.6	8.3	9.1
<b>CHEMISMUS</b>				
C <sub>3</sub> A (ve slínku )	%hm.	8.88	8.64	9.41
Ztráta žíháním	%hm.			
Nerozpuštěný podíl	%hm.			
SO <sub>3</sub>	%hm.	2.92	2.79	3.12
Cl	%hm.	0.08	0.084	0.084
K <sub>2</sub> O	%hm.	0.86	0.74	0.94
Na <sub>2</sub> O	%hm.	0.32	0.31	0.33
Na <sub>2</sub> O-ekvivalent	%hm.	0.89	0.82	0.95

- **CEM II/A-LL 42,5R Portlandský cement s vápencem:**

Cement, kde je až 20 % portlandského slínku nahrazeno jemně mletým vápencem s celkovým obsahem organického uhlíku do 0,2 % hmotnosti vápence. Vápenec optimalizuje vlastnosti betonu. Vytváří hutnější strukturu betonu, tím kladně ovlivňuje jeho trvanlivost. Vápenec vnáší krystalizační zárodky do cementového tmelu, tím urychluje hydrataci Alitu (C<sub>3</sub>S) a trikalciualuminátu (C<sub>3</sub>A). To se může projevit vyšší krátkodobou pevností v tlaku (24 hodin). Negativně pak může vápenec ovlivnit pevnosti konečné. Vápenec dále zlepšuje reologii čerstvého betonu (lepší zpracovatelnost, zabraňuje segregaci). Stabilizuje barevnost betonu [7]. Statistické hodnocení kvality cementu udává tabulka 7.

**Tabulka 7: Statistické hodnocení kvality cementu CEM II/A-LL 42,5R [7].**

Cement:				
Období: 03 / 2012 CEM II / A-LL 42,5 R				
	jedn.	průměr	min.	max.
<b>FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI</b>				
Specifický povrch	cm <sup>2</sup> /g	4347	4190	4485
Záměsová voda	%hm.	28.5	28.2	28.8
Počátek tuhnutí	min.	179	160	206
Doba tuhnutí	min.	282	255	306
Objemová stálost (Le Chat)	mm	0.5	0	1
<b>PEVNOSTI</b>				
Tlak2-dny	MPa	29.9	27.6	30.9
Tlak 28-dny	MPa	52.4	50.0	55.3
Ohyb 2-dny	MPa	6.2	5.9	6.5
Ohyb 28-dny	MPa	9.1	8.8	9.5
<b>CHEMISMUS</b>				
C <sub>3</sub> A (ve slínku )	%hm.	8.88	8.64	9.41
Ztráta žíháním	%hm.	5.02	4.49	5.75
Nerozpuštěný podíl	%hm.			
SO <sub>3</sub>	%hm.	3.37	3.30	3.47
Cl	%hm.	0.079	0.079	0.079
K <sub>2</sub> O	%hm.	0.73	0.68	0.77
Na <sub>2</sub> O	%hm.	0.25	0.23	0.26
Na <sub>2</sub> O-ekvivalent	%hm.	0.73	0.70	0.76

### 3. TRVANLIVOST BETONU

Beton použitý v konstrukci je vystaven působení různých druhů vnějšího prostředí, které může působit na tento beton korozivně. Schopnost odolávat korozivním vlivům nazýváme trvanlivost. Trvanlivostí betonu tedy rozumíme jeho odolnost vůči klimatickým vlivům, stárnutí, únavě a opotřebení. U betonu především sledujeme jeho trvanlivost při nízkých teplotách (mrazuvzdornost), či jeho odolnost proti působení atmosféry (kyselá dešť apod.) [8].

**Podle charakteru jejich účinku vlivy na trvanlivost betonu rozdělujeme [9]:**

- Chemické (kapalné, plynné prostředí).
- Biologické (makroskopické a mikroskopické).
- Fyzikální (změny teploty a vlhkosti).
- Mechanické (dynamické, či mechanické namáhání).

**Druhy agresivního prostředí dělíme [9]:**

- Plynné prostředí.
- Kapalné prostředí.
- Tuhé prostředí (hygroskopické látky).
- Biologické vlivy.
- Bludné proudy.

#### 3.1. Chemická koroze betonu

Chemické prostředí lze rozdělit podle skupenství na prostředí plynná, kapalná a pevná. Působením chemicky agresivních látek jsou buď postupně vymývány pojivové složky, případně dochází v mikrostruktuře betonu ke vzniku značně objemných krystalických novotvarů, které svými expanzními tlaky narušují strukturu betonu a jsou tak příčinou jeho degradace. Beton je napadán řadou látek, které působí na jeho strukturu a vlastnosti. Nejslabším místem v betonovém kompozitu je cementový kámen. Z hlediska životnosti železobetonových konstrukcí je velmi podstatná skutečnost, že v důsledku těchto negativních procesů postupně klesá hodnota pH betonu a tento jev snižuje schopnost betonu pasivovat výztuž vůči korozi [9].

### **3.1.1. Degradace betonů vlivem působení agresivního plynného prostředí - atmosférická koroze**

Degradace betonu je postupné a trvalé narušování a znehodnocování základních vlastností betonu, které mohou vést až k jeho rozpadu. V atmosféře je obsaženo mnoho plynných exhalací, které působí korozivně na betonové konstrukce, jež jsou s těmito exhalacemi v kontaktu [9].

#### **Druhy agresivních plynů a par v atmosféře:**

- Oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ).
- Oxid siřičitý ( $\text{SO}_2$ ), resp. Oxid sírový ( $\text{SO}_3$ ).
- Sulfan ( $\text{H}_2\text{S}$ ).
- Oxidy dusíku ( $\text{N}_x\text{O}_y$ ).
- Ostatní ( $\text{HCl}$ ,  $\text{HF}$ ,  $\text{NH}_3$ ).

Koncentrace jednotlivých uvedených plynů v atmosféře a tedy míry její agresivity vůči betonu zpravidla velmi úzce souvisí s průmyslovou výrobou. Koncentrace oxidu uhličitého v atmosféře je cca 60 mg  $\text{CO}_2$  na 1 m<sup>3</sup> vzduchu. Koncentrace oxidu siřičitého  $\text{SO}_2$  v přírodním prostředí nepřesahuje 0,01 mg  $\text{SO}_2$  v 1 m<sup>3</sup> vzduchu. V zimních měsících koncentrace  $\text{SO}_2$  vzrůstá a to především ve větších městech. Nejvyšší přípustná koncentrace oxidu siřičitého je 0,15 mg  $\text{SO}_2$  a nárazově až 0,5 mg  $\text{SO}_2$  na 1 m<sup>3</sup> vzduchu. Vlivem nedávného odsíření energetických zdrojů v České republice obsah oxidu siřičitého v atmosféře má celkově sestupnou tendenci. Původcem těchto plynných škodlivých emisí jsou především spalovací procesy (elektrárny) [9].

#### **3.1.1.1. Koroze betonu vlivem $\text{CO}_2$ - Karbonatace**

Jedním z činitelů, který může podstatně omezovat trvanlivost betonových konstrukcí, je působení atmosférického oxidu uhličitého ( $\text{CO}_2$ ). Jeho pronikání do betonu a účinky na strukturu jsou ovlivňovány druhem hydratačních produktů pojiv, pórovitě kapilární strukturou cementového tmelu, ale i povrchovými úpravami betonových ploch konstrukcí.

Oxid uhličitý způsobuje při styku se zásaditým cementovým tmelem neutralizační reakci, kterou označujeme jako karbonataci (produktem reakce jsou karbonáty). Průběh této reakce můžeme indikovat změnou hodnoty pH mezizrnečného roztoku, to však není jednoznačné, neboť dlouhodobou hydratací hrubších zrn cementového slínku, dochází k tvorbě hydroxylových iontů a tím se hodnota pH v mezizrnečném roztoku zvyšuje. Neutralizační reakcí vznikající nerozpustný  $\text{CaCO}_3$  se usazuje v pórech a kapilárách

a postupně je zaplňuje. Tím se omezuje přísun dalšího  $\text{CO}_2$ , resp. iontů, které vytvářejí další korozní novotvary. Vyplnění pórů a kapilár v povrchové vrstvě způsobuje zvýšení objemové hmotnosti, pokles propustnosti (kladný efekt pro ochranu výztuže v betonu), změny v mikrostruktuře cementového tmelu [9].

### **Průběh karbonatace:**

Celý proces karbonatace lze rozdělit do čtyř etap. V první etapě karbonatace se přeměňuje  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  popř. jeho roztok, v mezizrnečném prostoru na nerozpustný  $\text{CaCO}_3$ , který přitom částečně zaplňuje póry a kapiláry. Ve druhé etapě probíhají přeměny ostatních hydratačních produktů cementu ( $\text{C}_x\text{AH}_y$ ,  $\text{C}_x\text{SH}_y$ ). Vznikají modifikace  $\text{CaCO}_3$  společně s amorfním gelem kyseliny křemičité. Vlastnosti betonu se v této fázi příliš nemění. Třetí etapa karbonatace se vyznačuje překrystalizováním dříve vzniklých uhličitanových novotvarů, a to z mezizrnečného roztoku. Vznikají velmi početné a velmi rozměrné krystaly kalcitu a aragonitu. Mechanické vlastnosti betonu se zhoršují. V čtvrté etapě je stupeň karbonatace téměř stoprocentní (Tabulka 8). Hrubé krystaly aragonitu a zejména kalcitu prostupují celou strukturou cementového tmelu. Následkem je ztráta soudržnosti a pevnosti. Hodnota pH je velmi nízká, dochází tím k výrazné korozi výztuže [9].

**Tabulka 8: Mezní hodnoty pro zařazení betonu do etapy karbonatace [9].**

<b>Etapa karbonatace</b>	<b>Stupeň karbonatace<sup>1)</sup></b>	<b>Stupeň modifikační přeměny<sup>2)</sup></b>	<b>pH</b>
I	< 55	> 0,5	> 10,6
II	55 – 73	0,5 – 0,4	10,8 – 9,6
III	73 – 85	0,4 – 0,8	9,6 – 8,0
IV	> 85	> 0,8	< 8,0

### **Poznámka:**

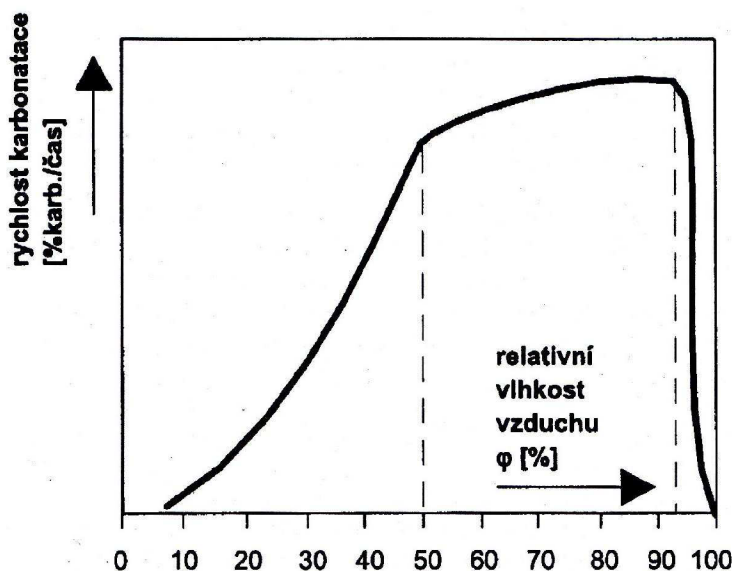
<sup>1)</sup> Stupeň karbonatace °K [%] se určí výpočtem z obsahu  $\text{CaO}$  a  $\text{SO}_3$ , nalezených chemickým rozborem podle ČSN 72 0113 a ČSN 72 0117 a z obsahu  $\text{CO}_2$ , vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný  $\text{CaCO}_3$ .

<sup>2)</sup> Stupeň modifikační přeměny °MP se určí výpočtem z obsahu  $\text{CO}_2$  vázaného na jemnozrnný a hrubozrnný  $\text{CaCO}_3$ .

Vliv tohoto korozního prostředí musíme sledovat u železobetonových konstrukcí, kde pokles hodnoty pH, způsobí omezení pasivace ocelové výztuže a tím její korozi. Korozí vznikají oxidy železa o vyšším objemu, což má za následek porušení krycí vrstvy. Agresivní prostředí se tak dostává hlouběji do struktury betonu, rychlost koroze se tak zvyšuje [9].



Karbonatace je podmíněna přítomností pórů a kapilár v struktuře betonu, vlhkostí (úplně vysušený beton s  $\text{CO}_2$  nereaguje), a přítomností  $\text{CO}_2$ . Rychlost karbonatace závisí na relativní vlhkosti vzduchu a koncentraci  $\text{CO}_2$ , popřípadě na rozložení pórů a kapilár v struktuře betonu. Závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti popisuje Graf 2 [9].



Graf 2: Závislost rychlosti karbonatace na relativní vlhkosti vzduchu [9].

### 3.1.1.2. Atmosférická koroze betonu oxidem siřičitým – sulfatace betonu

Sulfatací dochází k postupné přeměně struktury betonu. Kvantitativní a kvalitativní zastoupení meziproductů sulfatace a rychlost sulfatace je závislá na relativní vlhkosti prostředí, vlhkosti betonu a koncentraci  $\text{SO}_2$ . Působením  $\text{SO}_2$  dochází až k úplnému rozkladu struktury betonu. Primárně vznikajícím produktem koroze je hemihydrát síranu vápenatého ( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ), který při dalším postupu sulfatace oxiduje na sádrovec ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Meziproductem koroze je hemihydrát siřičitanu vápenatého ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). Dalšími produkty jsou hemihydrát a dihydrát síranu vápenatého. Vlhkost silně podmiňuje množství a tvary krystalů konečného produktu sádrovce, což výrazně působí i na hodnotu pH. V důsledku sulfatace klesá pH až na hodnotu 5,4. Při vyšší vlhkosti převládá vznik sádrovce, při nižší hemihydrátu siřičitanu vápenatého ( $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ ). Vyšší koncentrace  $\text{SO}_2$  naopak podmiňuje vznik sulfátů vápenatých, kde hodnota vlhkosti je rozhodující pro tvorbu dihydrátu či hemihydrátu [9].

#### Průběh sulfatace:

Průběh sulfatace betonu lze rozdělit do čtyř etap, které jsou analogií etap průběhu karbonatace. V prvním období se přeměňuje roztok  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  v mezizrnném prostoru na  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$  (hemihydrát siřičitanu vápenatého), ten zaplňuje póry. Zaplněním pórů se

zvyšuje hutnost betonu a tím se zvyšuje i jeho pevnost, naproti tomu se snižuje hodnota pH. V druhé etapě probíhají přeměny hydratačních produktů cementu s vzniklými karbonatačními novotvary. Produkty sulfatace nadále zaplňují póry betonu. Překrystalizování primárně vzniklého  $\text{CaSO}_3 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , respektive  $\text{CaSO}_4$  na objemově rozměrné krystaly  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (dihydrát síranu vápenatého = sádrovec) charakterizuje etapu třetí. Takto vzniklý sádrovec zcela zaplňuje póry, tím je dosaženo nejvyšších pevností. Na konci třetí etapy pevnosti prudce klesají. Čtvrtá etapa se vyznačuje ztrátou soudržnosti betonu a tím tvorbou trhlinek v struktuře cementového tmelu. Vznikají hrubé krystaly sádrovce, které strukturou cementového tmelu prorůstají [8]. Při střídavém provlhčování lze zaznamenat ještě páté stádium, které je charakteristické zřetelným rozpadem betonu v důsledku vzniku bisulfátu (ettringitu), resp. monosulfátu vápenatého. Tato etapa může nastat přímo i po třetí etapě [9].

### **3.1.1.3. Synergická koroze směsí plynů $\text{CO}_2$ a $\text{SO}_2$**

Při spolupůsobení plynů  $\text{CO}_2$  a  $\text{SO}_2$  dochází k synergické korozi betonu. Směs plynů lépe vystihuje reálné atmosférické podmínky v ovzduší, které působí na betonové konstrukce. Ve struktuře karbonatovaného betonu dochází k rozkladu kalcitu, jakožto hlavního produktu karbonatace. Po karbonataci probíhá siřičitanová koroze, která podstatně mění fyzikálně mechanické vlastnosti betonu. V povrchových vrstvách betonu dochází k přeměnám základního materiálu na sulfáty (sádrovce). Přeměna karbonátů na sulfáty probíhá postupně směrem od povrchu do středu betonu. Oxid siřičitý napadá také produkty karbonatace a vlivem zvětšeného objemu dochází k dokonalejšímu utěsnění pórů. Přímé synergické působení směsí plynů je charakterizováno rychlejší degradací výchozího materiálu. Výrazně se také projevuje synergické působení kyselinotvorných plynů na hodnoty pH. Rozhodující vliv na jejich pokles má koncentrace korozních plynů v ovzduší [9].

### **3.1.2. Degradace betonů vlivem působení agresivního kapalného prostředí**

Vlivu agresivního kapalného prostředí jsou vystaveny konstrukce exteriérové, užitkové (bazény, nádrže) či konstrukce se stykem s půdou (základové konstrukce). Korozním médiem mohou být agresivní vody, minerální tuky a oleje, organické sloučeniny. Degradaci betonu z hlediska působení kapalného prostředí ovlivňuje vliv tekoucí nebo stojaté kapaliny, vliv jednostranného nebo všestranného tlaku kapaliny, teploty prostředí a působení jednotlivého agresivního činitele nebo synergické působení [9].

### **Degradace betonu kapalným prostředím může probíhat třemi způsoby:**

- Kapaliny (vody) způsobující korozi I. typu.
- Kapaliny způsobující korozi II. typu.
- Kapaliny způsobující korozi III. typu.

#### **3.1.2.1. Kapaliny (vody) způsobující korozi I. typu**

Vody, které mají malou přechodnou i trvalou tvrdost (měkké vody), způsobují korozi I. typu. Přechodná tvrdost vody je způsobena kyselým uhličitanem vápenatým a hořečnatým. Jejich rozpustnost je dána obsahem oxidu uhličitého. Při zvýšeném obsahu CO<sub>2</sub> ve vodě dochází k přechodu CaCO<sub>3</sub> do roztoku dle rovnice:



Takovéto „hladové“ vody rychle vyluhují Ca(OH)<sub>2</sub> obsažený ve struktuře betonu. Dále pomalu dochází k rozkladu zhydratovaných křemičitanů a hlinitanů. Vyloužení Ca(OH)<sub>2</sub> způsobuje pokles hodnoty pH, to má negativní vliv na stabilitu některých zhydratovaných slínkových minerálů. Průběh koroze závisí na kinetickém stavu vody (jestli je stojatá, či proudící), dále závisí na teplotě vody [8].

#### **3.1.2.2. Kapaliny způsobující korozi II. typu**

Kapaliny, které s cementovým tmelem vytvářejí rozpustné sloučeniny, způsobují korozi II. typu. Tyto sloučeniny buď jádro betonu obalují, nebo se zvolna vodou uvolňují. Jedná se o roztoky obsahující ionty SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>+2</sup>, (HCO<sub>3</sub>)<sup>-</sup>, (NH<sub>4</sub>)<sup>-</sup>. Patří sem i přírodní vody obsahující CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O, MgSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O [8].

#### **3.1.2.3. Kapaliny způsobující korozi III. typu**

Vody se sloučeninami síranů a chloridů reagují s cementovým tmelem a vytvářejí tím látky se zvětšeným objemem. To se zpočátku projeví zvýšením pevnosti, vlivem zvýšení hutnosti betonu. Další zvětšování objemu reakčních zplodin způsobuje narušení struktury betonu. Tyto agresivní vody rozdělujeme do dvou kategorií:

- Slabě agresivní (≥ 300 mg solí/litr, pH ≤ 6).
- Velmi agresivní (≥ 1000 mg solí/litr, pH ≤ 5).

### 3.1.3. Degradace betonů vlivem působení koroze tuhými látkami

Ve vlhkém prostředí některé tuhé látky způsobují analogickou korozi s korozí kapalinami. Jsou to většinou látky hygroskopické (přijímají vlhkost ze vzduchu). Při působení těchto látek mohou v betonu vznikat chemické sloučeniny se značnými korozními tlaky v závislosti na koncentraci dané látky a na teplotě [8].

### 3.2. Biologická koroze betonu

Výskyt biologické koroze a napadání povrchu betonu organismy je podmíněno vlhkostí a teplotou, popřípadě pH. Na korozi betonu se mohou za určitých podmínek podílet sírné, nitrifikační i železité bakterie [8].

Vlivem bakterií ve stojatých vodách nebo půdách se přeměňuje v nich obsažená síra na sulfan ( $H_2S$ ), který v přítomnosti kyslíku oxiduje na agresivní kyselinu sírovou. Pokud nedochází k přístupu vzduchu, odebírají anaerobní mikroorganismy kyslík ze síranů ve vodě rozpuštěných. Tím redukují nebezpečnou kyselinu sírovou na relativně neškodný sulfan [8].

Nitrifikační bakterie se vyskytují v amoniakálním prostředí (chlěvy) a oxidují amoniak až na kyselinu dusičnou, která vyluhuje cementový tmel. Na povrchu betonu se mohou tvořit plísně, které jsou pouze estetickými defekty. Pod vodní hladinou rostou řasy vyvolávající v trhlinách napětí [8].

### 3.3. Fyzikálně mechanické vlivy na trvanlivost betonu

Trvanlivostí betonu proti mechanicko-fyzikálním vlivům rozumíme odolnost betonu proti působení mrazu, vysokých teplot, obrusu (popř. kavitaci).

Z tohoto hlediska hodnotíme u betonu:

- **Mrazuvzdornost betonu** = schopnost betonu ve vodném nasyceném stavu odolávat opakovanému zmrazování a rozmrazování. V kapilárách a pórech vznikající led (má o cca 9 % větší objem) vytváří krystalický tlak na stěny až 200 MPa. Rozhodujícími činiteli je stáří betonu, množství a velikost (průměr) pórů a kapilár, provzdušnění betonu, pevnost betonu, stupeň nasycení kapilární pórovitosti vodou.

- **Požární odolnost** = odolnost betonu proti působení vysokých teplot.

Degradace betonu při teplotách nad 150 °C je způsobena rozdílnou teplotní roztažností kameniva, cementového kamene a oceli. Při teplotách 350-650 °C se uvolňuje chemicky vázaná voda. Při teplotě 573 °C probíhá modifikační přeměna křemene ( $\alpha$ -křemen na

tridymit) doprovázená nárůstem objemu křemene. Se vzrůstající teplotou klesá pevnost betonu.

- **Obrusnost** = trvanlivost betonu proti dlouhodobému působení tangenciálních sil na povrch betonu, který vytváří třecí předměty. Obrusnost je závislá na petrografickém druhu použitého kameniva a téměř nezávislá na pevnosti betonu [5; 8].

### 3.4. Degradace betonů vlivem chloridů

Chloridy jsou soli kyseliny chlorovodíkové. Chloridy se mohou vyskytovat v přírodních vodách, ale i ve vodách průmyslových. Největším zdrojem chloridů v přírodních vodách jsou vody mořské. Ve vnitrozemských státech se chloridy vyskytují především ve vodách zasažených průmyslovou činností. K intenzivnímu působení chloridů na betonové konstrukce u nás dochází především u dopravních staveb při používání chloridů jako chemických rozmrazovacích látek [8].

Míra agresivity chloridů vůči betonovým konstrukcím je dána především druhem aniontu, na který je chlor vázán. Například chlorid manganatý při působení na železobetonové konstrukce nevykazuje prakticky žádné negativní účinky. Jiné druhy chloridů (např. chlorid draselný nebo chlorid sodný) mohou při kontaktu s železobetonovou konstrukcí vyvolávat určitou míru intenzivní degradace. Většina chloridů je dobře rozpustná ve vodě a roztoky chloridů dobře smáčí beton. Z toho důvodu roztoky chloridů dobře pronikají do struktury cementového kompozitu, což má za následek zvyšující se negativní účinek chloridů na strukturu betonu [8].

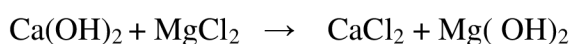
V důsledku interakce chloridů s betonem dochází ke korozi III. typu, což znamená, že v mikrostruktuře betonu dochází ke vzniku objemných krystalických novotvarů, které svými expanzními tlaky narušují strukturu betonu. Vznik krystalických novotvarů v mikrostruktuře betonu může být způsobeno dvěma odlišnými mechanismy. Jedním z těchto mechanismů jsou reakce mezi chloridy a cementovou maticí, přičemž produktem těchto reakcí může být Friedlova sůl. Druhým mechanismem je fyzikální jev, při kterém dochází ke kapilárnímu nasávání roztoků solí do pórů cementového kamene za současného vypařování vody. Tento jev může mít za následek vznik tahových napětí ve struktuře betonu. Při vzniku krystalů v omezeném prostoru pórové struktury betonu dochází k nežádoucím tlakům, které rozrušují beton [10].

### 3.5. Degradace betonů vlivem vápenatého rozpínání

V cementu se může nacházet volné CaO, které velice pomalu hydratuje a tím může v betonu být v nezhydratované podobě. Při následné postupné hydrataci vlivem vlhkosti, dochází k vzniku Ca(OH)<sub>2</sub> (hydroxid vápenatý) na povrchu zrn CaO. Hydroxid vápenatý zaujímá až o 170 % větší objem než CaO a tato změna vlivem krystalizačních tlaků může vést k degradaci (roztržení) betonu [8].

### 3.6. Degradace betonů vlivem hořečnatých iontů

Degradace betonu hořečnatými ionty patří do skupiny koroze II. typu. K čisté hořečnaté korozi betonu dochází účinkem rozpustných hořečnatých solí s výjimkou MgSO<sub>4</sub>. Reakcí těchto solí s Ca(OH)<sub>2</sub> cementového kamene dochází k substitučním reakcím typu:



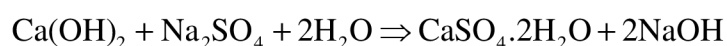
Vzhledem k malé rozpustnosti vznikajícího Mg(OH)<sub>2</sub> dochází k převedení veškerého Ca(OH)<sub>2</sub> na dobře rozpustnou vápenatou sůl, která je z betonu vyluhována. Hydroxid hořečnatý nemá vazné vlastnosti a na pevnosti betonu se tedy nepodílí. Poklesem hodnoty pH pórové kapaliny jsou vytvořeny podmínky pro postupný hydrolytický rozklad hydrosilikátů a hydroaluminátů vápenatých, který vede k rozrušení cementového kamene [11].

#### Hořečnaté rozpínání:

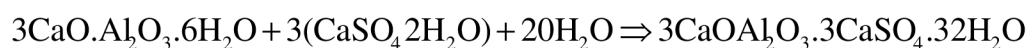
Podstatou hořečnatého rozpínání je pomalá hydratace MgO (periklasu) na Mg(OH)<sub>2</sub> (hydroxid hořečnatý), který má oproti původním minerálům až o 150 % větší objem. Proto norma předepisuje, že obsah MgO (oxid hořečnatý) má být ve slínku maximálně 6 %. Tento typ rozpínání oproti vápenatému rozpínání probíhá delší dobu, vlivem pomalejší hydratace MgO [8].

### 3.7. Degradace betonů vlivem síranů:

Koroze betonu vyvolaná působením síranů patří k typickým příkladům koroze III. typu. Síranová koroze může být vyvolána přírodními i průmyslovými vodami se zvětšeným obsahem iontů SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Reakcí Ca(OH)<sub>2</sub> a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> dochází k tvorbě sádrovce, přičemž tento proces lze vyjádřit rovnicí:



Vzniklý sádrovec dále reaguje s vysoce zásaditými vápenatými hydroalumináty za vzniku ettringitu (3CaO.Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O), přičemž reakce lze vyjádřit rovnicí:



Málo rozpustný ettringit při svém vzniku podstatným způsobem zvětšuje svůj objem a vyvolává nežádoucí tlaky ve stěnách pórů a kapilár což má za následek vznik trhlin a porušení. Chemické a mineralogické složení cementu má podstatný vliv na odolnost proti působení síranů. Vyšší obsah  $C_2S$  v cementu snižuje koncentraci vznikajícího  $Ca(OH)_2$  a tím zvyšuje odolnost proti síranům. Naopak vyšší obsah  $C_3S$  má negativní vliv na odolnost proti síranům. Zásadní vliv na odolnost betonu má také  $C_3A$  obsažený v cementu [8; 10].

### **3.8. Degradace betonů vlivem dusičnanů**

K degradaci betonu roztokem dusičnanů může dojít u konstrukcí, které přijdou do styku s posypovými solemi, organickými zbytky (hřbitovy, konírny), průmyslovými hnojivy. Princip degradace betonu dusičnany je založen na tvorbě (rekrytalizaci) krystalků dusičnanových solí ve formě tzv. výkvětů. Dusičnanové anionty obsažené v roztoku jsou transportovány pórovou strukturou betonu z míst s vyšší koncentrací roztoku do „sušších“ částí, kde dochází k jejich rekrytalizaci, příp. hydrataci. Rekrytalizace i hydratační změny dusičnanové soli v pórovém systému jsou doprovázeny expanzními tlaky, které se pohybují řádově v desítkách MPa. Pokud tyto síly překročí tahovou pevnost betonu, dojde k destrukci materiálu [12].

### **3.9. Trvanlivost betonů s portlandskými směsnými cementy**

Portlandské směsné cementy umožňují kombinaci více hlavních složek obsažených v cementu. Díky tomu se může využít kladných atributů jednotlivých hlavních složek, k dosažení požadovaných vlastností finálního kompozitu. Vlastnosti a chování betonů vyrobených z těchto druhů cementů nejsou dostatečně deklarovány, proto nejsou tyto cementy příliš akceptovány pro užití v praxi.

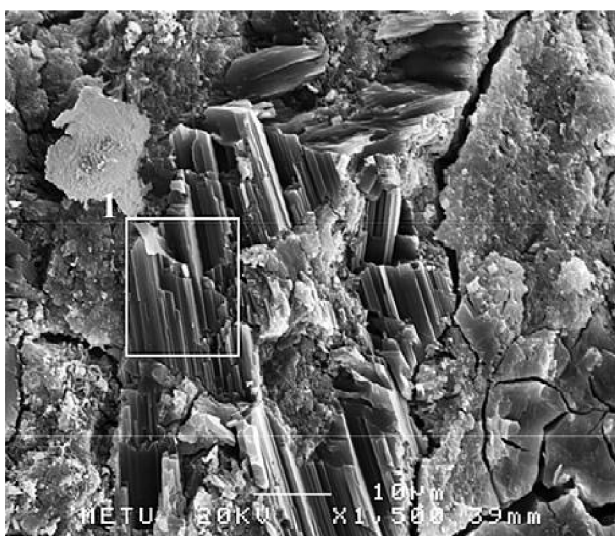
#### **Trvanlivost portlandských cementů s vápencem v prostředí síranů:**

Studie Národní technické univerzity v Athénách [13] prokázala nižší trvanlivost u betonů vyrobených z portlandských cementů s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) v agresivním prostředí síranů, oproti referenčnímu betonu vyrobeného z portlandského cementu (CEM I 32,5) [13].

Betonové vzorky byly uloženy po dobu 540 dní v roztoku 5 %  $Na_2SO_4$ . Referenční betonové vzorky byly uloženy v nasyceném roztoku  $Ca(OH)_2$ . Na vzorcích se po 540 dnech provedlo stanovení pevnosti v tlaku a RTG analýza. Vzorky se v průběhu 540 dní vizuálně

kontrolovaly. Výsledky zkoušek a analýz byly srovnány s referenčními vzorky, které byly uloženy v nasyceném roztoku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [13].

Betonové vzorky vyrobené z portlandského cementu s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) vykazovaly makroskopické trhliny již po 6 měsících, kdy byly uloženy do 5 % roztoku  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pevnost v tlaku po 540 dnech se u betonů vyrobených z portlandského cementu s vápencem (CEM II/B-LL 32,5) snížila o 33 % oproti betonům uložených v referenčním prostředí nasyceného roztoku  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Snížení pevnosti v tlaku bylo nejspíše způsobeno degradací struktury betonu vlivem tvorby sádrovce (Obrázek 1) v struktuře betonu, která vykazovala vyšší pórovitost a tím i propustnost pro agresivní médium. Vznik ettringitu byl omezen nedostatkem  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ). U referenčních vzorků z portlandského cementu byl prokázán RTG analýzou vznik ettringitu (Obrázek 2). Vlivem kompaktní struktury a nízké pórovitosti vzorků vyrobených z portlandského cementu (CEM I 32,5) nedošlo k výraznějšímu vlivu prostředí (5 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) na mechanicko-fyzikální vlastnosti po době uložení 540 dní [13]. Závislost pevnosti v tlaku po 540 dnech na druhu použitého cementu a druhu prostředí ukazuje graf 3.

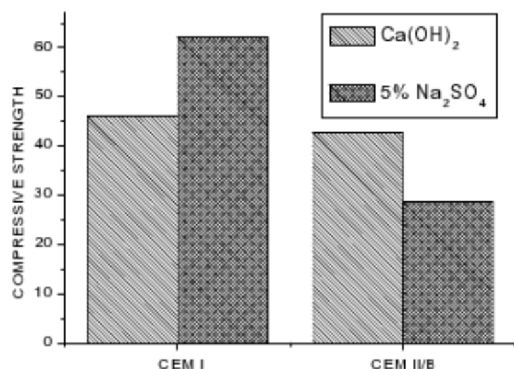


*Obrázek 1: Sádrovec [13].*



*Obrázek 2: Ettringit [13].*





**Graf 3: Závislost pevnosti v tlaku na druhu použitého cementu a prostředí [13].**

Portlandské cementy s popílky, či jinými přírodními pucolány, snižují potenciál pro vznik ettringitu v struktuře betonu při působení síranů, v důsledku snížení množství hydroxidu vápenatého  $\text{Ca(OH)}_2$  a  $\text{C}_3\text{A}$  ( $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) v betonu [14]. Z tohoto důvodu mají cementy s pucolány pozitivní vliv na odolnost betonu proti síranové korozi, neboť je omezen vznik sekundárního ettringitu.

Německá cementářská organizace provedla v roce 2005 studii portlandských cementů směsných (CEM II) [15]. Studie se zaměřila na sledování jejich vlastností, ale také na trvanlivost betonů vyrobených z těchto cementů při působení  $\text{CO}_2$ , chloridů a nízkých teplot. Ze závěru studie vyplývá, že nejefektivnější kombinace hlavních složek cementu je vápenec a granulovaná vysokopecní struska. Při přidání těchto složek do cementu vykazoval beton zvýšenou odolnost proti působení výše zmíněných agresivních prostředí [15].

## 4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Experimentální část této bakalářské práce je zaměřena na sledování vlastností betonů při působení vybraných agresivních prostředí. Konkrétně na betony, pro jejichž výrobu bylo použito portlandských cementů, portlandských cementů s vápencem, portlandských směsných cementů a vysokopecních cementů z produkce cementárny Prachovice.

V úvodu experimentální části jsou popsány laboratorní metody, které byly použity při zkoušení mechanických vlastností a trvanlivosti betonu v zatvrdlém stavu. Záměrem experimentální části je stanovení vlivu působení jednotlivých agresivních prostředí, na sledované vlastnosti betonu a tím ověření možnosti použití těchto betonů pro prostředí XA.

**Charakteristiku prostředí XA popisuje tabulka 6:**

**Tabulka 9: Charakteristika prostředí XA [6].**

označení stupně	popis prostředí	příklady výskytu
XA1	slabě agresivní chemické prostředí	nádrže čistíren odpadních vod, jímky odpadních vod (žumpy, septiky), základy staveb
XA2	středně agresivní chemické prostředí	části staveb v půdách agresivních vůči betonu, základy staveb
XA3	vysoce agresivní chemické prostředí	průmyslové čistírny odpadních vod s chemicky agresivními vodami; základy staveb, sklady chemických rozmrazovacích látek a umělých hnojiv, silážní jámy a krmné žlaby v zemědělství; chladič věže s odvodem kouřových plynů

### **Poznámka k tabulce 9:**

Ke stanovení příslušných stupňů vlivů musí být zvláštní studie, pokud:

- Hodnoty jsou mimo mezní hodnoty uvedené v tabulce 2 ČSN EN 206-1.
- Jsou přítomny jiné chemikálie.
- Zemina nebo voda chemicky znečištěná.
- Vysoká rychlost vody v kombinaci s chemikáliemi uvedené v tabulce 2 ČSN EN 206-1.

**Definice agresivního prostředí dle ČSN EN 206-1 udává tabulka 7:**

**Tabulka 10: Definice agresivního prostředí [6].**

chemická charakteristika	referenční zkušební metoda	XA1 slabě agresivní	XA2 středně agresivní	XA3 vysoce agresivní
voda:				
SO <sub>4</sub> <sup>II-</sup> (mg/l)	ČSN EN 196-2	≥ 200 ≤ 600	> 600 ≤ 3000	> 3000 ≤ 6000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ≥ 5,5	< 5,5 ≥ 4,5	< 4,5 ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> agr. (mg/l)	ČSN EN 13577	≥ 15 ≤ 40	> 40 ≤ 100	> 100 až k nasycení
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	ISO 7150-1 nebo	≥ 15 ≤ 30	> 30 ≤ 60	> 60 ≤ 100
Mg <sup>II+</sup> (mg/l)	ISO 7980	≥ 300 ≤ 1000	> 1000 ≤ 3000	> 3000 až k nasycení
půda:				
SO <sub>4</sub> <sup>II-</sup> mg/kg <sup>1,2</sup>	ČSN EN 196-2	≥ 2000 ≤ 3000 <sup>3</sup>	> 3000 ≤ 12000	> 12000 ≤ 24000
st. kyselosti	DIN 4030-2	> 20° Gula-Baumann		

**Poznámka k tabulce 10:**

- 1) Jílovité zeminy s propustností menší než 10<sup>-5</sup> m.s<sup>-1</sup> se řadí do nižšího stupně.
- 2) Zkušební metoda předepisuje vyluhování SO<sub>4</sub><sup>II-</sup> pomocí kyseliny chlorovodíkové. Jestliže jsou k dispozici zkušenosti v místě užití betonu, lze alternativně užít vodní extrakci.
- 3) Limit 3000 mg.kg<sup>-1</sup> se zmenší na 2000 mg.kg<sup>-1</sup> v případě nebezpečí hromadění síranových iontů v betonu v důsledku střídavého vysoušení a zvlhčování nebo kapilárního sání.

**4.1. Zkoušení korozní odolnosti betonu ČSN 73 1340**

Zkoušení korozní odolnosti betonu spočívá v porovnání hodnot sledovaných vlastností charakterizujících korozní odolnost zkušebních vzorků uložených do agresivního prostředí s hodnotami sledovaných vlastností paralelních vzorků (referenčních), které byly uloženy v pitné vodě. Zkušebním vzorkem je krychle o hraně 150 mm. Doba trvání působení agresivního media se volí 1, 3, 6, 12 měsíců, při teplotě 20 ± 3 °C [16].

**Druhy korozních prostředí:**

- Koroze vyluhováním (voda s karbonátovou tvrdostí do 0,53mmol.l<sup>-1</sup>).
- Kyselá koroze pH = 3 ± 0,2 (přípustné i pH = 4 nebo 5).
- Uhličitá koroze, obsah aktivního CO<sub>2</sub> 80 ± 10 mg.l<sup>-1</sup> (40 mg.l<sup>-1</sup>).
- Hořčnatá koroze, obsah Mg<sup>2+</sup> 10 g.l<sup>-1</sup> (tolerance 5 %).
- Koroze amonnými solemi, obsah NH<sub>4</sub><sup>+</sup> 2 g.l<sup>-1</sup> (odchylka max. 5 %).
- Síranová koroze, obsah SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 10 g.l<sup>-1</sup> (odchylka 5 %).

Poměr objemu agresivního roztoku v mililitrech k 100 mm<sup>2</sup> povrchu vzorku musí být nejméně 5:1 [16].

#### **Metodika zkoušení:**

Zkušební betonové krychle o hraně 150 mm byly vyrobeny a dodány betonárnou Holcim a.s. do zkušebny Ústavu technologie stavebních hmot a dílců VUT v Brně. Betonové vzorky byly poté uloženy do nádob s agresivním prostředím, kde se ponechaly na dobu 90, 180, 360 dní. V těchto intervalech se na vzorcích provedly zkoušky pevnosti v tlaku, pevnosti v příčném tahu, stanovení objemové hmotnosti, hloubky průsaku tlakovou vodou. Na pomletých vzorcích odebraných při zkoušce pevnosti v tlaku se provedlo stanovení pH výluhu a vznik krystalizačních novotvarů RTG analýzou. Výsledky všech těchto zkoušek se porovnávaly s referenčními vzorky, které byly uloženy v prostředí referenčním.

Z výsledků můžeme usuzovat, jaký vliv mělo prostředí na vlastnosti vzorku. A tím stanovit jeho odolnost vůči danému agresivnímu prostředí.

#### **4.1.1. Korozní prostředí**

Pro experimentální zkoušení bylo zvoleno působení CO<sub>2</sub> s maximální vlhkostí vzduchu, roztoku SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, roztoku NO<sub>3</sub><sup>-</sup> a roztoku Mg<sup>2+</sup>. Tyto agresivní látky se reálně vyskytují a výraznou měrou ovlivňují vlastnosti betonu, který je vlivům těchto látek vystaven. Charakteristiky a koncentrace jednotlivých korozních prostředí jsou uvedeny níže:

##### **4.1.1.1. Plynné prostředí CO<sub>2</sub>**

Korozní plynné médium CO<sub>2</sub> bylo napuštěno z tlakové nádoby do uzavíratelné plastové nádoby s horním víkem. Maximální vlhkost vzduchu uvnitř nádoby je zajištěna roztokem připraveným z chemikálie K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (koncentrace 150 g/l » K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/voda), čímž by měla být dosažena 97 % vlhkost vzduchu uvnitř nádoby.

##### **4.1.1.2. Kapalně prostředí SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, kapalně prostředí NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, kapalně prostředí Mg<sup>2+</sup>**

Korozní kapalně prostředí byla připravena jako nasycené roztoky rozpuštěním chemikálií ve vodě z vodovodního řádu do uzavíratelných plastových nádob s horním víkem.

Nasycený roztok SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> je připraven z chemikálie Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (koncentrace 161 g/l » Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/voda). U tohoto agresivního média bylo naměřeno pH o hodnotě 9, což značí slabě zásaditý roztok.

Nasyčený roztok  $\text{NO}_3^-$  je připraven z chemikálie  $\text{KNO}_3$  (koncentrace 320 g/l »  $\text{KNO}_3/\text{voda}$ ). U tohoto agresivního média bylo naměřeno pH o hodnotě 6, což značí neutrální roztok.

Nasyčený roztok  $\text{Mg}^{2+}$  je připraven z chemikálie  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (koncentrace 399 g/l »  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}/\text{voda}$ ). U tohoto agresivního média bylo naměřeno pH o hodnotě 5, což značí slabě kyselý roztok.

#### 4.1.1.3. Referenční prostředí

Betonové srovnávací (referenční) vzorky jsou uloženy ve vodě z vodovodního řádu do uzavíratelných plastových nádob s horním víkem.

## 4.2. Fyzikálně-mechanické zkoušky

### 4.2.1. Stanovení pevnosti v tlaku

Stanovení pevnosti v tlaku se nejčastěji provádí na zkušebních tělesech tvaru krychle o hraně 150 mm, nebo na válci o průměru 150 mm. Dle ČSN EN 12390 je postup stanovení pevnosti v tlaku následující.

Zkontrolují se rozměry zkušebního tělesa (přesnost 1 mm), úhly a rovinnost tlačných ploch. Pokud rovinnost tlačných ploch nevyhovuje, musí se na požadovanou rovinnost (ISO 1920) upravit zbrúšením, či řezáním. Tlačné plochy zkušebního vzorku jsou kolmé ke směru hutnění. Vzorky se zváží (přesnost  $\pm 0,25\%$ ) a umístí se do středu tlačné plochy lisu (max. odchylka 0,01 hrany zkušebního tělesa). Zkušební lis má umožnit odečítání síly při zlomu (přesnost  $\pm 1\%$ ). Tlačné plochy zkušebního lisu jsou broušené desky s tvrdostí povrchu  $\geq 55$  HRC (zkouška tvrdosti dle Rockwella), horní deska má kloubové uložení. Zkušební vzorek se plynule zatěžuje rychlostí  $0,6 \pm 0,4 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$  (betony nižších pevností se zatěžují nižší rychlostí). Pevnost v tlaku je poměr odečtené síly na lisu při zlomu  $F$  [N] k tlačné ploše vzorku  $S$  [ $\text{mm}^2$ ]. Vypočítaná hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na  $0,5 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$  ( $\text{N} \cdot \text{mm}^{-2} = \text{MPa}$ ) [16; 17].

$$f_c = \frac{F}{S} [\text{N} \cdot \text{mm}^2] = [\text{MPa}]$$

#### 4.2.2. Stanovení pevnosti v příčném tahu

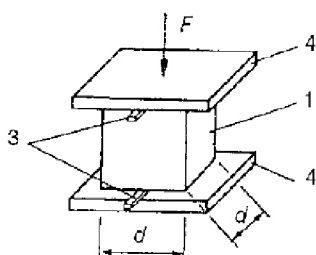
Zkoušené těleso (krychle o hraně = 150 mm) se změří (přesnost 1 mm) a zváží jeho hmotnost pro stanovení objemové hmotnosti. Poté se krychle umístí do lisu. Pod horní zatěžovací desku se umístí zatěžovací segment (tvaru useče kruhu o poloměru 75 mm). Roznášející proužky (šířka  $15 \pm 2$  mm, tloušťka  $4 \pm 1$  mm, délka zkušební tělesa) musí být přesně nad sebou. Rychlost zatěžování je  $0,06 \pm 0,04$  MPa.s<sup>-1</sup> a doba zkoušky musí být nejméně 30 s [16; 17]. Schéma zatěžování znázorňuje obr. 3.

**Pevnost v příčném tahu  $f_{ct}$  [MPa] je dána vztahem:**

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot l \cdot d} [\text{N} \cdot \text{mm}^{-2}] = [\text{MPa}]$$

F=maximální zatížení [N], l=délka dotykové přímky tělesa [mm], d=příčný rozměr tělesa [mm], výsledek se zaokrouhlí na 0,05MPa.

**Obrázek 3: Zatěžovací schéma [20].**



1-zkušební krychle, 3-roznášecí kroužky, 4-zatěžovací deska.

#### 4.2.3. Stanovení hloubky průsaku tlakovou vodou

Dle ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu - Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou. Zkušební vzorky (krychle o hraně 150 mm) se umístí do vodo-tlačného přístroje, který po dobu  $72 \pm 2$  hodin na povrch krychle bude působit tlakem vody  $500 \pm 50$  kPa. Po skončení se na krychlích provede zkouška stanovení pevnosti příčným tahem a zjistí se nejvyšší hloubka průsaku vody. Ze zkoušky můžeme usuzovat hutnost betonové struktury [18].

### 4.3. Provádění analýzy

#### 4.3.1. Metoda Rentgenové difrakční analýzy (RTG)

Metoda rentgenové difrakční analýzy slouží k stanovení mineralogického složení zkoumaných materiálů. Může být použita pro kvalitativní posouzení (tzn. stanovení, které

minerály jsou přítomny), tak i pro kvantitativní posouzení analyzovaného materiálu (tzn. stanovení množství jednotlivých fází ve vzorku). Pro kvantitativní stanovení se spíše využívá DTA analýzy (DTA = diferenční termická analýza). Rentgenové paprsky po průchodu, nebo po odrazu na krystalu dávají vznik difrakčnímu obrazu s charakteristickými maximy a minimy intenzity difrakčních skvrn. Tuto metodu lze tedy použít k stanovení mineralogického složení látek, které mají krystalický charakter [19].

K difrakci rentgenových paprsků na krystalické mřížce nastává v případě, že jejich dráhový rozdíl je roven celistvému násobku vlnové délky (je splněna Braggova podmínka) [19]:

$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin\theta \quad \text{kde } n = 1, 2, 3 \dots$$

$d$  = vzdálenost krystalových rovin.

$\theta$  = úhel difrakce rentgenového záření.

$\lambda$  = vlnová délka rentgenového záření.

Sledovanou závislostí je intenzita rentgenového záření dopadajícího na senzor a úhel difrakce. Výsledné spektrum se porovnává s databází krystalických minerálů (ASTM) a vyhodnocuje [19].

#### **Postup při rentgenové difrakční analýze:**

- Příprava vzorku.
- Vlastní RTG analýza.
- Vyhodnocení záznamu měření-rentgenogramu.

#### **Příprava vzorku:**

Vzorky pro rentgenovou difrakční analýzu je nutno převést do velmi jemného práškovitého stavu (velikost částic pod 63  $\mu\text{m}$ ). Takto upravený vzorek umístíme do nosiče. Zarovnání povrchu vzorku s povrchem nosiče se provede přitlačením krycího skla na vzorek. Převedením vzorku do jemně práškovitého stavu se docílí toho, že četnost krystalitů (mikroskopických zrn) orientovaných souhlasně s rovinou vzorku v nosiči je dostačující k průkazné analýze [19].

#### **Vlastní RTG analýza:**

Po zapnutí přístroje hlavním vypínačem se nastaví příslušné hodnoty napětí a proudu zdroje záření (rentgenky). Připravený vzorek se vloží do držáku v goniometru, manuálně se nastaví výchozí úhel a spínačem se uvede do činnosti zdroj záření. Posledním úkonem je synchronní zapojení chodu goniometru a spuštění záznamu na PC, kde se zaznamenává intenzita difraktovaného záření v závislosti na úhlu odrazu. Získaný záznam se označuje jako rentgenogram (difraktogram) [19].

### **Vyhodnocení rentgenogramu:**

Rentgenogramy se vyhodnocují převážně z hlediska kvalitativního (jaké krystalické fáze zkoušený vzorek obsahuje). Na ose X jsou vyneseny hodnoty úhlů difraktovaného záření a na ose Y jeho intenzita. Ostrá maxima intenzity, která indikují splnění Braggovy rovnice se označují termínem pík (linie, vrchol). Vyhodnocení se provádí vyznačením hodnot úhlů na ose X. Z hodnot úhlů na ose X se stanoví mezirovinné vzdálenosti jednotlivých píků rentgenogramu. Použitím kartotéky ASTM (American Society for Testing and Materials) se ze stanovených mezirovinných vzdáleností jednotlivých píků určí minerály obsažené ve zkoumaném vzorku [19].

### **4.3.2. Stanovení pH betonu**

Hodnota pH betonu je důležitou informací, pro železobetonové konstrukce, které jsou vystavené působení agresivního prostředí. Koroze výztuže neprobíhá, pakliže hodnota pH neklesne pod hodnotu 9,6. Při stanovení hodnoty pH ve výluhu se standardně určené množství odebraného vzorku ponechá vyluhovat v exaktně stanoveném objemu destilované vody po danou dobu. Na takto připraveném výluhu se následně provede stanovení hodnoty pH. Pro zkoušku se použije vzorek rozetřený a prosátý sítem o velikosti otvorů 0,063 mm. Podíly prošlé sítem se zhomogenizují, vysuší a 2 g se použijí pro stanovení pH.

### **4.4. Charakteristika zkušebních vzorků**

Betonové vzorky (krychle o hraně 150 mm) byly vyrobeny na betonárně firmy Holcim (Česká republika) a.s. Betonové vzorky byly po vyrobení dopraveny na Ústav technologie stavebních hmot a dílců, zde byly uloženy do agresivních prostředí.



#### 4.5. Složení zkoušených receptur

Čtyři receptury byly navrženy na pevnostní třídu C 30/37 s odolností na vliv prostředí XA3. Cílem je ověření trvanlivosti vyrobených betonových vzorků vůči vybraným agresivním činitelům.

*Tabulka 11: Složení receptur.*

Složky betonu [Kg.m <sup>-3</sup> ]	T3	T4	T5	T16
CEM II/A-LL 42,5R	-	-	439	-
CEM II/B-M (S-V) 32,5R	-	466	-	-
CEM III/B 32,5N SV	488	-	-	-
CEM I 42,5R	-	-	-	439
Kam. 0-4mm Čeperka	903	783	856	859
Kam. 8-16mm Žumberk	675	309	267	267
Kam. 11-22mm Žumberk	138	567	592	592
Voda	222	215	189	189
Plast. Stachement 2481	4,46	4,20	4,41	4,41

Receptury T3, T4 a T5 jsou recepturami zkoušenými, receptura T16 je receptura referenční.

#### 4.6. Charakteristika surovin

- **CEM II/A-LL 42,5R:** Portlandský cement s vápencem, s obsahem TOC, který nepřekračuje 0,2 % hmotnosti (LL), pevnostní třídy 42,5, s vysokými počátečními pevnostmi, obsah 6 - 20 % vápence.
- **CEM III/B 32,5N SV:** Vysokopeční cement obsahující 66 - 80 % vysokopeční granulované strusky, pevnostní třídy 32,5, s normálními počátečními pevnostmi, siranovzdorný.
- **CEM I 42,5R:** Portlandský cement dle ČSN EN 197-1 pevnostní třídy 42,5 s vysokými počátečními pevnostmi.
- **CEM II/B-M 42,5R:** Portlandský směsný cement obsahující 21 - 35 % křemičitého popílku, pevnostní třídy 42,5, s vysokými počátečními pevnostmi.
- **Kamenivo 0-4 mm Čeperka:** Štěrkopísek (podíl štěrkové frakce 30 %), těžené prané kamenivo.

- **Kamenivo 8 - 16 (11 - 22) mm Žumberk:** Biotiticko-amfibolická žula.

Drcené kamenivo.

- **Stachement 2481:** Superplastifikační přísada do betonu na bázi polykarboxylátů. Dávkování 0,5 - 1,5 % z hmotnosti cementu. Redukce vody až o 30 %.

- **Voda:** Dle ČSN EN 1008: Záměsová voda do betonu.

#### 4.7. Provádění experimentální práce

Zkušební betonové vzorky byly podrobeny fyzikálně-mechanickým zkouškám ke zjištění objemové hmotnosti ztvrdlého betonu (pro vyhodnocení nebyly hodnoty objemové hmotnosti zaokrouhleny), pevnost v tlaku, pevnost v příčném tahu, hloubka průsaku tlakovou vodou. Zkoušky byly provedeny u všech receptur v časových intervalech 90, 180, 360 dní od naložení do agresivního prostředí. Receptura T16 nemá v současné době stáří 360 dní, proto bude vyhodnocena pouze po 180 dnech. Výsledky fyzikálně-mechanických vlastností jsou srovnány s referenčními vzorky ve stejných časových intervalech.

Po provedení zkoušky pevnosti v tlaku na zkušebních vzorcích, byly ze zlomků betonových krychlí odebrány ze dvou vrstev vzorky a to z povrchu (0 – 5 mm) a z vrstvy pod povrchem (5 – 10 mm). Odebrané vzorky byly nejdříve pomlety a poté podrobeny rentgenové difrakční analýze a stanovení pH ve výluhu.

Fyzikálně-mechanické vlastnosti byly stanoveny dle příslušných norem:

ČSN EN 12390-7 Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 7: Objemová hmotnost ztvrdlého betonu,

ČSN EN 12 390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles,

ČSN EN 12 390-6 Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles,

ČSN EN 12390-8 Zkoušení ztvrdlého betonu-Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou.

## 5. VÝSLEDKY A DISKUZE

Betonové vzorky byly vyrobeny na betonárně firmy Holcim (Česká republika) a.s. a dopraveny na Ústav technologie stavebních hmot a dílců, zde byly uloženy do agresivních prostředí. V bakalářské práci vyhodnocuji výsledky získané při dlouhodobém sledování vlastností těchto betonů.

### 5.1. Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek receptur T3, T4, T5, T16 pro jednotlivá agresivní prostředí

#### 5.1.1. Tabulky výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek

Tabulky 12, 13, 14, 15, 16, 17 dávají přehled výsledků fyzikálně-mechanických zkoušek vzorků, které byly uloženy v jednotlivých agresivních prostředích.

*Tabulka 12: Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pro referenční prostředí.*

Referenční prostředí										
Vlastnost		Pevnost v tlaku [MPa]			Pevnost v příčném tahu [MPa]			Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	T3	55,3	55,7	46,7	4,24	3,54	4,17	2377	2355	2342
	T5	46,8	52,8	55,7	3,73	3,63	4,56	2323	2356	2365
	T4	42,5	48,7	53,0	3,75	4,31	4,15	2321	2312	2352
	T16	47,0	46,7	-	4,56	4,29	-	2365	2397	-

*Tabulka 13: Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pro prostředí hořčnatých iontů.*

Hořčnaté ionty										
Vlastnost		Pevnost v tlaku [MPa]			Pevnost v příčném tahu [MPa]			Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	T3	52,6	62,7	60,7	4,40	3,63	3,68	2364	2350	2349
	T5	48,7	51,1	46,5	4,02	4,21	3,70	2351	2358	2360
	T4	58,0	52,4	55,0	3,83	4,31	3,60	2360	2358	2341
	T16	42,3	48,7	-	4,02	3,99	-	2393	2407	-

**Tabulka 14: Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pro prostředí dusičnanů.**

Dusičnany										
Vlastnost		Pevnost v tlaku [MPa]			Pevnost v příčném tahu [MPa]			Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	<b>T3</b>	52,3	65,6	58,9	4,38	4,51	4,74	2362	2358	2363
	<b>T5</b>	43,0	63,3	62,6	3,87	3,62	4,79	2355	2358	2367
	<b>T4</b>	48,6	47,9	56,0	3,91	3,58	4,08	2357	2356	2353
	<b>T16</b>	47,4	48,1	-	3,51	4,05	-	2392	2404	-

**Tabulka 15: Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pro prostředí síranů.**

Síraný										
Vlastnost		Pevnost v tlaku [MPa]			Pevnost v příčném tahu [MPa]			Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Doba uložení		90 dní	180dní	360 dní	90dní	180 dní	360 dní	90dní	180 dní	360 dní
Receptura	<b>T3</b>	59,9	42,2	66,6	4,48	4,27	4,44	2367	2331	2367
	<b>T5</b>	56,6	53,5	54,3	3,82	3,42	4,00	2365	2362	2377
	<b>T4</b>	48,6	50,5	55,7	3,75	3,65	3,46	2359	2346	2341
	<b>T16</b>	47,5	44,4	-	3,87	4,16	-	2357	2375	-

**Tabulka 16: Výsledky fyzikálně-mechanických zkoušek pro prostředí CO<sub>2</sub>.**

CO <sub>2</sub>										
Vlastnost		Pevnost v tlaku [MPa]			Pevnost v příčném tahu [MPa]			Objemová hmotnost [kg.m <sup>-3</sup> ]		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	<b>T3</b>	55,0	61,5	60,7	4,73	4,66	3,48	2365	2337	2363
	<b>T5</b>	60,7	52,8	56,8	4,02	3,36	4,64	2349	2352	2366
	<b>T4</b>	48,9	45,4	60,7	3,70	4,14	3,75	2341	2337	2326
	<b>T16</b>	48,5	53,2	-	3,11	3,95	-	2373	2397	-

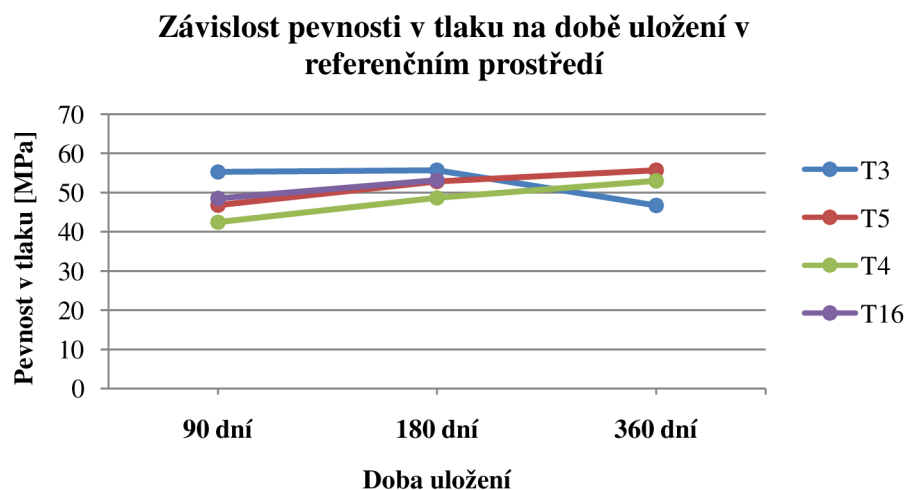
**Tabulka 17: Výsledné hodnoty průsaků tlakovou vodou pro jednotlivé agresivní prostředí.**

Prostředí		Referenční			CO <sub>2</sub>			Sířany		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	<b>T3</b>	32	24	19	13	3	6	7	2	9
	<b>T4</b>	29	30	19	17	30	4	14	7	22
	<b>T5</b>	32	28	9	18	5	8	14	3	3
	<b>T16</b>	6	19	-	48	4	-	20	4	-

Prostředí		Dusičnany			Hořčnaté ionty		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	<b>T3</b>	18	2	3	5	3	7
	<b>T4</b>	13	15	11	35	3	6
	<b>T5</b>	11	3	11	9	2	8
	<b>T16</b>	9	8		14	8	

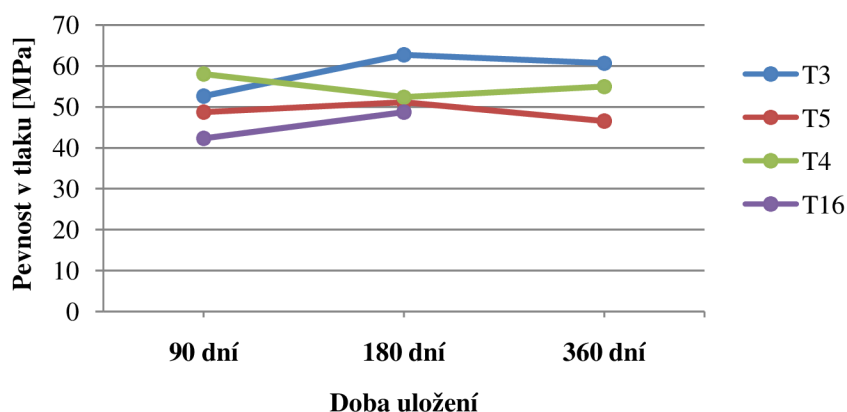
### 5.1.2. Grafické závislosti mechanicko-fyzikálních vlastností betonů

#### 5.1.2.1 Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v agresivním prostředí



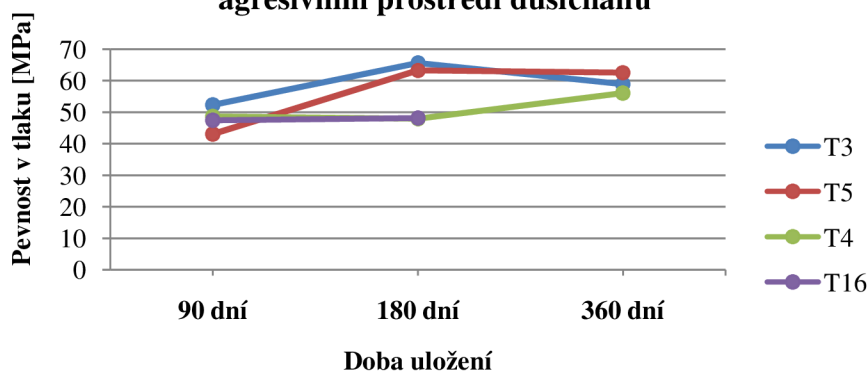
**Graf 4: Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v referenčním prostředí.**

**Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v agresivním prostředí hořečnatých iontů**



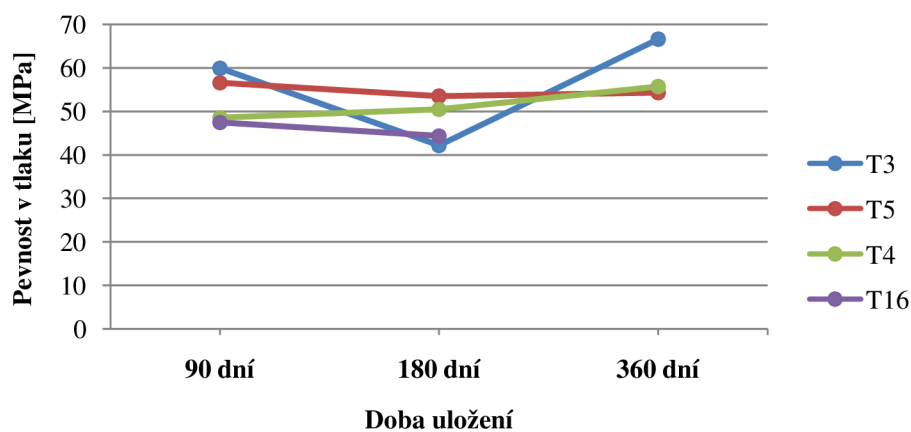
*Graf 5: Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v prostředí hořečnatých iontů.*

**Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v agresivním prostředí dusičnanů**

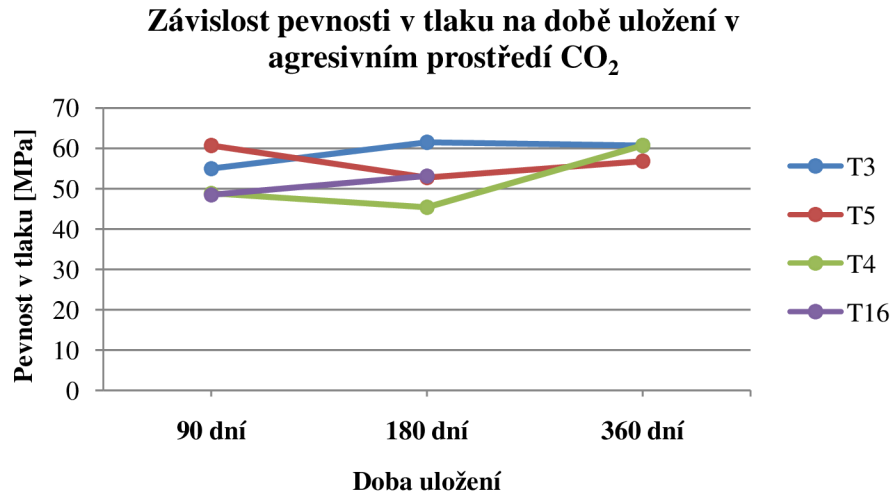


*Graf 6: Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v prostředí dusičnanů.*

**Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v agresivním prostředí síranů**



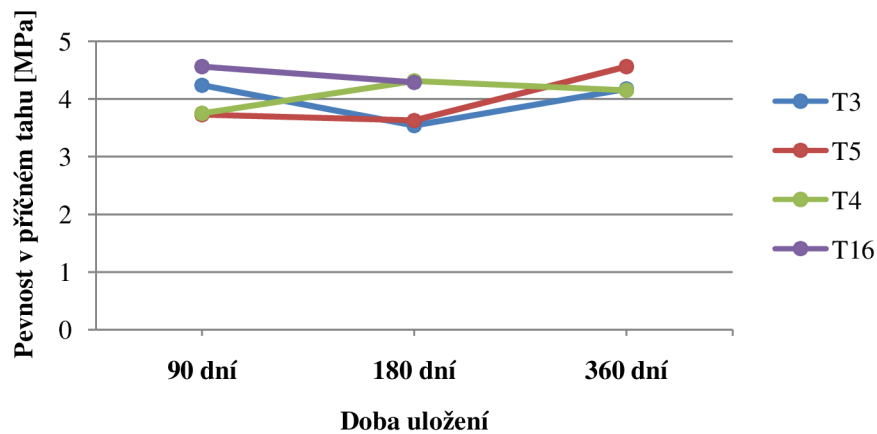
*Graf 7: Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v prostředí síranů.*



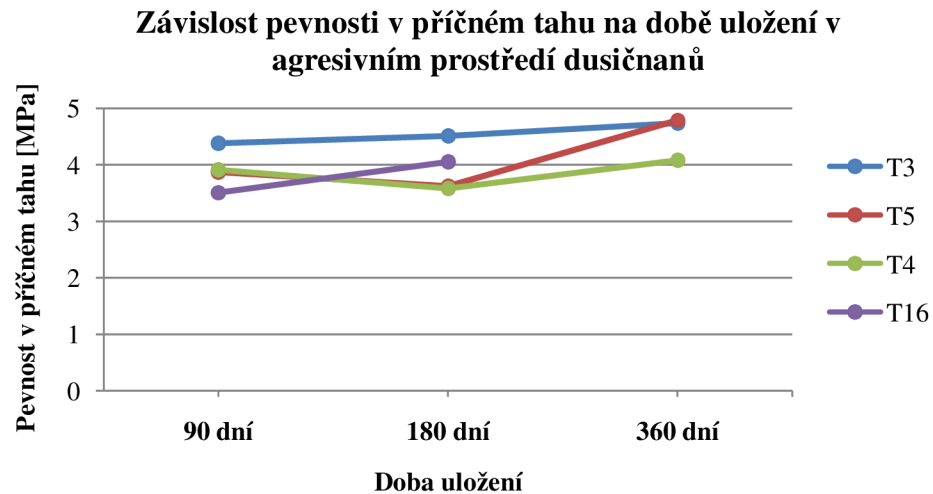
*Graf 8: Závislost pevnosti v tlaku na době uložení v prostředí CO<sub>2</sub>.*

**5.1.2.2. Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v agresivním prostředí**

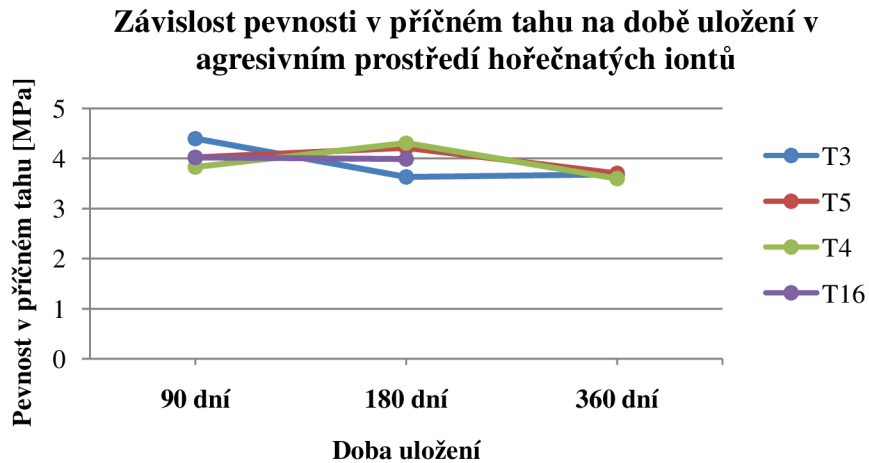
**Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v referenčním prostředí**



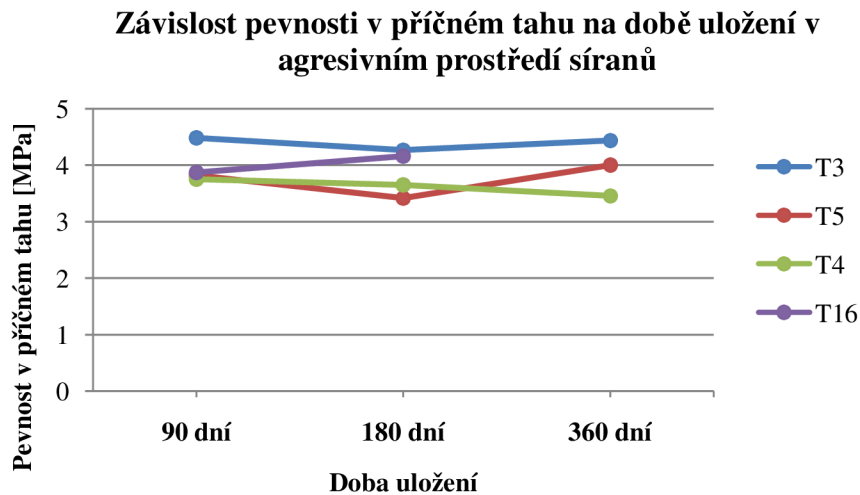
*Graf 9: Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v referenčním prostředí.*



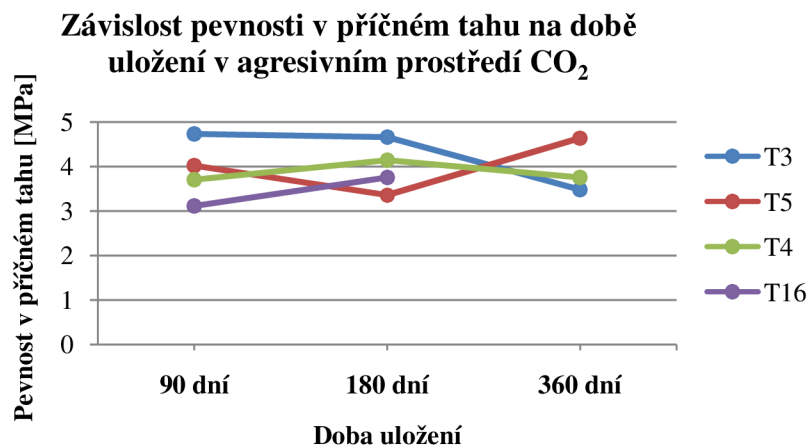
**Graf 10: Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v prostředí dusičnanů.**



**Graf 11: Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v prostředí hořčnatých iontů.**



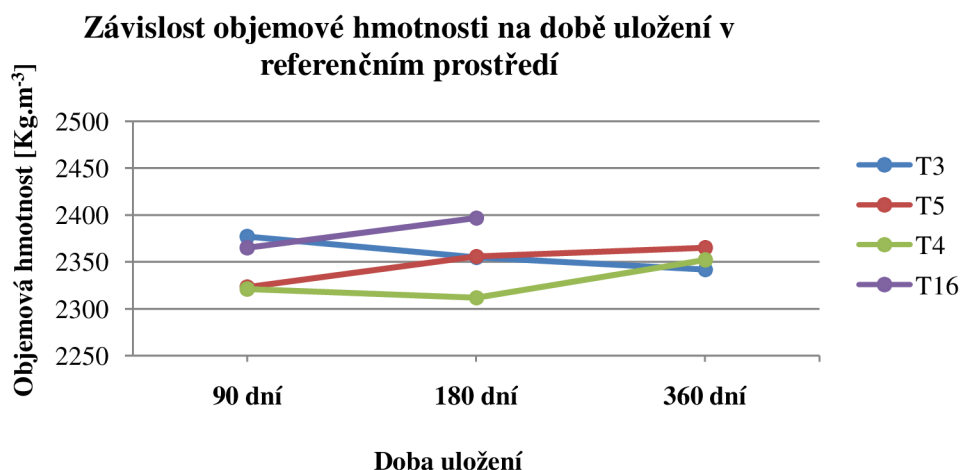
**Graf 12: Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v prostředí síranů.**



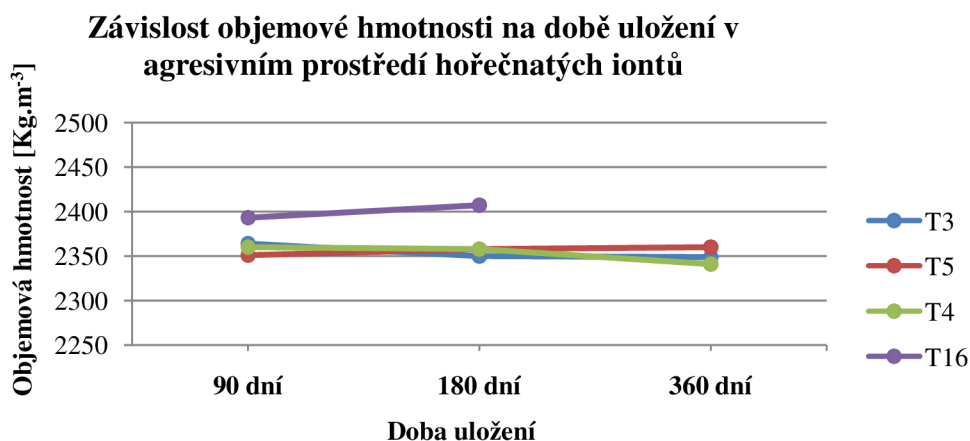
**Graf 13: Závislost pevnosti v příčném tahu na době uložení v prostředí CO<sub>2</sub>.**



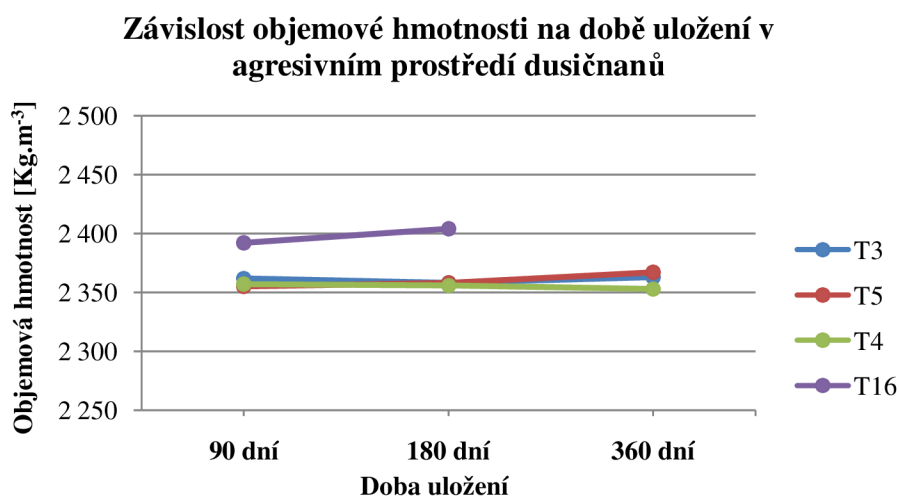
### 5.1.2.3. Závislost objemové hmotnosti na době uložení v agresivním prostředí



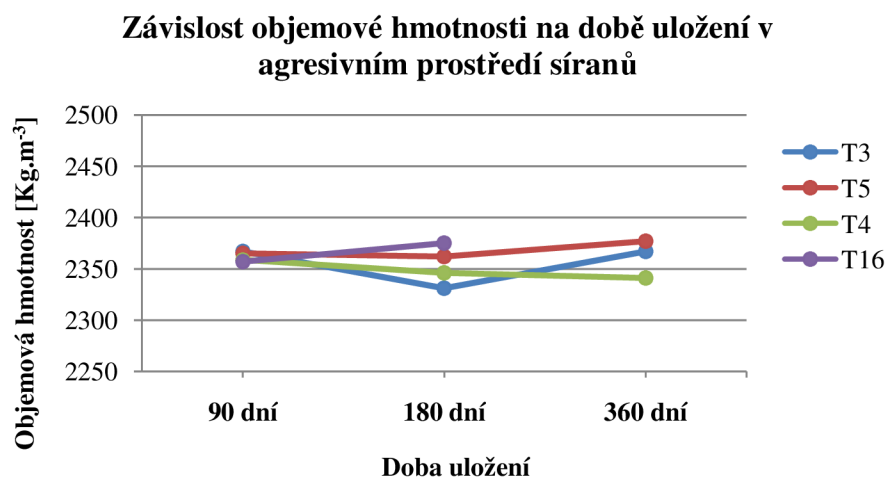
Graf 14: Závislost objemové hmotnosti na době uložení v referenčním prostředí.



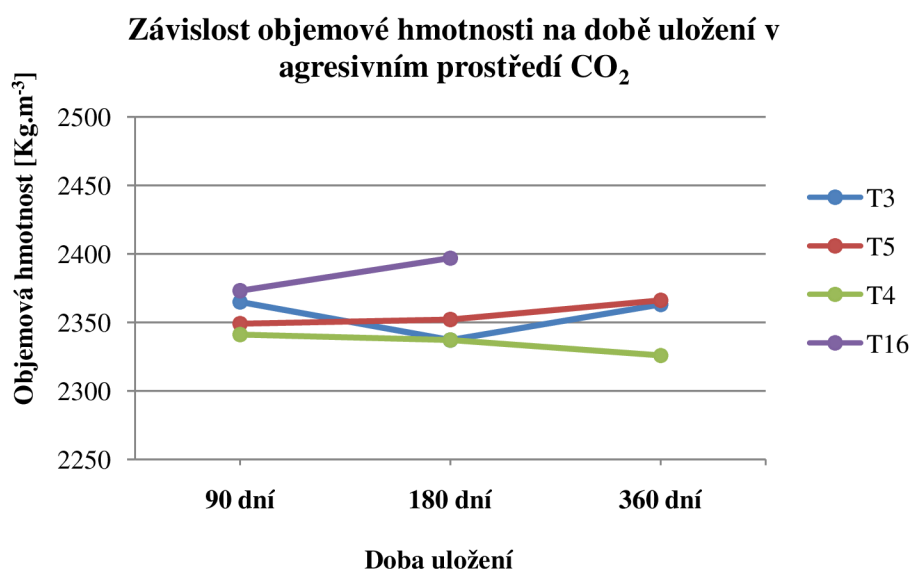
Graf 15: Závislost objemové hmotnosti na době uložení v prostředí hořečnatých iontů.



Graf 16: Závislost objemové hmotnosti na době uložení v prostředí dusičnanů.



*Graf 17: Závislost objemové hmotnosti na době uložení v prostředí síranů.*



*Graf 18 Závislost objemové hmotnosti na době uložení v prostředí CO<sub>2</sub>.*

### 5.1.3. Diskuze a srovnání výsledků mechanicko-fyzikálních zkoušek

**Pevnost v tlaku:** Vlivem působení agresivního prostředí došlo k snížení výsledných hodnot pevností v tlaku zkušebních těles po 90 dnech uložení maximálně o 15 %, po 180 a 360 dnech uložení došlo k poklesu maximálně o 17 % oproti hodnotám pevností v tlaku referenčních zkušebních těles (referenční prostředí – voda). U betonových vzorků receptury T3 (CEM III/B 32,5N SV) uložených v prostředí síranů došlo po 360 dnech zrání k nárůstu pevnosti v tlaku o 46 %, oproti hodnotám pevnosti v tlaku referenčních těles. V prostředí s agresivním prostředím CO<sub>2</sub> došlo po 360 dnech k 13 % nárůstu pevnosti v tlaku u všech

betonových vzorků, to mohlo být způsobeno zvyšováním hodnot pevností v tlaku betonových vzorků vlivem prvního stádia karbonatace.

**Pevnost v příčném tahu:** Pevnost v příčném tahu betonových vzorků se po 360 dnech uložení v agresivních prostředích snížila oproti hodnotám pevností v příčném tahu vzorků referenčních maximálně o 23 %. Výjimkou je receptura T3 (CEM III/B 32,5N SV) v prostředí dusičnanů, u které se pevnost v příčném tahu zvýšila o 14 % oproti referenčním hodnotám.

**Objemová hmotnost:** Z grafických závislostí lze usuzovat, že u žádné receptury nedošlo vlivem uložení v agresivním prostředí k změně objemové hmotnosti více než o 2 %.

**Hloubka průsaku tlakovou vodou:** Hodnoty průsaků tlakovou vodou se u všech vzorků po 360 dnech snížily v průměru o 50 % oproti hodnotám průsaků tlakovou vodou vzorků uložených v referenčním prostředí. Tento pokles je nejspíše způsoben vyplněním pórové struktury povrchových vrstev vzorků korozními zplodinami.

## 5.2. Výsledky zkoušek pH a RTG analýzy receptur T3, T4, T5, T16 pro jednotlivá agresivní prostředí

### 5.2.1. Tabulka naměřených hodnot pH

Tabulka 18: Tabulka naměřených hodnot pH.

Prostředí	Referenční						Hořečnaté ionty						
	0-5mm			5-10mm			0-5mm			5-10mm			
Doba uložení	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	
Receptura	T3	12,07	11,38	11,48	11,93	11,56	12,02	11,85	11,00	11,36	12,47	11,52	11,37
	T4	12,24	11,85	11,66	12,11	11,75	11,46	11,63	11,23	10,66	11,89	12,03	11,46
	T5	12,29	11,74	11,74	12,30	11,46	12,08	12,56	11,16	11,45	12,33	12,06	11,52
	T16	12,19	12,20	-	12,26	12,16	-	11,82	11,61	-	11,27	11,95	-

Prostředí	Síraný						Dusičnaný						
	0-5mm			5-10mm			0-5mm			5-10mm			
Doba uložení	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní	
Receptura	T3	12,03	11,66	11,57	12,44	11,86	11,16	12,00	11,32	11,38	12,35	11,45	12,50
	T4	12,16	11,76	11,64	12,13	11,71	11,27	11,96	11,71	11,83	11,95	11,63	11,90
	T5	12,61	11,29	11,90	12,39	11,41	11,95	12,27	11,86	12,20	12,31	11,23	12,13
	T16	12,03	12,44	-	12,10	12,39	-	11,16	12,19	-	11,87	12,44	-

Prostředí		CO <sub>2</sub>					
Odebraná vrstva		0-5mm			5-10mm		
Doba uložení		90 dní	180 dní	360 dní	90 dní	180 dní	360 dní
Receptura	T3	11,81	11,09	11,71	12,12	10,92	11,79
	T4	12,04	10,88	11,53	11,90	11,06	11,68
	T5	12,15	11,68	11,45	12,26	11,49	11,38
	T16	12,11	11,81	-	11,40	12,41	-

### 5.2.2. Vyhodnocení měření pH

Hodnoty pH u vzorků vystavených působení agresivního prostředí po dobu 90 dnů oscilují kolem hodnoty pH = 12. Po 180 dnech uložení betonů v agresivních prostředích kleslo pH zkoušených betonů na průměrnou hodnotu pH = 11,7. Po 360 dnech uložení vzorků v agresivním prostředí hodnota pH betonu klesla u zkoušených vzorků na hodnoty okolo pH = 11,5. Pro pasivaci ocelové výztuže proti korozi v železobetonových konstrukcích je nutné, aby hodnota pH betonu neklesla pod hodnotu pH = 9,6.

### 5.2.3. Vyhodnocení RTG

Vyhodnocení rentgenogramů provedl Ing. Amos Dufka, Ph.D. Níže jsou uvedeny výsledky analýz, na kterých jsem se podílel přípravou vzorků. Jsou zde zmíněny pouze případy výraznějších změn mineralogického složení u vzorků.

U receptury T3 (CEM III/B SV 32,5N) byl v mikrostrukturu vzorků po 360 dnech uložení v agresivním prostředí síranů identifikován vznik korozních novotvarů ettringitu a zvýšeného množství monosulfátu. To nasvědčuje o degradaci povrchových vrstev vzorků agresivním prostředím síranů.

U ostatních receptur T4 (CEM II/B-M (S-V) 42,5R, s hlavní složkou křemičitým popílkem), T5 (CEM II/A-LL 42,5R) a T16 (CEM I 42,5R) nedošlo k výraznější změně mineralogického složení, vlivem působení agresivního prostředí.

## 6. ZÁVĚR

V bakalářské práci byly shrnuty informace o portlandských a portlandských směsných cementech, o jejich trvanlivosti při působení agresivních prostředí. Dále byly shrnuty a popsány možné vlivy okolního prostředí na trvanlivost betonů. Při vypracovávání jsem vycházel z české odborné literatury, z údajů poskytovaných producentem směsných cementů cementárnou Prachovice a ze zahraničních odborných článků (databáze Web of Science, časopisů Construction and Building Materials).

V praktické části byly sledovány fyzikálně-mechanické vlastnosti betonů s portlandskými cementy, portlandskými cementy směsnými, portlandskými cementy s vápencem a cementy vysokopecními z produkce cementárny Prachovice. Zkušební vzorky byly vyrobeny na betonárně Holcim a.s., poté byly uloženy v laboratořích Ústavu technologie stavebních hmot a dílců do zkoušených agresivních prostředí. Po 90, 180 a 360 dnech se na zkušebních vzorcích provedly fyzikálně-mechanické zkoušky, RTG analýza a stanovení pH betonu. V rámci své bakalářské práce jsem prováděl sledování a vyhodnocování chování těchto betonů při uložení v různých agresivních prostředích. Sledoval a porovnával jsem vlastnosti vzorků ve stáří 90, 180 a 360 dní. Cílem bylo sledovat chování betonů s portlandskými a portlandskými směsnými cementy z produkce cementárny Prachovice a ověřit možnost použití těchto cementů do betonu s vlivem prostředí XA. Z naměřených hodnot je patrné, že nedošlo v časovém horizontu 360 dní k výrazným degradačním změnám pevnosti v tlaku a v pevnosti v příčném tahu. Pro pasivaci ocelové výztuže proti korozi v železobetonových konstrukcích je nutné, aby hodnota pH betonu neklesla pod hodnotu  $\text{pH} = 9,6$ . Hodnota pH betonu u zkoušených vzorků se pohybovala v intervalu  $\langle 11,5; 12,0 \rangle$ . Z výsledků RTG analýzy vyplývá, že k významnější mineralogické změně v struktuře betonu došlo pouze u vzorků receptury T3 (CEM III/B 32,5N SV) uložených v agresivním prostředí síranů. Zde byl identifikován vznik korozních novotvarů ettringitu a zvýšeného množství monosulfátu v povrchových vrstvách vzorků.

Pro získání dalších výsledků je nutno pokračovat ve sledování chování těchto betonů v delším časovém horizontu a v dalších agresivních prostředích (s různými koncentracemi). Je třeba posoudit chování těchto betonů v prostředí s působením mrazu a chemickými rozmrazovacími přísadami. V této oblasti vidím pokračování ve své magisterské práci.

## 7. LITERATURA

- [1] ČSN EN 197-1. *Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Český normalizační institut, Praha: 2003.
- [2] ŠAUMAN, Zdeněk. *Maltoviny I*. 1. vyd. Brno: PC-DIR, 1993, 198 s. ISBN 80-214-0509-0.
- [3] DORAZILOVÁ, Irena. HELA, Rudolf. BODNÁROVÁ, Lenka. SEDLÁK, Petr. HORÁK, Ota. VÁLEK, Jaroslav. *Ověřování vlastností betonů s cementy s nižší ekologickou náročností (green cement) v chemicky agresivních prostředí, sborník konference*. 8. Konference speciální betony, Skalský Dvůr 2011. ISBN 978-80-86604-54-1.
- [4] *Portlandské směsné cementy a portlandské cementy s vápencem: Nové druhy cementů*. [online]. s. 5 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
[http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/portlandske\\_smesne\\_cementy\\_a\\_portlandske\\_cementy\\_s\\_vapencem.pdf](http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/portlandske_smesne_cementy_a_portlandske_cementy_s_vapencem.pdf)
- [5] PYTLÍK, Petr. *Technologie betonu*. 2. vyd. Brno: VUTIUM, 2000, 390 s. ISBN 80-214-1647-5.
- [6] ČSN EN 206-1 ZMĚNA Z3. *Beton - Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha: Český normalizační institut: 2008.
- [7] HOLCIM A.S.. [online]. [cit. 2012-05-22]. Dostupné z:  
<http://www.holcim.cz/cz/produkty-a-sluzby/cement.html>
- [8] DROCHYTKA, Rostislav. *Trvanlivost stavebních materiálů*. Vyd. 1. Brno: VUT, 2007, 156 s.
- [9] MATOUŠEK, Milan. DROCHYTKA, Rostislav. *Atmosférická koroze betonu*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998, 171 s. ISBN 80-902-5580-9.
- [10] TENZER, Tomáš. *Studium trvanlivosti samozhutnitelných betonů*, Diplomová práce, VUT FAST, Brno 2006.
- [11] DOBRÝ, Oldřich. PÁLEK, Ladislav. *Koroze betonu ve stavební praxi*, STNL Praha 1988.

- [12] DORAZILOVÁ, Irena. BODNÁROVÁ, Lenka. SEDLÁK, Petr. HORÁK, Ota. VÁLEK, Jaroslav. *Vlastnosti betonů s green cementy*. 18. Konference betonářské dny, 2011.
- [13] PIPILIKAKI, P., M. KATSIOTI a J.L. GALLIAS. Performance of limestone cement mortars in a high sulfates environment. *Construction and Building Materials*. 2009, roč. 23, č. 2, s. 1042-1049. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2008.05.001. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061808001219>
- [14] SAHMARAN, M., T.K. ERDEM a I.O. YAMAN. Sulfate resistance of plain and blended cements exposed to wetting?drying and heating?cooling environments. *Construction and Building Materials*. 2007, roč. 21, č. 8, s. 1771-1778. ISSN 09500618. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.05.012. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061806001772>
- [15] *Vlastnosti portlandských cementů směsných*. [online]. 2005, s. 12 [cit. 2012-05-22]. Dostupné z: [http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/vlastnosti\\_portlandskych\\_cementu\\_smesnych.pdf](http://www.svcement.cz/includes/dokumenty/pdf/vlastnosti_portlandskych_cementu_smesnych.pdf)
- [16] NOVÁK, Jan. *Laboratorní zkoušení stavebních hmot a dílců I*. Vyd. 1. Brno: VUT, 2007, 123 s.
- [17] ČSN EN 12 390-3. *Zkoušení ztvrdlého betonu– Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut: 2009.
- [18] ČSN EN 12 390-8. *Zkoušení ztvrdlého betonu– Část 8: Hloubka průsaku tlakovou vodou*. Praha: Český normalizační institut: 2009.
- [19] DUFKA, Amos. NOVÁK, Jan. *Laboratorní experimentální metody*. Vyd. 1. Brno: VUT, 2007, 155 s.
- [20] ČSN EN 12 390-6. *Zkoušení ztvrdlého betonu– Část 6: Pevnost v příčném tahu zkušebních těles*. Praha: Český normalizační institut: 2009.

## 8. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

XA – druh vlivu prostředí na beton, konkrétně beton vystavený chemickému působení.

pH – záporně vzatý dekadický logaritmus koncentrace oxoniových kationtů ve vzorku.

Kg – kilogram, jednotka hmotnosti (1kg=1000g).

l – litr, jednotka objemu (1m<sup>3</sup>=1000l).

HRC – jednotka tvrdosti podle Rockwella.

N – Newton, jednotka síly.

m – metr, jednotka délky.

DTA – diferenční termická analýza.

ASTM – kartotéka minerálů – American Society for Testing and Materials.

RTG – rentgenová difrakční analýza.

CEM – normové označení cementu.

Plast. – plastifikační přísada do betonu.

Max. – maximálně.

Min. – minimálně.

VUT – Vysoké učení technické v Brně.

TOC – celkový obsah organického uhlíku [%].