



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV TECHNOLOGIE STAVEBNÍCH HMOT A DÍLCŮ

INSTITUTE OF TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS AND COMPONENTS

VÝVOJ MODERNÍCH BETONŮ PRO ZEMĚDĚLSKÉ STAVBY

DEVELOPMENT OF MODERN CONCRETE FOR AGRICULTURAL CONSTRUCTIONS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Vojtěch Švec

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. RUDOLF HELA, CSc.

BRNO 2020



**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	Vojtěch Švec
Název	Vývoj moderních betonů pro zemědělské stavby
Vedoucí práce	prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

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

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

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

ČSN P 73 2404/Z1 - Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda - Doplnující informace

Sborníky z českých a mezinárodních konferencí

České a zahraniční časopisy

Internetové zdroje, Science Direct apod.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Rozvoj užívání betonů pro zemědělské stavby nabývá na stále větším objemu. Jedná se zejména o stavby související s rozvojem bioplynek, tzn. silážních žlabů, fermentorů, složišť kejdy či budovy pro ustájení. Ve všech těchto případech je použitý beton vystaven kapalným chemicky agresivním prostředím ve třídě XA3. Ve všech případech je to dlouhodobé působení kontaminovaných vod, močůvky či silážních šťáv. Nejkritičtější je působení silážních šťáv, které mívají pH kolem 3. Jedná se o velmi kyselé prostředí působící na betonové žlaby, na kterých je obtížné provádět sekundární ochrany.

V bakalářské práci popište mechanismy základních chemických degradací betonů a možné systémy primární ochrany betonů jejich složením. Zaměřte se hlavně na možnosti využívání aktivních příměsí (mikrosilika, el. popílky, metakaolín), dále možnosti zpevnění nekovovými mikrovlákny a využití hydrofobizujících přísad do betonu.

V praktické části navrhnete složení betonů C35/45 a C30/37, konzistence S3 pro prostředí XA3 s použitím aktivních příměsí. Po 28 dnech normálního zrání je uložte do vybraných vodních roztoků s vysokou koncentrací síranů, dusičnanů, pH3-3,5, silážních šťáv či močůvky. Sledujte pomocí nedestruktivních ultrazvukových metod postup degradace betonů po dobu minimálně 90 dnů.

Současně ověřte dopady na pevnosti v tlaku.

Rozsah práce 40 až 50 stran

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

prof. Ing. Rudolf Hela, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

ABSTRAKT

U zemědělských staveb všeobecně se setkáváme s prostředím, které je plné agresivních látek a hlavně nízké pH. Tato práce odkrývá tuto problematiku poškození betonu kyselým prostředím a navrhuje jejich ochranu.

KLÍČOVÁ SLOVA:

Zemědělské stavby, degradace betonu, nízké pH, Vodonepropustnost betonu, mechanické vlastnosti, kyselé agresivní prostředí

ABSTRACT

In agricultural buildings we generally encounter an environment that is full of aggressive substances and especially low pH. This work deals with this issue of concrete damage by acid environment and proposes their protection.

KEYWORDS:

Agricultural buildings, degradation of concrete, low pH, waterproofing of concrete, mechanical properties, acidic aggressive environment

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu prof. Ing. Rudolfu Helovi, CSc za odborné vedení mé bakalářské práce a poskytnutí cenných rad v oblasti technologie betonu. Děkuji také všem zaměstnancům ústavu THD za velmi ochotnou pomoc při provádění laboratorních prací.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Vývoj moderních betonů pro zemědělské stavby* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 18. 5. 2020

Vojtěch Švec
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Vývoj moderních betonů pro zemědělské stavby* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 18. 5. 2020

Vojtěch Švec
autor práce

OBSAH

ÚVOD	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 BETON	12
1.1 Složení betonu	13
1.2 Cement	13
1.2.1 Rozdělení cementů podle složení.....	14
1.2.2 Rozdělení cementů podle pevností	14
1.3 Voda.....	15
1.4 Kamenivo	15
1.5 Přísady.....	16
1.6 Příměsi.....	16
1.6.1 Mikrosilika.....	16
1.6.2 Elektrárenské popílky	17
1.6.3 Metakaolin	18
2 BIOPLYNOVÉ STANICE A KOMPOSTÁRNY	19
2.1 Bioplynové stanice	19
2.1.1 Fermentor	20
2.2 Silážní žlaby.....	20
2.2.1 Silážování.....	21
3 DEGRADACE BETONU	22
3.1 Koroze I. typu.....	22
3.2 Koroze II. typu.....	23
3.2.1 Kyselinová koroze	23
3.2.2 Koroze huminovými látkami.....	25
3.2.3 Koroze způsobená alkáliemi.....	25
3.3 Koroze III. typu.....	25
3.3.1 Síranová koroze betonu	26
3.4 Rozdělení betonů do tříd podle vlivu agresivního prostředí	27
4 VODONEPROPUSTOST BETONU	29
4.1 Zkouška „Hloubka průsaku tlakovou vodou“ dle ČSN EN 12390	30
4.1.1 Všeobecně	30

4.1.2	Zkušební tělesa	31
4.1.3	Postup zkoušení	31
4.1.4	Vyhodnocení výsledků zkoušky	32
4.2	Póry v betonu	32
5	PRAKTICKÁ ČÁST	35
5.1	Navrhované receptury	35
5.2	Použité přísady a příměsi v praktické části	37
5.2.1	Sika WT 200 P	37
5.2.2	Sika Control 45	37
5.2.3	ChrysoSerenis	37
5.2.4	ChrysoFuge	38
5.2.5	Stachema SL3	38
5.3	Metodika práce	38
5.4	Krychelné pevnosti po 7, 28 a 60 dnech	40
5.5	Uložení do agresivního prostředí	44
5.6	Měření ultrazvukem	51
	ZÁVĚR	54
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	60
	SEZNAM OBRÁZKŮ	61
	SEZNAM TABULEK	62

ÚVOD

Jedním z hlavních materiálů pro výstavbu je beton, který je v tuto dobu téměř ve všech konstrukcích. Jeho odvětví sahá od normálních betonů přes lehké, které se využívají na lehčené konstrukční nosné prvky či při rekonstrukcích až po těžké betony, které nás chrání proti nebezpečnému záření například v jaderných elektrárnách. Každý z betonů je individuální prvek, navržený přímo pro určitý druh stavby a musí splňovat provozní požadavky stavby. Bioplynové stanice, které se v poslední době rozmáhají, mají jako hlavní funkci zpracovávání organických hmot a produkci bioplynu, který se skládá převážně z metanu CH_4 a oxidu uhličitého CO_2 .

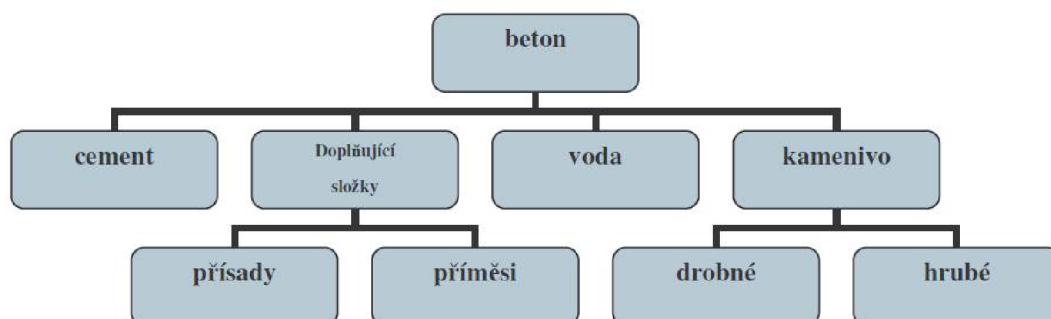
Bioplynové stanice k vytváření plynu využívají fermentory, což jsou betonové nádrže na organický materiál. Tento při kvasném procesu vytváří bioplyn, ale také látky, které mohou narušovat beton. Výrazně negativnější působení na beton je u silážních žlabů, do kterých se naváží buď travní, nebo kukuřičná hmota, která prochází kvasným procesem bez externího tepelného zdroje. Při tomto procesu vzniká velmi kyselé prostředí s pH mezi 3,2 až 4,5.

Tato práce pojednává o problematice složení betonu pro silážní žlaby a fermentory, jejichž konstrukce je zatěžována chemicky agresivním prostředím v kategorii XA3.

TEORETICKÁ ČÁST

1 BETON

Beton je kompozitní látka složená z plniva a pojiva. Hlavní pojivovou složkou je cement. Plnicí složkou tvoří kamenivo, které můžeme rozdělit na přírodní a umělé. Tyto složky po smíchání s vodou tvoří betonovou směs. Mezi další složky patří přísady a příměsi, které upravují vlastnosti čerstvého i ztvrdlého betonu. [5]



Obr. 1. Schéma složení betonu

ROZDĚLENÍ BETONU

Beton můžeme rozdělit na spoustu poddruhů, jako je prostý beton, to je jeden z nejzákladnějších a nejběžnějších betonů používaných vůbec. Tento beton je používán pouze při namáhání tlakovou silou. Přidáním ocelové nebo železné výztuže se z prostého betonu stává železobeton. Výztuž je do betonu vkládána při jeho výrobě a hlavně s krytím od vnějšího prostředí, protože výztuž může vlivem povětrnostních podmínek korodovat a způsobovat tak degradaci betonu a nesoudržnost betonu s výztuží. Tím železobeton ztrácí svoje vlastnosti. Důvodem použití železobetonu je vyšší pevnost v tahu, ale na úkor ceně vyztužovacích prvků. Předpjatý beton se vyrábí vložením předpínací výztuže, která je pevnější než výztuž betonářská. Tento

beton se používá na předpnuté mostní konstrukce velkých rozpětí. Možností vyztužení betonů je mnoho, jedním z nich je také rozptýlená výztuž ve formě ocelových drátků jako je drátkobeton či jiných vláken (vláknobeton). Beton s rozptýlenou výztuží nelze sám o sobě použít jako konstrukční beton kvůli možné nerovnoměrnosti rozmístění vláken.

Při použití lehkého kameniva, ať už organického či anorganického můžeme docílit betonu, který má objemovou hmotnost $800-2000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Tyto betony se nazývají lehké betony. Používají se do konstrukčně-izolačních, izolačních a ke konstrukčním účelům. Jejich majoritní vlastností je vysoký obsah pórů a dutin v jeho textuře. [5][6]

1.1 Složení betonu

Hlavní složky pro výrobu betonu jsou cement, voda, kamenivo a doplňující složky

1.2 Cement

Pro cementy platí evropská norma ČSN P ENV 197-1. Cement je hydraulické pojivo. Je to mletý anorganický materiál, který po smíchání s vodou vytváří cementovou kaši, která chemickou reakcí tuhne a tvrdne. [5][12]

Cement se skládá ze základních slínkových minerálů, které jsou:

- alit – trikalciumpsilikát – C_3S (45-80 %)
- belit – dikalciumpsilikát – C_2S (5-32 %)
- trikalciumaluminát – C_3A (4-16 %)
- brownmillerit – kalciumaluminátferit – $\text{C}_2(\text{AF})$ nebo C_4AF (3-12 %)
- volné CaO – C_V (0,1-3 %)
- volné MgO (periklas) – M_V (0,5-4,5 %)[5]

1.2.1 Rozdělení cementů podle složení

Cementy se označují jako CEM s římskou číslicí I - V, každé označení cementu vyjadřuje jeho jiné složení podle ČSN EN 197-1 ed. 2. [19][20][5]

- CEM I Portlandský cement- vhodný pro běžné konstrukce, nehodí se do agresivního prostředí a masivních konstrukcí.
- CEM II Portlandský cement směsný- patří k nejpoužívanějším cementům, odolný agresivnímu prostředí, vhodný pro masivní konstrukce díky nižšímu vývinu hydratačního tepla.
- CEM III Vysokopeční cement- nevhodný na konstrukce, kde jsou požadovány odolnosti proti mrazu, nebo rychlý nárůst pevností, naopak je vhodný na betonování základových a hloubkových konstrukcí, velkoobjemové nádrže či průmyslové stavby.
- CEM IV Pucolánový cement- pojivo vyráběné z portlandského slínku a pucolánu, pro konstrukce v mokřím nebo vlhkém prostředí.
- CEM V Směsný cement- pro podlahy, betonové dlažby, potěry a nenáročné betonové konstrukce. [8][7][5][20]

1.2.2 Rozdělení cementů podle pevností

Cementy mají 3 třídy pevností dle ČSN EN 197-1 ed. 2., každá z nich určuje pevnosti cementového kamene po 28 dnech v $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$ (MPa). [19][20]

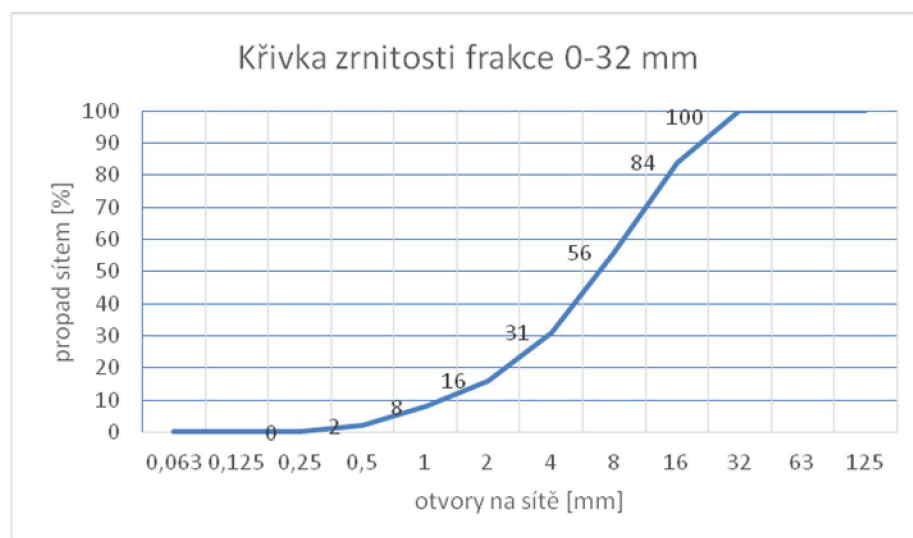
- 32,5 MPa
- 42,5 MPa
- 52,5 MPa

1.3 Voda

Rozděluje se na záměsovou a vodu ošetřovací. Voda záměsová je používána při výrobě betonu a ošetřovací se dodává betonu po jeho zatvrdnutí na udržení vlhkého stavu. Dá se použít jak voda pitná, tak voda recyklovaná, ta ale musí splňovat určité požadavky, jako je objemová hmotnost, která přímou úměrou souvisí s podílem pevných částic ve vodě. [5]

1.4 Kamenivo

Kamenivo je anorganická látka, používaná do betonu jako plnivo. Je buď drcené, nebo těžené. Kamenivo drcené je z větších částí přes drtičky zmenšováno na frakce určité hodnoty. Má drsný povrch a ostré hrany, takže k obalení zrn je potřeba více cementového tmelu. Kamenivo těžené má převážně hladké povrchy a kulovité tvary, které lépe zaplňují póry a mají menší měrný povrch, tudíž je cementového tmele potřeba méně. K výrobě betonu pro stavební účely se používají zrna do velikosti 32mm. Při výrobě betonu je potřeba sestavit křivku zrnitosti (obr 2), která přesně odpovídá požadavkům pro daný návrh konstrukce. Znalost poměrů frakce kameniv v betonu je jednou z nejdůležitějších parametrů při jeho výrobě. Používají se frakce 0-4, 4-8, 8-16, 11-22, 16-32. [5][7]



Obr. 2 Křivka zrnitosti frakce 0-32 mm

1.5 Přísady

Přísady do betonu jsou složky, které se přidávají do směsi při míchání čerstvého betonu. Jsou používány na upravení vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu. Jejich vlastnosti závisí na správném dávkování a reakci se složkami cementu. Pro správný účinek je potřeba zohlednit faktory, jako je doba míchání betonu, obsah vody, teplota betonu a okolního prostředí.[8] Existují 4 základní funkce chemických přísad do betonu:

- Provzdušňovače
- Vodoredukující, ztekucující – plastifikátory, supeplastifikátory
- Zpomalovače tuhnutí
- Urychlovače tuhnutí

1.6 Příměsi

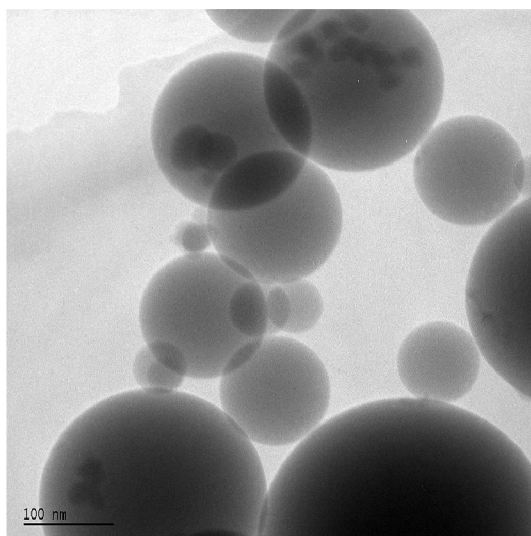
Jako příměsi můžeme definovat práškovité anorganické látky, přidávané do betonu za zlepšením vlastností čerstvého či ztvrdlého betonu. Rozlišujeme 2 základní druhy příměsí, jsou to příměsi prvního druhu (inertní), které plní funkci mikroplniva do betonové směsi, tudíž se nezúčastňují procesu hydratace. Bývají to například pigmenty či jemně mleté kamenivo (Filler) a příměsi druhého druhu, tzv. latentně hydraulické nebo pucolánové příměsi, které se svoji částí nebo i celkem podílí na hydrataci betonu. Nejčastěji se dnes používají křemičité úlety (Mikrosilika), jemně mleté vysokopecní strusky nebo úletové popílký. [7][5][10]

1.6.1 Mikrosilika

Vzniká jako odpad při hutní výrobě feroslitin v elektrických pecích nebo ji vyrábíme uměle. Již v názvu je řečeno, že se jedná o malé části křemene v amorfní fázi. Mají velmi velký měrný povrch a dobré

pucolánové vlastnosti. Obsahují od 80 % do 98 % amorfni SiO_2 ve tvaru kulatých zrn při jejich měrném povrchu $15\,000 - 25\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ a měrné hmotnosti $2\,120 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Mikrosilika zlepšují vlastnosti čerstvého betonu jako bleeding, čerpatelnost, k tomu ale zvyšují potřebné množství vody asi o 1 litr na 1 kg křemičitých úletů pro dosažení stejné zpracovatelnosti. [5]

Mikrosilika mezi zrna cementu vyplňuje prostor a zhutňuje cementový kámen. Jeho pucolánovou reakcí je pH tmele snižováno reakcí $\text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2 > \text{CSH}$. Maximální dávka mikrosiliky je omezena ku cementu poměrem $\leq 0,11$, aby nedošlo k depasivaci ocelové výztuže příliš nízkým pH. [5][10]



Obr. 3 Mikrosilika

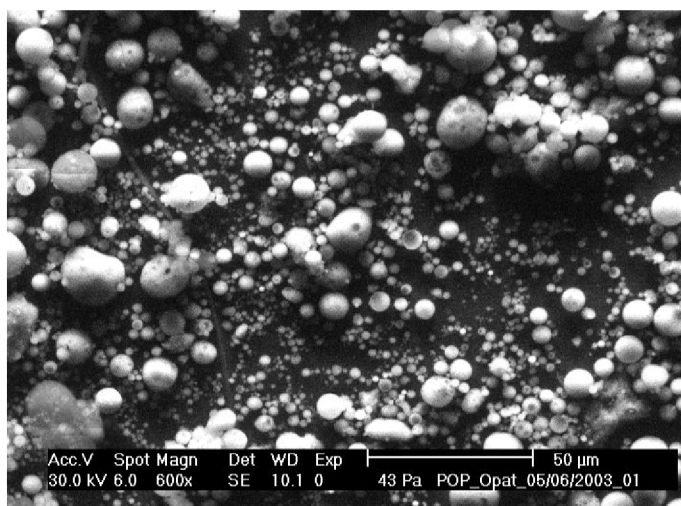
1.6.2 Elektrárenské popílky

Úletový popílek vzniká v elektrárnách jako odpadní produkt při spalování uhlí v práškovém stavu a je zachycován v odlučovačích, aby se nedostal do ovzduší. S ohledem na ekologii je potřeba popílek využívat ve stavebnictví či jinde. Jako příměs do betonu je popílek velmi hodnotný. Elektrárenské popílky jsou tříděny dle kvality a použití. Popílek z černého uhlí je do betonu vhodnější než popílek z hnědého uhlí. (až 80 % popílků v ČR je z hnědého uhlí). Popílky bohaté na SiO_2 fungují v betonu jako pucolány. Pucolanita popílků je velice pomalá a

byla zjištěna až po dlouhé době mezi 60 až 90 dny. Černouhelné popílků většinou obsahují skelné kuličky, blízké velikostí zrna cementu. [10][5]

Zrnitost popílků je závislá na odlučovačích v elektrárnách. Je více druhů odlučovačů popílků, jako je mechanický (zadržuje zrna větší než 0,09 mm) a elektrostatický (zadržuje zrna pod 0,09 mm) Popílků definuje norma ČSN EN 450 - Popílek do betonu - Definice požadavky a kontrola jakosti [5][10]

Přidáním popílků do betonu docílíme lepší zpracovatelnosti čerstvého betonu. Popílek zlepšuje odolnosti proti karbonataci betonu. Zvyšuje dlouhodobě pevnosti betonu. [5]



Obr. 4 Hnědouhelný popílek

1.6.3 Metakaolin

Je podstatnou součástí kaolínu - $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (AS_2H_2), rozkládá se při 540°C na metakaolinit $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$, který lépe reaguje s $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Poprvé byl použit jako příměs do betonu v roce 1960 při stavbě velkých přehrad v Brazílii, kde byl metakaolin přidáván do betonu jako příměs s prvotním záměrem zabránění poškození při alkalicko křemičitých reakcích. Jeho dávkování je 5 % až 10 % váhy cementu. Beton je po přidání více soudržný a nekrvácí. Zlepšuje i čerpatelnost betonu stejně jako konečné pevnosti. Při dávkování do 20ti % bylo zaznamenáno v cementové matrici, že snižuje pórovitost betonu. Dá se tedy říci, že přidání metakaolínu jako příměsi do betonu, zlepšuje jeho

odolnost vůči tlakové vodě, jeho vodonepropustnost a i s tím spojené vlastnosti, jako je degradace betonu ve vodním chemicky agresivním prostředí. [13]



Obr. 5 Metakaolin

2 BIOPLYNOVÉ STANICE A KOMPOSTÁRNY

Jsou moderní a ekologická zařízení, která zpracovávají širokou škálu materiálů nebo odpadů organického původu. Kompostárna zpracovává odpady a suroviny aerobní řízenou digescí. Samotné kompostování probíhá v pásových hromadách. Kvalita procesu je kontrolována měřením teplot a u vyzrálého kompostu následnou chemickou analýzou. [1]

2.1 Bioplynové stanice

Zpracovávají organickou hmotu prostřednictvím procesu anaerobní digesce bez přístupu vzduchu. V uzavřených reaktorech vzniká bioplyn, který je nejčastěji využíván k výrobě elektřiny a tepla. Vedlejším produktem je digestát, který lze dále zpracovat popř. použít jako kvalitní hnojivo. [1]

Téměř všechny živočišné a rostlinné organismy obsahují vodu, tuky, proteiny a sacharidy. Proteiny jsou z aminokyselin, například cysteinu

a metioninu. Součástí obou je síra. V bioplynovém fermentoru dochází k oxidaci těchto aminokyselin v důsledku různých procesů látkové výměny určitých organismů (bakterií), které oxidují síru, a také bakterií, jež snižují obsah síry. V důsledku těchto mikrobiologických procesů přeměny vzniká kysličník siřičitý, ze kterého se tvoří ve vodě kyselina siřičitá (H_2SO_3), potažmo kyselina sírová (H_2SO_4). [1]

2.1.1 Fermentor

Jiným slovem se dá označit také jako bioreaktor, je místo, ve kterém probíhá samotný proces rozkladu organických materiálů a tvorba bioplynu. Fermentory jsou vysoké betonové nádrže obdélníkového tvaru, do kterých se ukládá organický materiál pomocí kolového nakladače a dno je odvodněno do přilehlých nádrží. Toto prostředí je navrženo k biochemickým procesům biologických činitelů, jako jsou například enzymy. Dochází zde k řadě fyzikálně-chemickým a biochemickým procesům jako je například fermentace, neboli kvašení. Fermentory se využívají také v odpadním hospodářství, jako jsou čistírny odpadních vod. Tyto uzavřené komory jsou plynotěsné a musí splňovat odolnost proti působení agresivních látek. Tyto požadavky splňují prefabrikované dílce z železobetonu, které jsou spojené pomocí speciálních zámků, pryžového těsnění a těsnících tmelů. [1]

2.2 Silážní žlaby

Prefabrikované dílce ve tvaru obráceného T nebo L, spojené betonovou podstavou do širokého U, do kterých se naváží sklizené krmivo pro hospodářská zvířata. Do silážních žlabů je sklizené krmivo navezeno a udusáno. Po naplnění žlabů se organický materiál překryje izolačním materiálem, aby nedocházelo k výměně vzduchu. Tímto způsobem je krmivo obdobným způsobem konzervováno a vzniká tzv. siláž. [1]



Obr. 6 Výroba betonové podlahy v silážním žlabu

2.2.1 Silážování

Výroba siláže ve žlabech je v dnešní době standardem a je nejen důležitým základem pro úspěšné mléčné hospodářství a živočišnou výrobu, nýbrž tvoří podstatnou základnu pro získávání energie v zemědělských zařízeních na bioplyn. Výroba siláže z rostlinných krmiv probíhá bez přístupu vzduchu kvašením kyseliny mléčné. Při výrobě siláže se nerozkládají pouze biopolymery, nýbrž vznikají také organické kyseliny. Silážování uchovává krmivo ve šťavnatém stavu. Konzervace probíhá působením mléčného kvašení cukrů obsažených v silážované surovině. Zachovává se obsah živin a vitamínů uchovaného materiálu a výsledná kvalita siláže je přímo úměrná kvalitě použitých surovin a kvalitě zpracování i následného uskladnění. Důležité pro silážování je co nejdříve vytvořit dostatečné množství kyseliny mléčné, která je základním konzervačním činitelem při které se dosáhne kyselosti při pH

4 a také se zamezí nežádoucích hnilobných procesů. Nicméně tyto kyseliny jsou chemicky velmi silně agresivní a nechráněný povrch železobeton jim neodolává. [1][3]

3 DEGRADACE BETONU

Degradace je pojem pro zhoršení kvality či znehodnocení. Degradovat může vše v celém rozsahu betonu, od cementu až po ocelovou výztuž a kamenivo. Každý materiál má svoji slabinu a my se ho snažíme ochránit. Pórovitá struktura betonu má na degradaci zásadní vliv, ovlivňuje propustnost pro všechny plyny a kapaliny nacházející se v jeho okolí.[3]

Chemická koroze betonu

Podle povahy děje mezi složkami betonu a kapalných agresivním prostředím jsou rozlišovány tři druhy koroze.

3.1 Koroze I. typu

Je výsledkem rozpouštění a vyluhování složek cementového kamene. Existují tzv. hladové vody, které mají nízkou přechodnou tvrdost. Jde o vody z řek, rybníků a vody srážkové. Tyto vody rozpouštějí Ca(OH)_2 z cementového kamene. Ca(OH)_2 se v betonu po jednom měsíci nachází asi 9 % - 11 % a po třech měsících asi 15 % hmotnosti cementu. Rozpustnost Ca(OH)_2 je ovlivněna volnými ionty v roztocích, které na beton působí. Například CA^{2+} a OH^- snižují jeho rozpustnost a naopak ionty SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ , K^+ rozpustnost zvyšují. Rychlost koroze je úměrná rychlosti proudění a hydrostatickému tlaku vody. Vyloužením Ca(OH)_2 dochází k redukci pevnosti betonu a to 40 % - 50 % při vyloužení 15 % - 30 % z celkového obsahu CaO . [3][11]



Obr. 7 Jímka v elektrárně narušena odpadní vodou

3.2 Koroze II. typu

Tato koroze je způsobena reakcemi složek betonu spolu s rozpuštěnými agresivními látkami při vzniku sloučenin. Koroze II. typu dělíme na 4 základní koroze a to:

- Korozi způsobenou kyselinami za vzniku rozpustných či nerozpustných solí,
- Korozi uhličitou,
- Korozi způsobenou alkáliemi,
- Korozi hořečnatou

3.2.1 Kyselinová koroze

Kyselinová koroze nejvíce hrozí v průmyslových závodech, kde se nachází spousta silných minerálních kyselin (H_2SO_4 , HCl , HNO_3). Tyto koroze často také probíhají za přítomnosti odpadních od a vod přírodních. Kyselky reagují i dešťové vody s nízkým pH. V průmyslových oblastech byly v 80. letech naměřeny hodnoty mezi pH 3 - 4.

Rychlost koroze je přímo ovlivněna rozpustností vápenatých solí a na chování vrstvy korozních produktů. Kyseliny reagují hlavně s hydroxidem vápenatým ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), hydroalumináty a hydrosilikáty, reakcí s nimi vytvářejí právě rozpustné vápenaté soli. Rychlost koroze je určována průběhem reakcí agresivního prostředí s betonem a rychlostí výměny kapalného okolního prostředí. Na povrchu betonu dochází k narušování celistvé struktury za vzniku nových reakčních produktů. Ty se mohou projevat postupným odlupováním tenkých vrstviček nebo změnou struktury povrchu betonu na pastovitou. Pokud jsou druhotné produkty málo rozpustné ve vodě a okolí je neodnáší, tvoří mezi agresivním prostředím a betonem bariéru, která zpomaluje degradaci betonu ve větších hloubkách. [3][11]

Tabulka 1 – Druhy chemických látek způsobující korozi II. typu.

Kyseliny silné	Kyseliny slabé	Soli a zásady
fosforečná sírová chlorovodíková dusičná	uhličitá sirovodíková huminové	hořečnaté ionty amonné soli hydroxid amonný chlorid amonný, chloridy síran hořečnatý

Podle toho, jestli je kyselina zařazena jako silná, nebo slabá, vystihuje nebezpečnost koroze při styku těchto kyselin s betonem. Kyselá agresivní prostředí, jsou na základě experimentů rozdělena do tří skupin:

- Do 1. skupiny patří kyseliny a roztoky solí, vytvářející jednosložkovou, nebo více složkovou gelovou vrstvičku na povrchu cementového kamene s jeho stykem. Je to především kyselina solná a dusičná.
- Do 2. skupiny patří kyseliny a roztoky solí, vytvářející gelovou nebo krystalickogelovou vrstvu na povrchu cementového tmele v závislosti na jejich koncentraci. Jedná se o kyselinu sírovou (H_2SO_4), fosforečnou (H_3PO_4) a siřičitou (H_2SO_3).

- do 3. skupiny patří kyseliny a roztoky solí, které vytvářejí na povrchu cementového kamene vrstvy smíšeného charakteru se zvýšenou hutností. Jedná se o kyselinu fluorvodíkovou (HF), fluorokřemičitou (H_2SiF_6), šťavelovou ($C_2H_2O_4$) atp. [3]

3.2.2 Koroze huminovými látkami

Jsou to slabé organické kyseliny, vznikající humifikačními pochody při biologickém rozkladu živočišných a organických látek. Hnědé až černě zbarvené vysokomolekulární cyklické sloučeniny s vysokým obsahem uhlíku, kyslíku, vodíku a dusíku. Přítomnost humitanů v čerstvém betonu již v malém množství zabraňuje tuhnutí betonu. Huminát vápenatý vznikající s hydroxidem vápenatým ($Ca(OH)_2$) se hromadí na povrchu a vytváří ochranný povlak, který zabraňuje dalšímu vyluhování. Pokud je prostředí pohyblivé tak se povlak omývá a degradace postupuje. [5][3]

3.2.3 Koroze způsobená alkáliemi

Roztoky alkálií o koncentraci větší než 50 g NaOH (KOH) v 1 litru H_2O reagují s křemičitou a hlinitou složkou cementového tmelu za vzniku rozpustných křemičitanů a hlinitanů, které jsou následně vymývány. [3][5][7]

3.3 Koroze III. typu

Znakem tohoto druhu koroze je nahromadění a krystalizace solí, nebo reakčních produktů agresivního prostředí v pórech betonu. Tyto póry a kapiláry zvětšují svůj objem díky krystalizaci. Narozdíl od předchozích druhů koroze, se při této nevymývá cementový tmel, naopak v pórech rostou nové krystaly nerozpustných solí, které působí značný tlak na cementové stěny a tím rozrušují strukturu betonu zevnitř. Na první pohled se může zdát, že beton nabývá pevností, ale pouze do bodu, kdy jsou póry zaplněny krystaly, které mají větší sílu při růstu než samotný beton pevnosti. Tím se nakonec beton roztrhá zevnitř a ztratí na

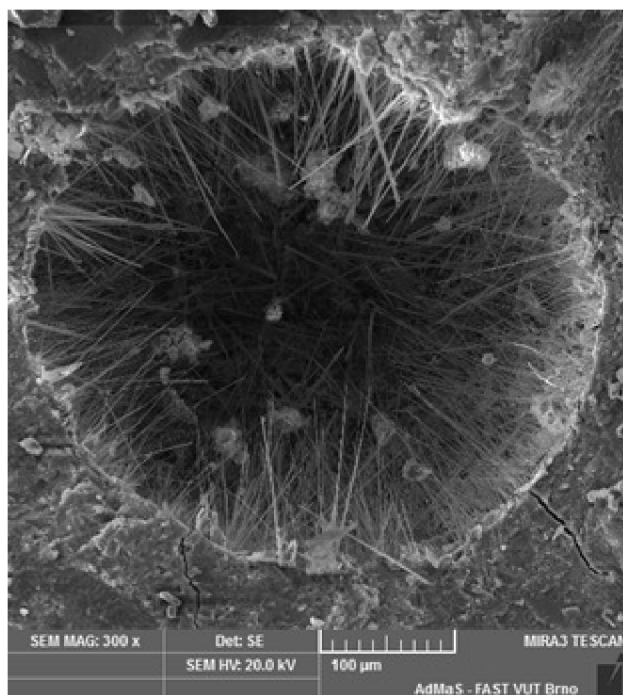
integritě. U hutných betonů, se může koroze III. třídy projevit až po několika letech. [3][7]

3.3.1 Síranová koroze betonu

Příčinou koroze jsou síranové anionty (SO_4^{2-}) a produkty jejich interakce s betonem. Do betonu vnikají v různých koncentracích zároveň s kationty vápenatými, hořečnatými a sodnými ve vodě. Jsou dvě formy síranové koroze betonu vyrobeného z portlandského cementu:

- tvorba sádrovce a ettringitu
- tvorba thaumasitu

V alkalickém pórovém roztoku, který obsahuje hydroxidy sodíku, vápníku a draslíku uvolněné během hydratace cementu, reaguje hydroxid vápenatý se síranovými ionty za vzniku síranu vápenatého (sádrovce). Následuje reakce s kalciumalumináthydrátem za vzniku kalciumsulfoalumináthydrátu (ettringit). Je dokázáno, že prvotním efektem reakcí, je zvýšení měrné hmotnosti a pevnosti betonu, protože vznikající ettringit zaplňuje póry v betonu. Při absolutním zaplnění pórů vznikají růstové tlaky, které narušují strukturu betonu a tím výrazně snižují pevnosti a jiné vlastnosti betonu. Pokud je koncentrace $\text{Ca}(\text{OH})_2$ v cementovém kameni nízká (pod $0,46 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$ v přepočtu na CaO), pak k reakci mezi zásaditými alumináty a SO_4^{2-} nedochází. Nevznikají tedy napětí, které by mohli poškodit beton. [3][7][11]



Obr. 8 Zaplnění pórů v mikrostruktuře vzorků krystaly ettringitu

3.4 Rozdělení betonů do tříd podle vlivu agresivního prostředí

Betony mají několik tříd agresivního prostředí, kam se mohou zařadit. Existují třídy XC - pro beton s nebezpečím koroze vlivem karbonatace, XD - pro beton s nebezpečím koroze vlivem chloridů, XF - pro betony vystavené mrazu a rozmrazování, XM pro beton s pohyblivým mechanickým zatížením a XA - pro betony vystavené vlivům vnějšího agresivního prostředí. Všechny tyto třídy spadají pod normu ČSN 206-1 [10] Třídy prostředí XA, se dělí do 3 různých druhů podle agresivity prostředí (viz tabulka 2). [10]

Tabulka 2 – Rozdělení druhů agresivního prostředí.

Chemická charakteristika	XA1 slabě agresivní	XA2 středně agresivní	XA3 vysoce agresivní
SO ₄ ²⁻ (mg l ⁻¹)	≥ 200 a ≤ 600	> 600 a ≤ 3000	> 3000 a ≤ 6000
pH	≤ 6,5 a ≥ 5,5	< 5,5 a ≥ 4,5	< 4,5 a ≥ 4,0
CO ₂ (mg l ⁻¹) agresivní	≥ 15 a ≤ 40	> 40 a ≤ 100	> 100 až do nasycení
NH ₄ ⁺ mg/l	≥ 15 a ≤ 30	> 30 a ≤ 60	> 60 a ≤ 100
MG ²⁺ mg/l	≥ 300 a ≤ 1000	> 1000 a ≤ 3000	> 3000 až do nasycení
Doporučené mezní hodnoty pro složení a vlastnosti betonu			
Max. vodní součinitel	0,55	0,5	0,45
Min. pevnostní třída	C30/37	C30/37	C35/45
Min. obsah cementu	300	320	360
Jiné požadavky		síranovzdorný cement pro síranovou XA2, XA3	

Betony v zemědělství jsou velmi zatížené agresivním prostředím v kategorii XA3, proto je nutné, aby vodní součinitel byl maximálně $w = 0,45$. Pevnostní třída betonu minimálně C35/45 a minimální obsah cementu 360 kg. Zároveň z normy ČSN EN 206-1 vychází parametry maximální hloubky průsaku 20 mm pro takto zatěžované betony.

Norma ČSN 731214, 731215 a 731216 pojednává o navržení opatření proti působení agresivních vod na betonové konstrukce. [10][3]

Tabulka 3 – Opatření proti působení agresivních síranových vod (SO₄)

Tabulka b Přehled primárních opatření proti působení síranových agresivních podzemních vod

podmínky působení	jednotlivá opatření								
průměr piloty	přes 500 mm					500 – 300 mm			
množství SO ₄	250	500	1200	3000	5000	250	500	1200	3000
použitý cement	PC	SPC	SPC	SVPC	SVPC	PC	SPC	SPC	SVPC
množství cementu	300	350	400	350	400	400	400	400	450
přísada, příměs	–	–	1)	–	2)	–	–	1)	–
min. vodotěsnost	V4	V4	V4	V4	V4	V4	V4	V4	V4
1) provzdušňovací přísada a popílek v množství 100 kg.m ⁻³									
2) provzdušňovací přísada									

Tabulka 4 – Opatření proti působení kyselých agresivních vod (pH)

Tabulka **d** Přehled primárních opatření proti působení kyselých agresivních vod

podmínky působení	jednotlivá opatření					
tloušťka konstrukce	přes 500 mm			500 – 300 mm		
pH nejméně	6,5	6,0	5,5	6,5	6,0	5,5
množství cementu	300	350	400	350	400	450
použitý cement	PC nebo SPC					
stupeň vodotěsnosti	V4	V4	V8	V4	V8	V8

Pro zvýšení odolnosti proti kyselým vodám je nutné zajistit stupeň vodotěsnosti betonu V8 (nejvyšší tlak vody 800 kPa). Je také doporučeno použít struskový cement, nebo struskový cement s přírodními pucolány.

4 VODONEPROPUSTOST BETONU

Vodotěsnost betonu koreluje s jeho odolností proti okolním kapalným agresivním prostředím, které sebou voda ve styku s betonem přináší. Beton se považuje za vodonepropustný, pokud je průměrná hloubka průsaku menší než 20 mm a maximální průsak není větší než 50 mm [10]. Vodonepropustnost je závislá na pórech v betonu, kterými právě volná voda může proudit do betonu a tím se dříve dostat do větší hloubky a působit větší škody. [5][12][11]

Vodotěsnost se zkouší na sadě nejméně tří zkušebních těles ve stáří 28 dní/90 dní, které jsou během tvrdnutí uloženy podle účelu zkoušky v prostředí podle ČSN EN 12390-2. Ve zvláštních případech je možné prověřovat vodotěsnosti i pro jiné stáří betonu. [21]

4.1 Zkouška „Hloubka průsaku tlakovou vodou“ dle ČSN EN 12390

4.1.1 Všeobecně

1. Účelem zkoušky je provedení vodotěsnosti betonu při průkazných a výrobních kontrolních zkouškách.
2. Vodotěsnost betonu se zkouší na betonových zkušebních tělesech, které se vystavují tlaku vody, působícímu po stanovenou dobu.
3. Vodotěsnost betonu se vyjadřuje stupněm vodotěsnosti, označeným symbolem HV a příslušným číslem, což je desetinásobek nejvyššího tlaku vody v MPa.
4. Stupně vodotěsnosti jsou HV2, HV4, HV8, HV12.
5. Vodotěsnost se zkouší na sadě nejméně tří zkušebních těles ve stáří 28 dní/90 dní, které jsou během tvrdnutí uloženy podle účelu zkoušky v prostředí podle ČSN EN 12390-2. Ve zvláštních případech je možné prověřovat vodotěsnosti i pro jiné stáří betonu.
6. Sada zkušebních těles se zhotoví při průkazných zkouškách z jedné záměsi, při výrobních kontrolních zkouškách je každé těleso vyrobeno z jiné záměsi.
7. Zkušební tělesa musí způsobem výroby a ošetřením, přesností tloušťky a mírou poškození odpovídat požadavkům ČSN EN 12390-1 a ČSN EN 12390-2.
8. Zařízení pro zkoušku vodotěsnosti se skládá z vodotlačné stolice pro upnutí 3 až 6 zkušebních těles a zařízení pro vyvozování vodního tlaku. průměr těsnícího kroužku vodotlačné stolice je 75 mm.
9. Zkušební tělesa se před zkouškou vodotěsnosti změří a zváží a stanoví se objemová hmotnost podle ČSN EN 12390-7.

4.1.2 Zkušební tělesa

Pro zkoušky se používají následující zkušební tělesa:

- - krychle s délkou hrany 150 mm,
- válcová zkušební tělesa o průměru 150 mm a výšce minimálně 150 mm
- krychle s délkou hrany 200 mm a výšce 150 mm.
- Pro tenkostěnné konstrukce tloušťky menší než 150 mm má být tloušťka zkušebního tělesa rovna tloušťce konstrukce, přičemž délka hrany základny, popř. její průměr je nejméně 150 mm.

4.1.3 Postup zkoušení

- Povrch zkušebního tělesa, který přijde do styku s tlakovou vodou, se předupraví pendlováním či odsekáním tak, aby byla odstraněna vrstva cementového kamene až na jádro a odhaleny zrna kameniva.
- Zkušební těleso se upne do vodotlačného zařízení, plocha betonu, na niž působí vodní tlak, je utěsněna pryžovým kroužkem tak, aby nedocházelo k úniku vody. Po dobu působení vodního tlaku se kontroluje, zda voda neprosákla do boků nebo na protilehlou stranu zkušebního tělesa. Jestliže dojde k průsaku vody je třeba zkoušku opakovat na jiné sadě.
- Při zatěžování zkušebních těles vodním tlakem je postup následující:
 - Stupeň vodotěsnosti HV2 (nejvyšší tlak vody 200 kPa) - beton se v prvních 24 hodinách vystaví působení tlaku 100 ± 10 kPa a v dalších 24 hodinách se vystaví působení tlaku tlakem 200 ± 20 kPa.
 - Stupeň vodotěsnosti HV4 (nejvyšší tlak vody 400 kPa) - beton vystaví působení tlaku 400 ± 40 kPa po dobu 48 hodin
 - Stupeň vodotěsnosti HV8 (nejvyšší tlak vody 800 kPa) - beton se v prvních 24 hodinách vystaví působení tlaku 400 ± 40 kPa

a v dalších 48 hodinách se vystaví působení tlaku tlakem 800 ± 50 kPa.

- Stupeň vodotěsnosti HV12 (nejvyšší tlak vody 1200 kPa) - beton se v prvních 24 hodinách vystaví působení tlaku 400 ± 40 kPa a v dalších 48 hodinách se vystaví působení tlaku tlakem 1200 ± 60 kPa.

Po uplynutí předepsané doby působení tlaku vody je zkouška ukončena a provede se vyhodnocení zkoušky.

4.1.4 Vyhodnocení výsledků zkoušky

- Po ukončení zkoušky se zkušební těleso vyjme ze zkušebního zařízení.
- Zkušební těleso se rozlomí v polovině, kolmo k povrchu, na který působila tlaková voda.
- Lomová plocha se nechá oschnout do té míry, aby byl zřetelně vidět průsak vody.
- Hranice oblasti průsaku vody se označí.
- Změří se maximální hloubka průsaku od spodní plochy zkušebního tělesa (plocha na kterou působila tlaková voda).
- Výsledkem zkoušky je maximální hloubka průsaku, udávaná s přesností na 1 milimetr, přičemž jako vyhovující se bere max. hloubka průsaku 60 mm. [21]

4.2 Póry v betonu

Nejzásadnější vliv na pórovinovou strukturu mají samotné složky betonu a jeho způsob zpracování.

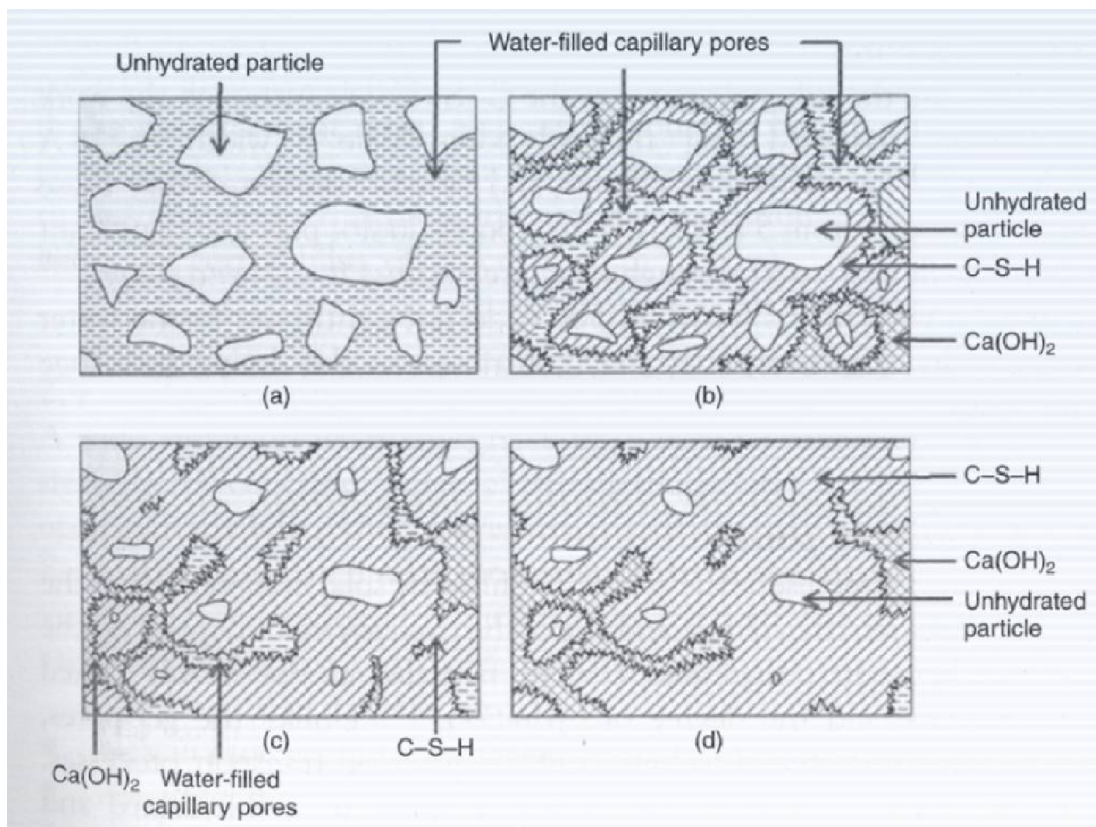
Vznik pórů ovlivňuje vodní součinitel, přísady, příměsi, ale také samotný způsob zhutňování čerstvé směsi a ukládání do bednění (forem). [9] Pro dosažení nejlepší redukce degradace musíme docílit co nejmenšího

přenosu škodlivých látek do betonu a to zajistíme regulací pórů, které propouštějí vodu a s ní také tyto látky. Rozdělení pórů a jejich potencionálních vlastnosti je uvedeno v tabulce 5. [5][7]

Tabulka 5 – Rozdělení pórů dle velikosti.

Označení	Průměr	Charakteristika	Vliv na vlastnosti	Stav vody
Makropóry	> 0,5 mm	velké dutiny	Pevnost	Volná
Mikropóry	500 - 15 μm	Velké kulovité dutiny	Pevnost, propustnost	Volná
Kapilární póry	15 - 0,05 μm	Velké kapiláry	Pevnost, propustnost	Volná
	5 - 10 nm	Středně velké kapiláry	Pevnost, propustnost, smrštění	Mírně působí na povrchové napětí
Gelové póry	10 - 2,5 nm	Malé (gelové) kapiláry	Smrštění	Silně působí na povrchové napětí
	2,5 - 0,5 nm	Mikropóry, gelové póry, póry mezi krystality	Smrštění	Voda silně adsorbovaná
	0,5 nm	Póry v krystalitech	Smrštění	Strukturní voda

Je důležité zabránit vzniku pórů s velikostí od 5 mm do 1 mm, to jsou právě ty, které dovolují kapilární proudění vody. Hlavní příčinou vzniku pórové struktury betonu je nadměrné množství záměsové vody a změna objemu složek hydratací cementu.



Obr. 9 Průběh hydratace složek betonu při větším množství vody

Pro menší pórovitost, je nutné zvolit vhodné složky betonu, jako je optimální křivka zrnitosti kameniva, aby bylo zaplněno co nejvíce míst a poté i vhodné poměry pojivových složek. Při vodním součiniteli nad 0,40 zůstane spousta vody v cementové matrici, kde postupem času vznikají kapilární póry při jejím odpařování. Vhodné příměsi do betonu jako například mikrosilika nebo jiné rekrystalizační látky, které vyplní kapilární póry betonu tak, aby nebyl možný přenos vody a tím s ní i škodlivých látek. [9]

5 PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části bakalářské práce bylo cílem navrhnout složení betonu C35/45 a C30/37, konzistence S3 pro prostředí XA3. Po 28 dnech normálního zrání uložit betonové vzorky do vodných roztoků s vysokou koncentrací síranů, dusičnanů, pH 3-3,5 a silážních šťáv.

Cílem práce mělo být sledování degradace betonů pomocí nedestruktivních metod (ultrazvuk) a následné vyhodnocení vnitřní změny v betonu a dopadů na pevnosti v tlaku.

5.1 Navrhované receptury

Při navrhování receptur byly použity 3 specifické recepty, kdy u prvního byl použit jako pojivo pouze cement CEM I 42,5 R, u druhé receptury byl použit cement CEM I 42,5 R, 15 % jemně mleté strusky a 15 % elektrárenského popílku, u třetí receptury byl použit cement CEM III/A a 15 % elektrárenského popílku. Následně tyto 3 receptury byly pojaty jako referenční. Ke každé receptuře byly v další části přidány přísady a příměsi (Sika WT 200 P, Sika Control-45, ChrysoSerenis, ChrysoFuge a Stachema SL3) vždy v uvedených poměrech jako je v technickém listě produktu.

Tabulka 6 – Tabulka receptur betonů

Název složky betonu	CEM I 42,5 R, Hranice	CEM III/A	Struska 15 %	Popílek 15 %	DTK 0-4 mm, Tovačov	HDK 4-8 mm, Luleč	HDK 8-16 mm, Luleč	HDK 11-22 mm, Luleč	Plastifikátor Stachement 2489 (0,8%)	SIKA WT 200 P	SIKA Control 45	CHRYSO Serenis	CHRYSO Fuge	STACHEMA SL3	Voda
Název receptury betonu															
1. REF	350	-	-	-	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	-	182
2. REF SP	245	-	53	53	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	-	171
3. REF P	-	298	-	53	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	-	156
4. -SIKA	350	-	-	-	840	217	530	220	2,8	3,5	3,5	-	-	-	180
5. SP-SIKA	245	-	53	53	840	217	530	220	2,8	3,5	3,5	-	-	-	169
6. P-SIKA	-	298	-	53	840	217	530	220	2,8	3,5	3,5	-	-	-	156
7. -CHRY	350	-	-	-	840	217	530	220	2,8	-	-	5,25	3,5	-	166
8. SP-CHRY	245	-	53	53	840	217	530	220	2,8	-	-	5,25	3,5	-	156
9. P-CHRY	-	298	-	53	840	217	530	220	2,8	-	-	5,25	3,5	-	133
10. -STA	350	-	-	-	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	3,5	143
11. SP-STA	245	-	53	53	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	3,5	153
12. P-STA	-	298	-	53	840	217	530	220	2,8	-	-	-	-	3,5	169
Uvedené hodnoty jsou vztaženy na 1m ³ betonu v kg															

Z každé směsi bylo vytvořeno 39 zkušebních krychlí o rozměrech 100x100x100 mm. Po namíchání směsí, byla zkušební tělesa uložena do vody pro normální zrání. Následně byly ve stáří 7, 28 a 60 dnů stanoveny krychelné pevnosti v tlaku z 3 krychlí. Zbývající tělesa byla po 28 dnech uložena do vodných roztoků agresivních prostředí.

5.2 Použité přísady a příměsi v praktické části

5.2.1 Sika WT 200 P

Je to kombinovaná těsnící a krystalizační přísada do betonu se schopností překlenovat trhliny, která se používá pro snížení propustnosti betonu. Je to směs cementu, funkčních aditiv a plniva. Reakcí těchto materiálů dochází k hydrofobizaci betonu a rovněž k vyplnění soustavy pórů a kapilár v betonu k trvalému utěsnění betonu proti pronikání vody a dalších kapalin. [14]

- snižuje pronikání tlakové vody
- snižuje kapilární absorpci betonu
- zajišťuje samoregenerační vlastnosti betonu
- zvyšuje odolnost vůči chemickému namáhání
- snižuje propustnost pro vodní páru

5.2.2 Sika Control 45

je přísada redukující smrštění betonů a malt. Minimalizuje smrštění během procesu tuhnutí a vysychání. [15]

- snížení plastického smrštění v průběhu tuhnutí
- snížení smrštění v průběhu vysychání
- vlastnosti čerstvého betonu nejsou nepříznivě ovlivněny
- lze kombinovat s provzdušňovacími přísadami
- snížení kapilární nasákavosti
- neobsahuje chloridy ani látky urychlující korozi výztuže

5.2.3 ChrysoSerenis

Snižuje smrštění betonů již od počáteční fáze tuhnutí a zůstává účinná po dlouhou dobu zrání. Neuzavírá povrch betonu, ale snižuje povrchové napětí kapaliny v kapilárách, čímž přímo ovlivňuje nejdůležitější mechanismy zodpovědné za vznik smršťování. Neovlivňuje spotřebu vody v betonu a jeho vodní součinitel. V silně plastifikovaných betonech

snižuje jejich lepivost a přispívá tak ke zvýšení tekutosti. Lze v betonu kombinovat se všemi plastifikačními přísadami, včetně přísad na bázi polykarboxylátů. [16]

5.2.4 ChrysoFuge

Výrazně snižuje kapilární absorpci vody v maltách a betonech. Snižuje nebo odstraňuje pronikání tlakové vody. Drobné hydrofobní částice, které přísada obsahuje, reagují s vápnem v cementu, utěsňují kapilární póry a tím brání prostupu vody. Neovlivňuje vlastnosti čerstvého betonu ani mechanické pevnosti ztvrdlého betonu. Umožňuje optimalizovat množství cementu lepším rozptýlením cementových částic a tak zvýšit konečnou pevnost v tlaku. [17]

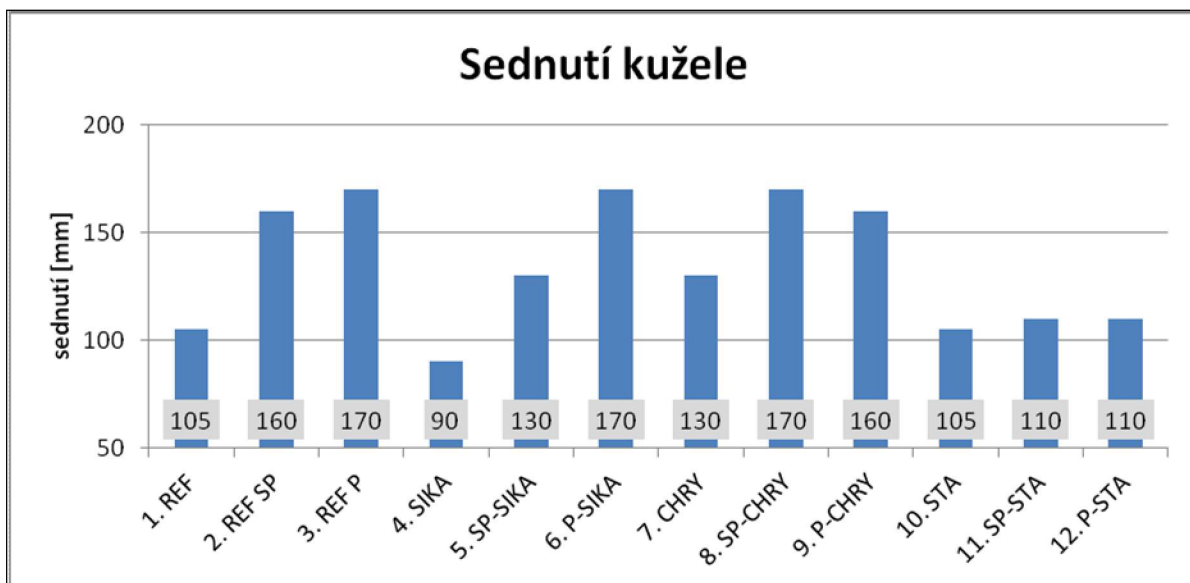
5.2.5 Stachema SL3

Organická přísada ke zvýšení užitečných vlastností mezerovitých betonů: [18]

- Zlepšení odolnosti proti agresivním látkám, kyselinám, solím, pohonným hmotám, silážním šťávám apod.
- Zvýšení mrazuvzdornosti
- Zvýšení odolnosti proti karbonataci.
- Zlepšení zpracovatelnosti a vybraných mechanických vlastností betonu.

5.3 Metodika práce

Směsi se míchaly v laboratořích fakulty stavební VUT v Brně. V průběhu míchání byla vždy provedena zkouška sednutí kužele a hodnoty od každé směsi byly zaznamenány.



Graf 1 – Sednutí betonové směsi

Následně byla směs znovu promíchána a uložena do ocelových troj-forem, které byly zhužněny na vibračním stole po dobu 10-12 sekund. Vzorke krychlí byly označeny a po odformování uloženy do vody.



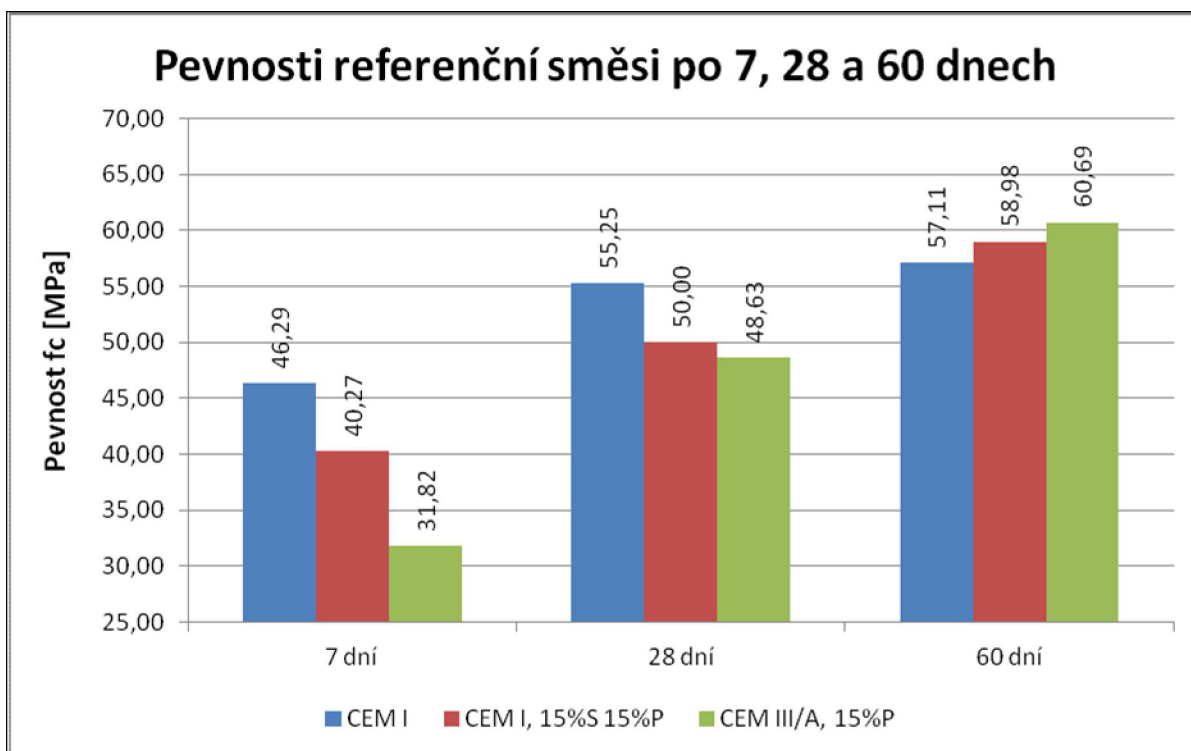
Obr. 10 Uložení zkušebních krychlí do vody

5.4 Krychelné pevnosti po 7, 28 a 60 dnech

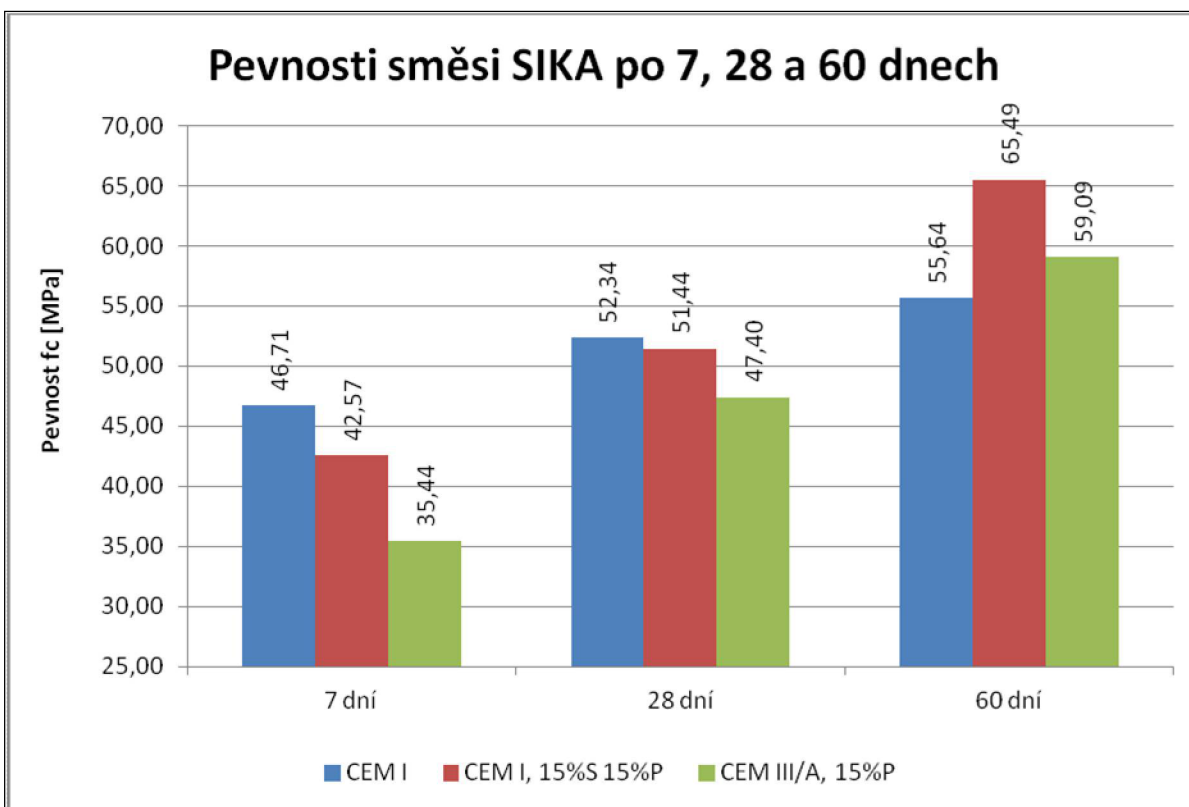
Po 7, 28 a 60 dnech byly krychle vytaženy z vodního uložení, proběhlo měření krychlí (4 výšky, 4 délky, 4 šířky) a následně byla provedena na vyrobených tělesech zkouška pevnosti v tlaku na laboratorním lisu.



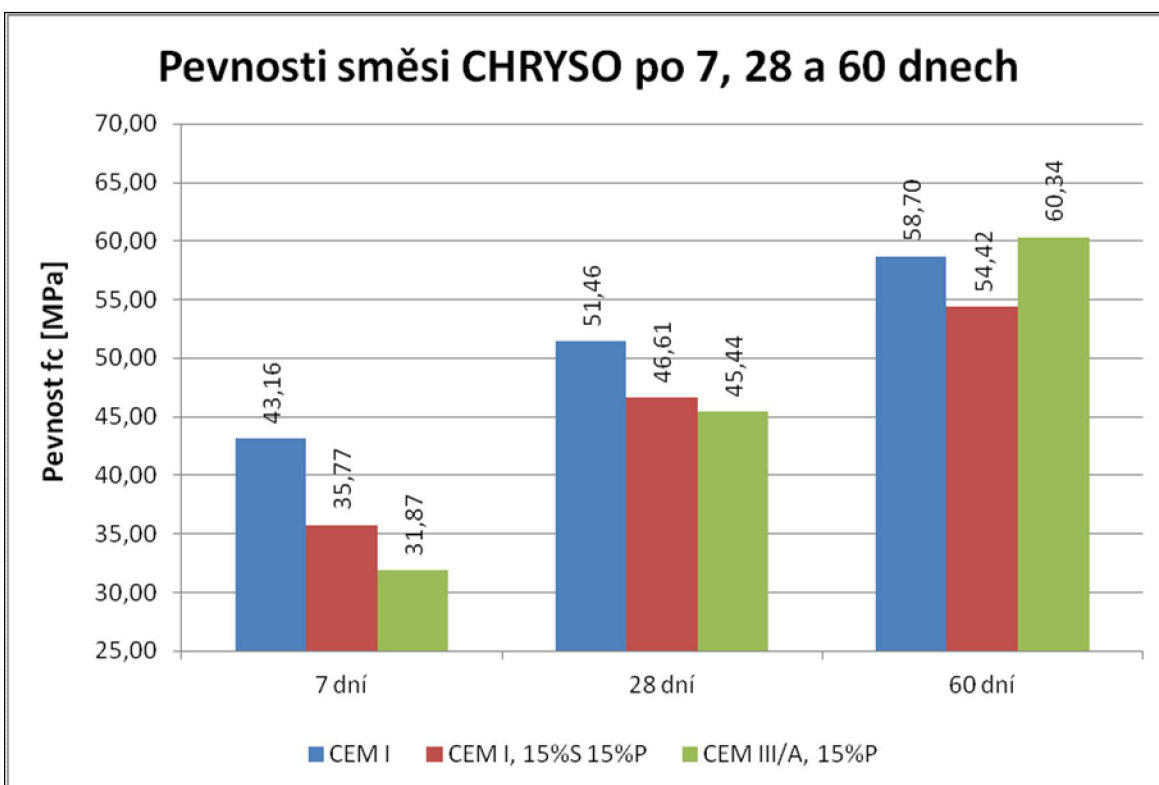
Obr. 11 správná deformace krychle po pomačkání na lisu



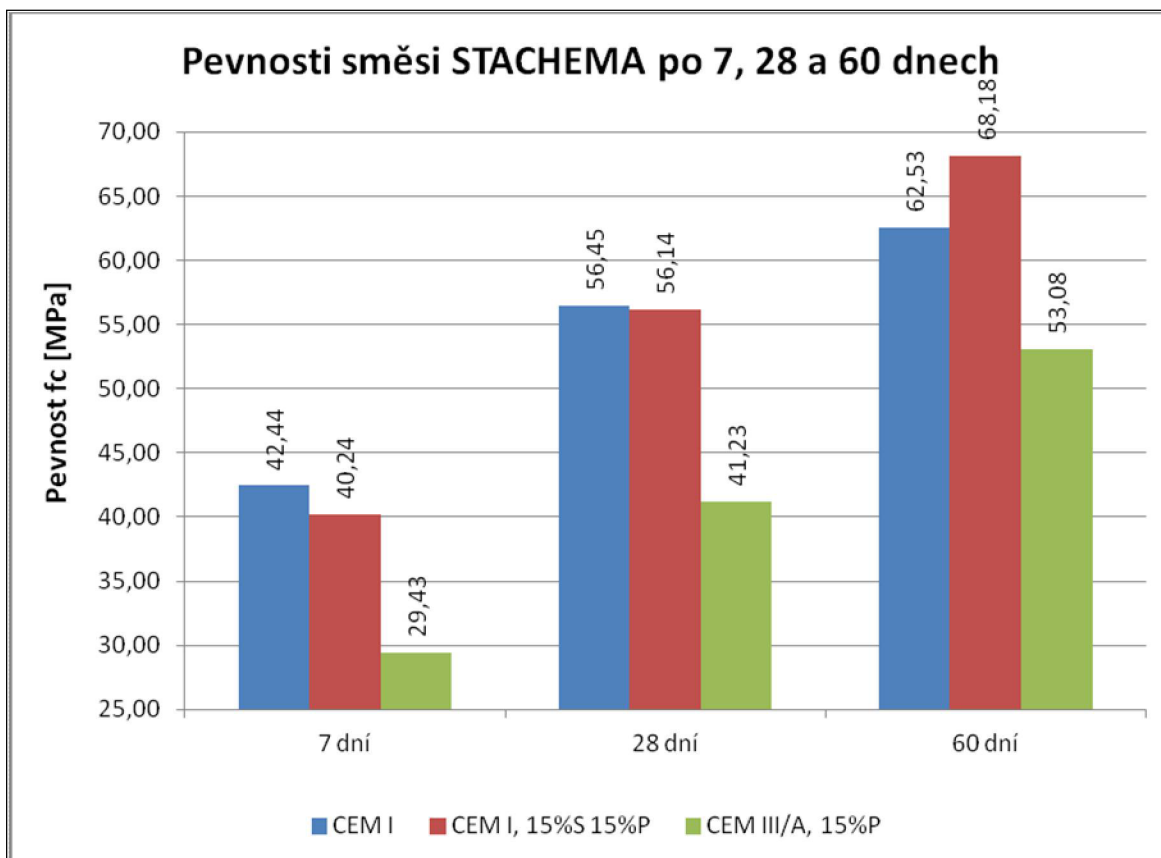
Graf 2 – Pevnosti referenční směsi po 7, 28 a 60 dnech



Graf 3 – Pevnosti směsi SIKA po 7, 28 a 60 dnech

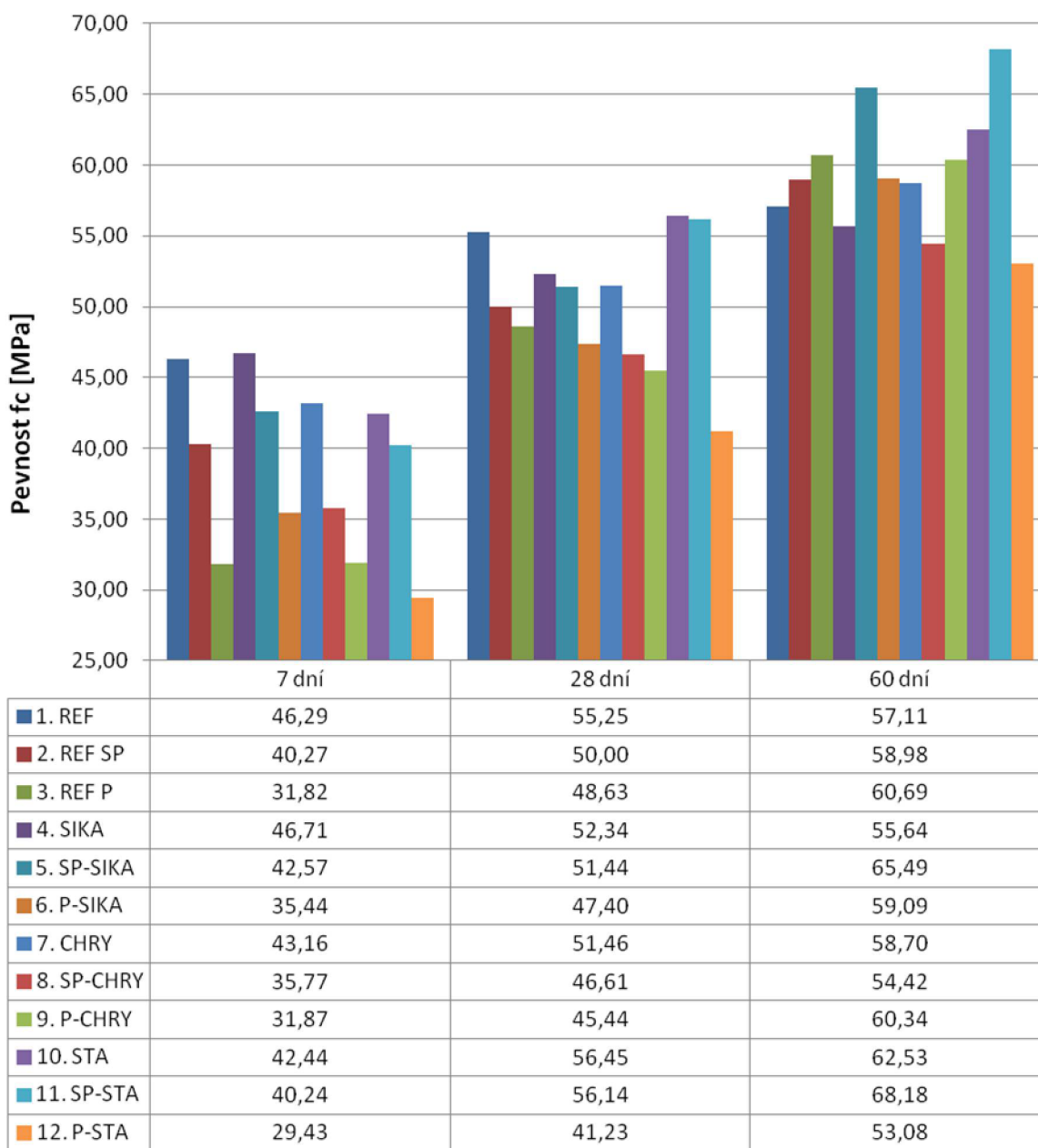


Graf 4 – Pevnosti směsi CHRYSO po 7, 28 a 60 dnech



Graf 5 – Pevnosti směsi STACHEMA po 7, 28 a 60 dnech

Srovnání pevností směsí po 7, 28 a 60 dnech

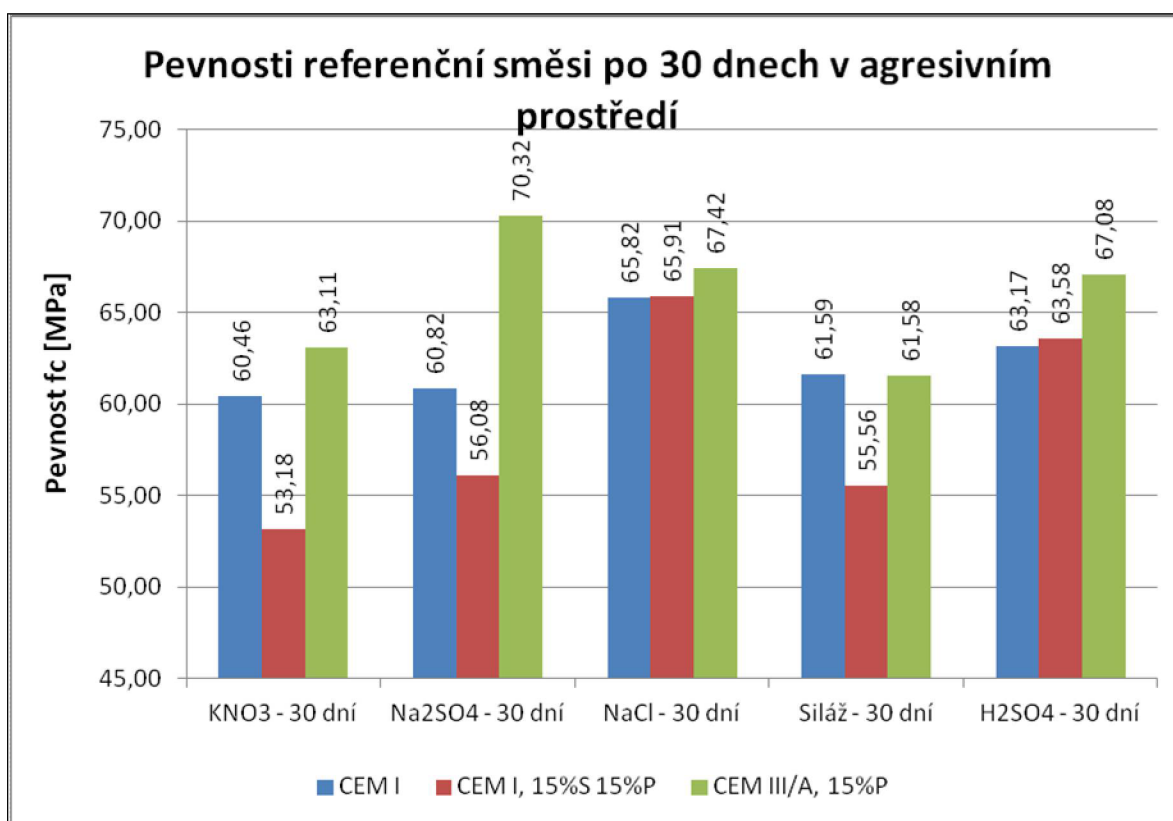


Graf 6 – Pevnosti všech směsí po 7, 28 a 60 dnech

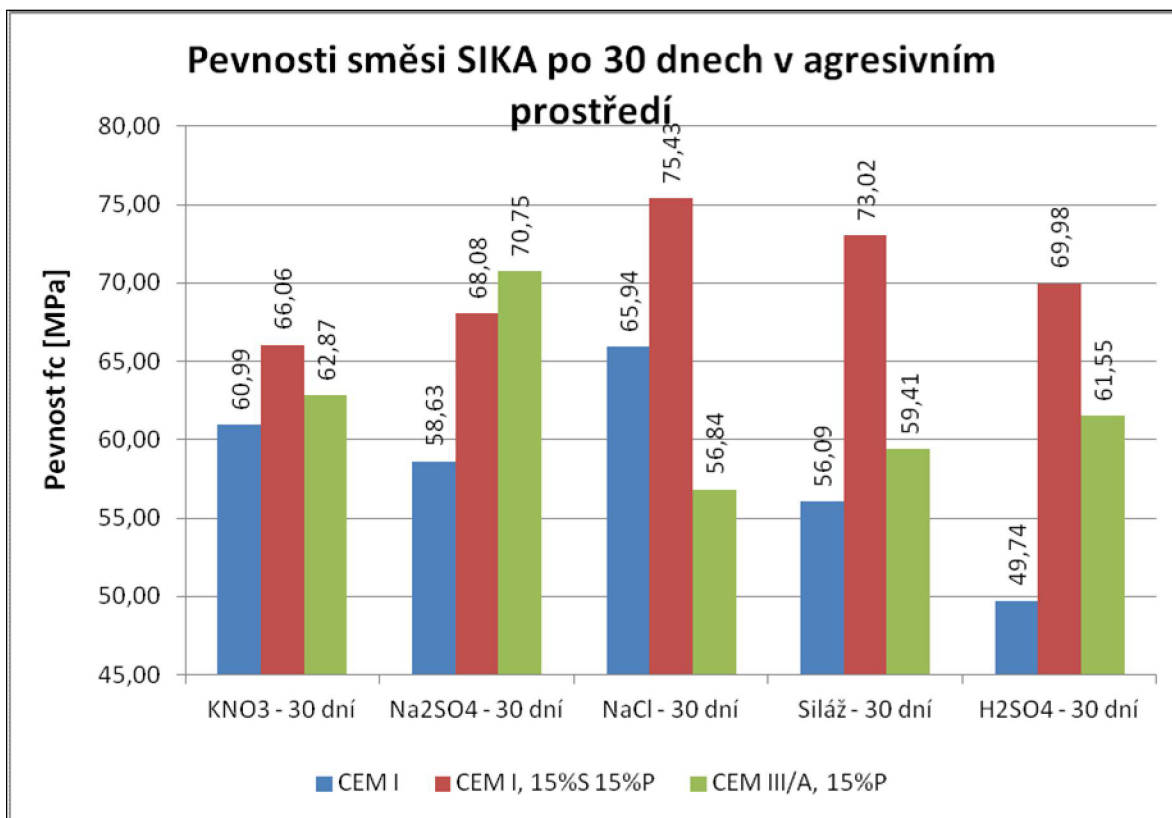
5.5 Uložení do agresivního prostředí

Vyrobené zkušební vzorky byly po odformování umístěny do zracích kádí. Po 28 dnech bylo navrženo 5 agresivních prostředí, do kterých byly následně vyrobené vzorky umístěny. Využito bylo plastových kádí s prokládky. Do každého prostředí bylo umístěno 6 zkušebních vzorků z každé směsi. Po 30 a 80 dnech uložení byly vzorky dále testovány.

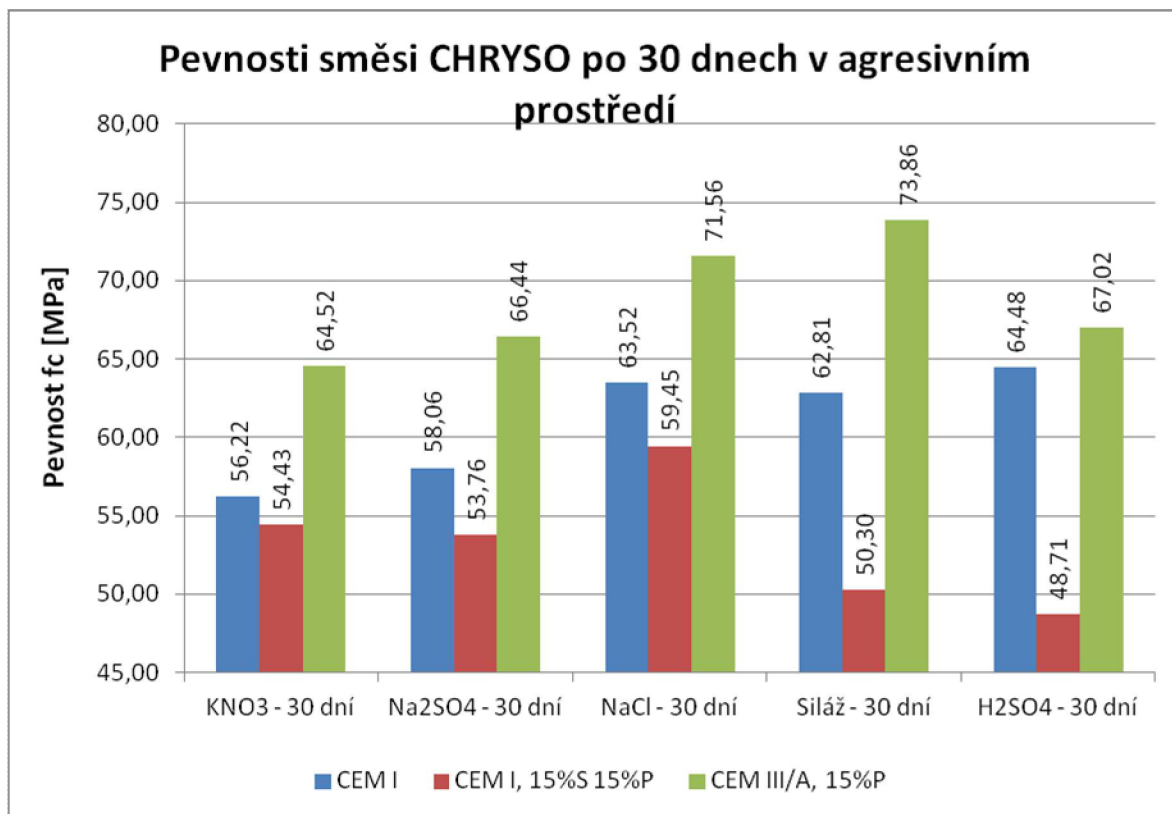
- NaCl
- Na₂SO₄
- KNO₃
- silážní šťávy
- H₂SO₄



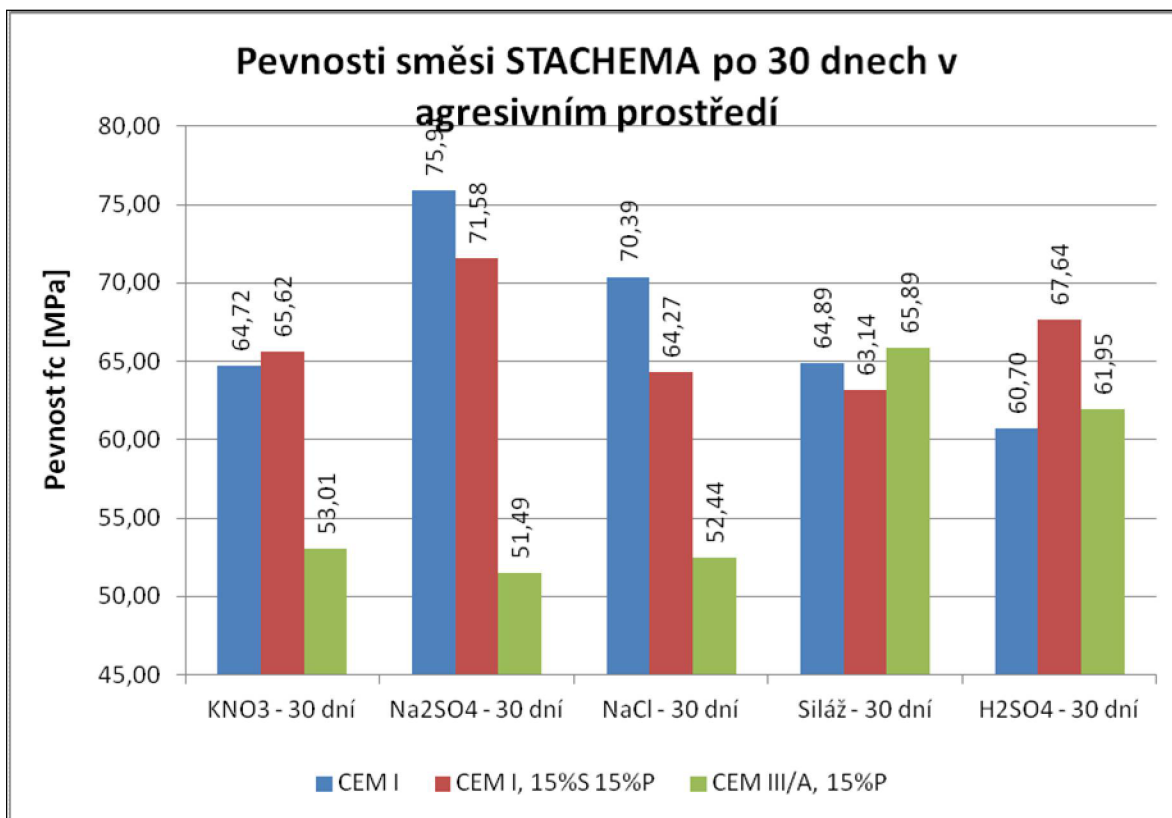
Graf 7 – Pevnosti referenční směsi po 30 dnech v agresivním prostředí



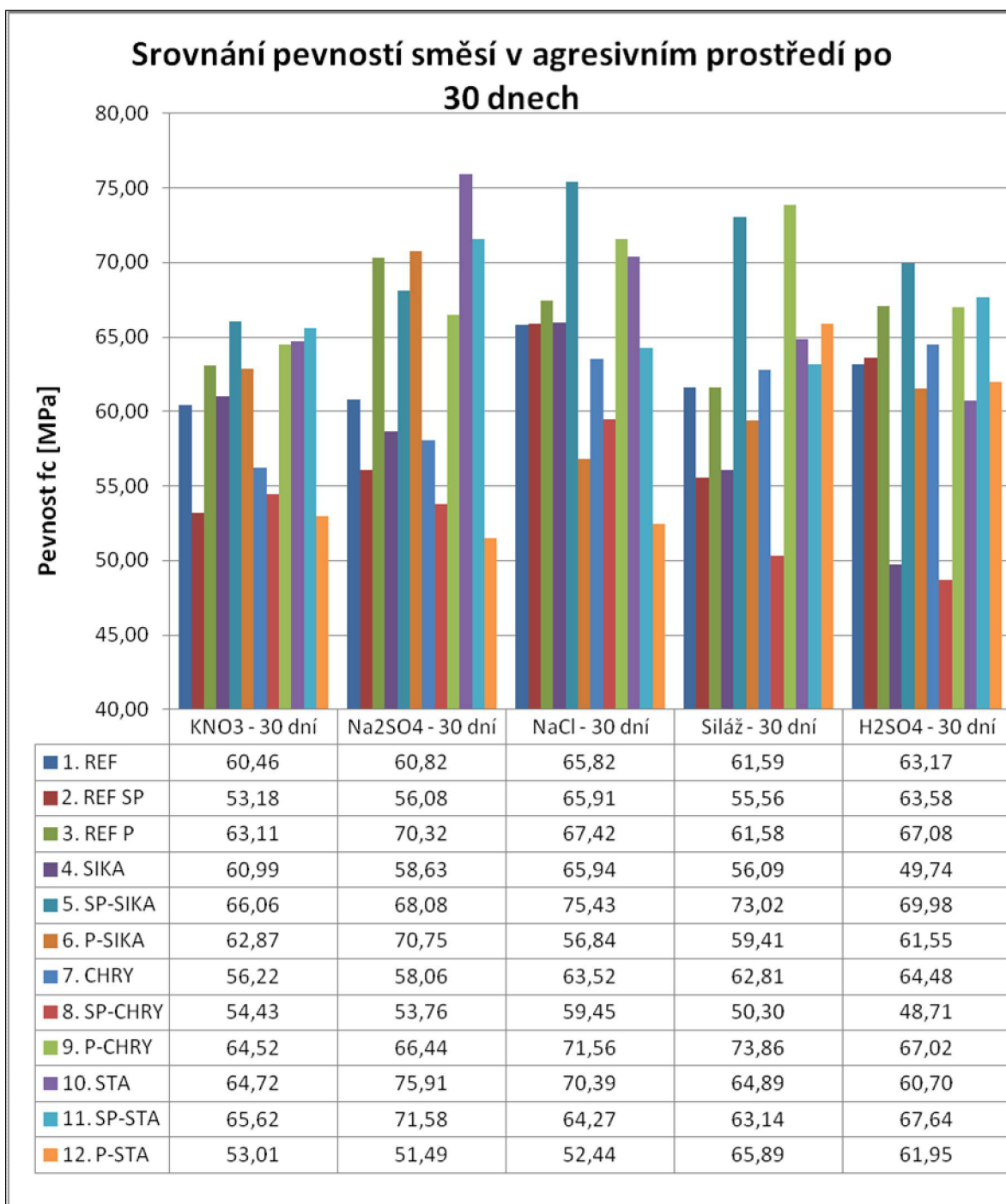
Graf 8 – Pevnosti směsi SIKA po 30 dnech v agresivním prostředí



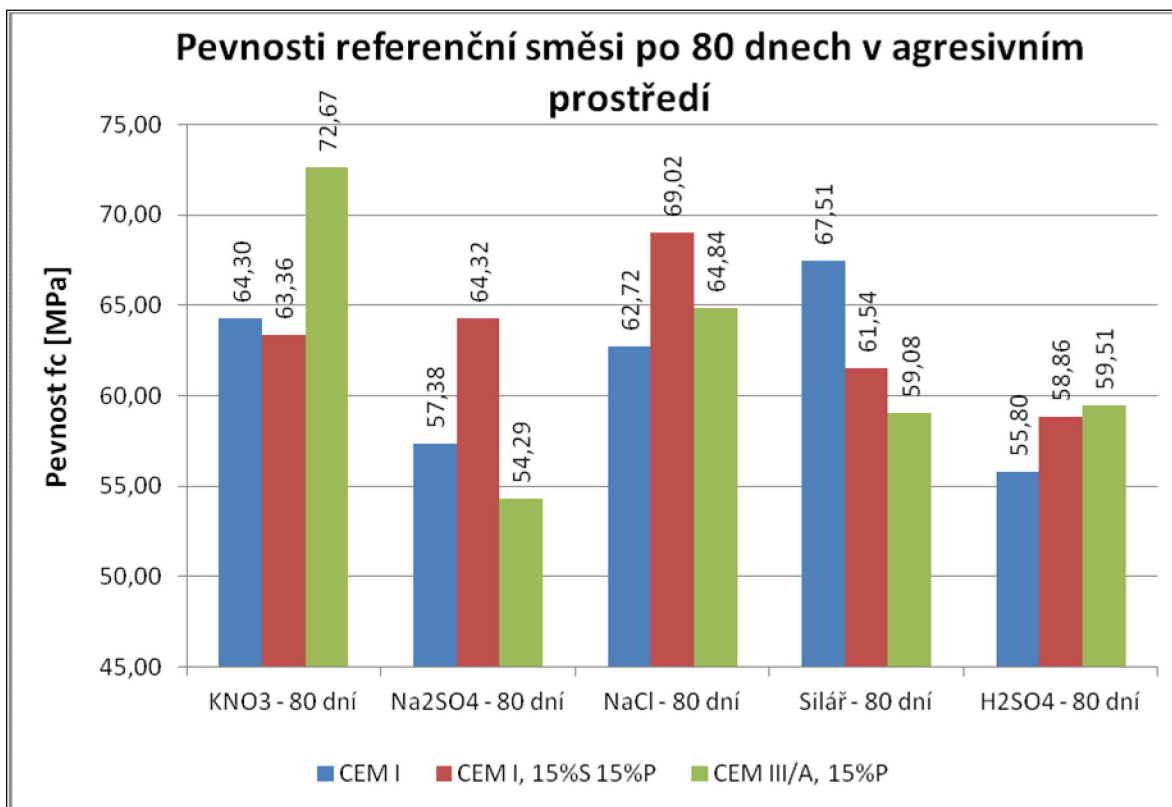
Graf 9 – Pevnosti směsi CHRYSO po 30 dnech v agresivním prostředí



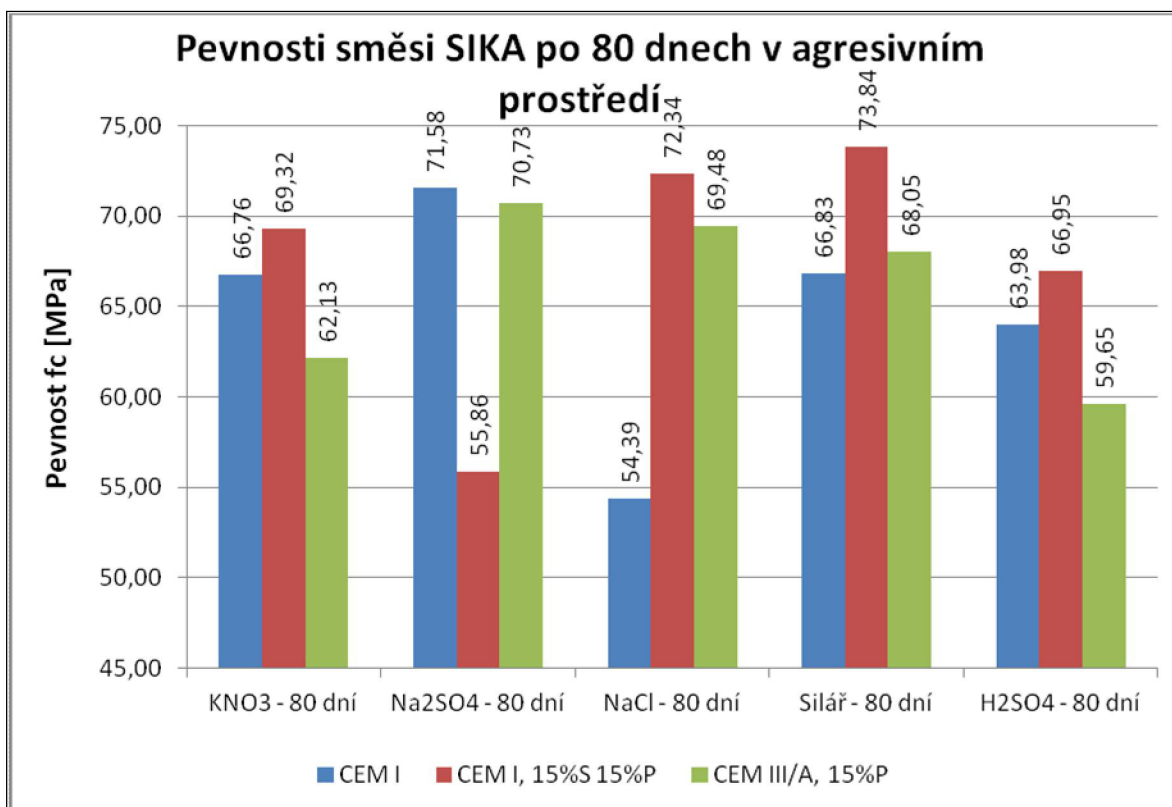
Graf 10 – Pevnosti směsi STACHEMA po 30 dnech v agresivním prostředí



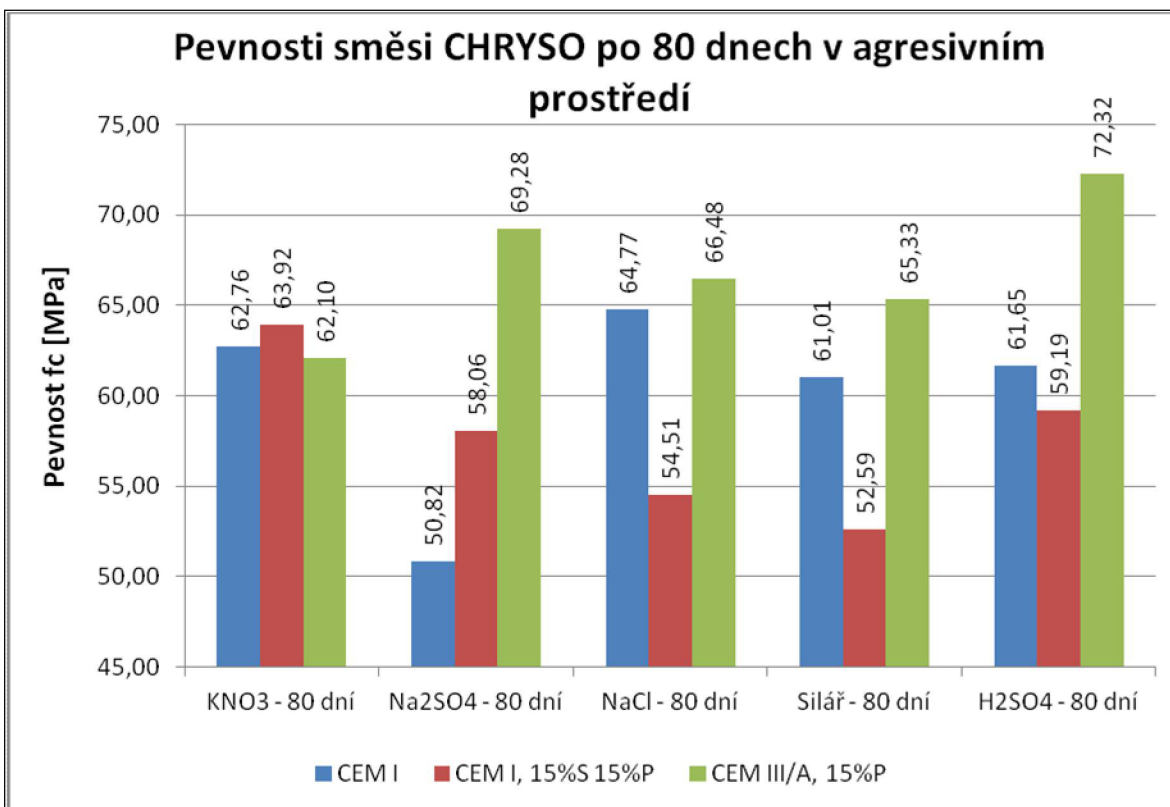
Graf 11 – Pevnosti všech směsí po 30 dnech v agresivním prostředí



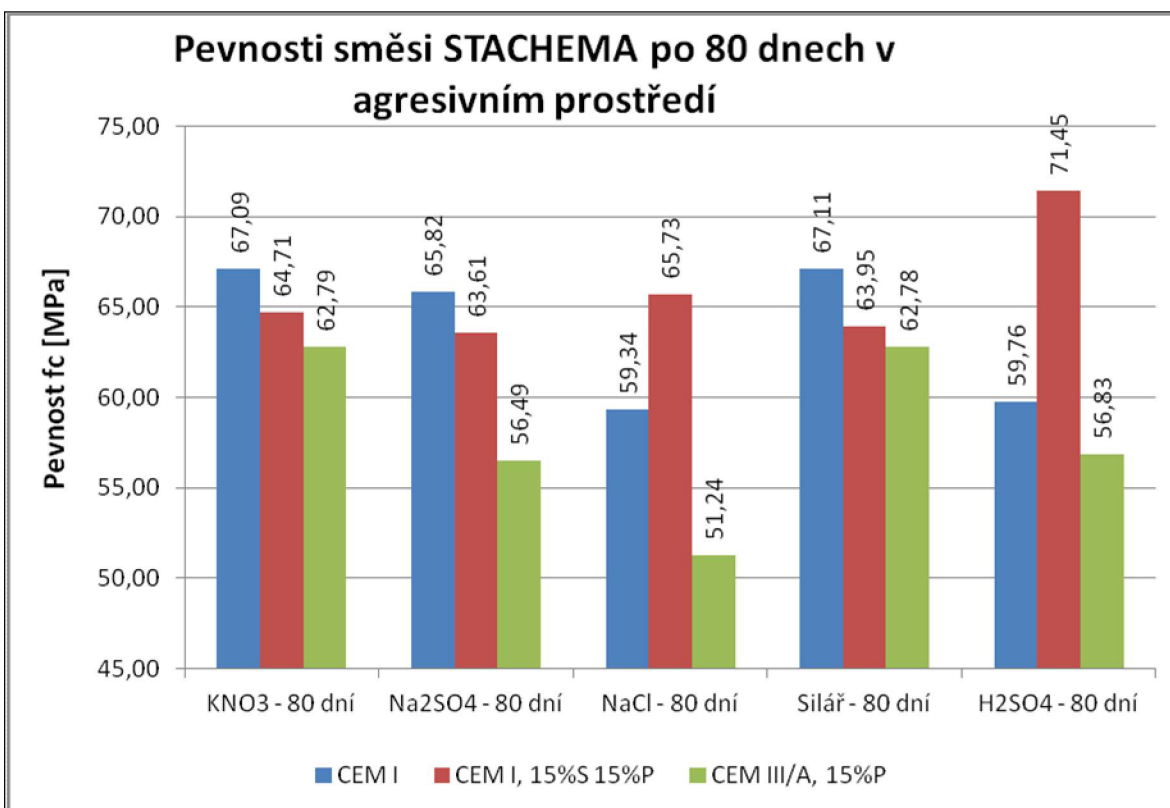
Graf 12 – Pevnosti referenční směsi po 80 dnech v agresivním prostředí



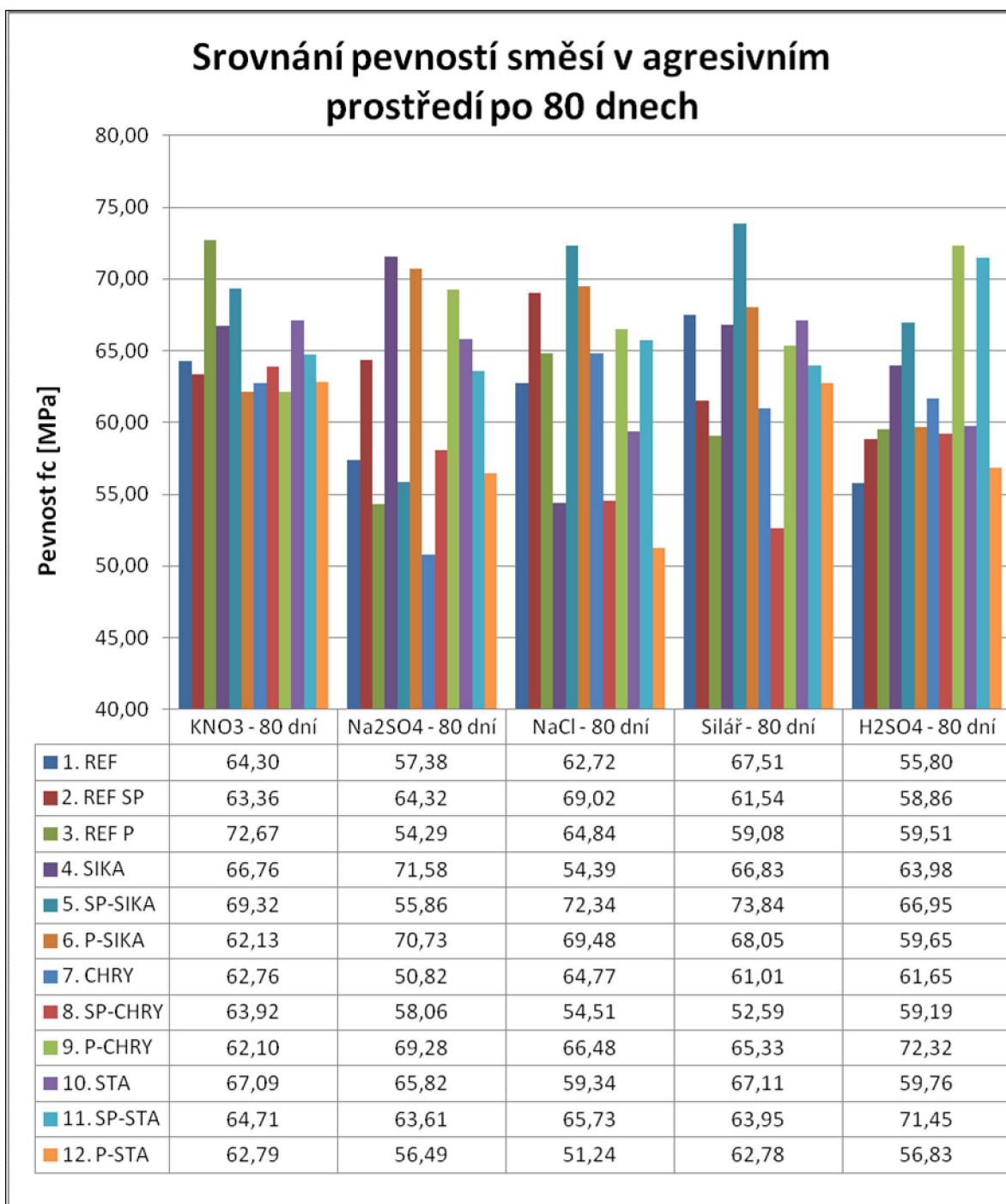
Graf 13 – Pevnosti směsi SIKA po 80 dnech v agresivním prostředí



Graf 14 – Pevnosti směsi CHRYSO po 80 dnech v agresivním prostředí



Graf 15 – Pevnosti směsi STACHEMA po 80 dnech v agresivním prostředí



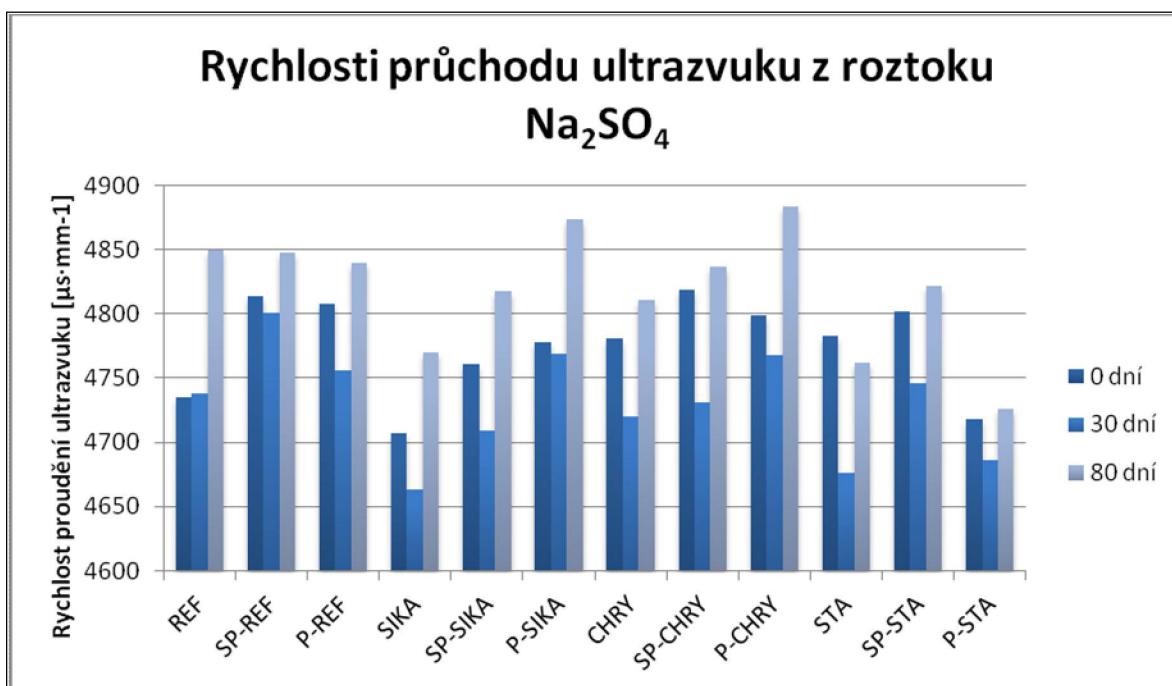
Graf 16 – Pevnosti všech směsí po 80 dnech v agresivním prostředí

5.6 Měření ultrazvukem

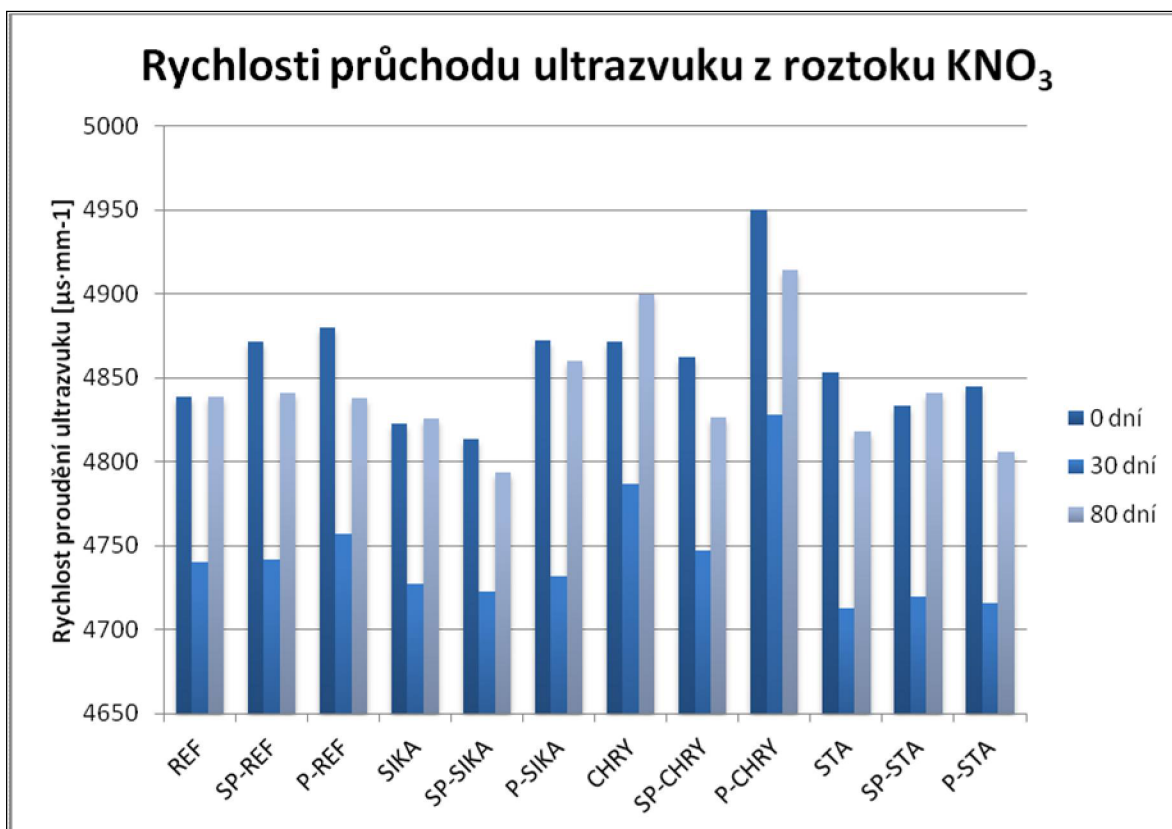
Před samotným uložením vzorků do lázni proběhlo tzv. nulté měření ultrazvukem, které nám dalo počáteční hodnoty průchodu ultrazvuku. Ty byly doplněny o hodnoty po 30 a 80 dnech, kdy byly vzorky umístěny v agresivním prostředí. Měření ultrazvukem probíhalo dle ČSN 73 1371 - Ultrazvuk. Pro měření byl použit bezobrazový ultrazvuk TICO.



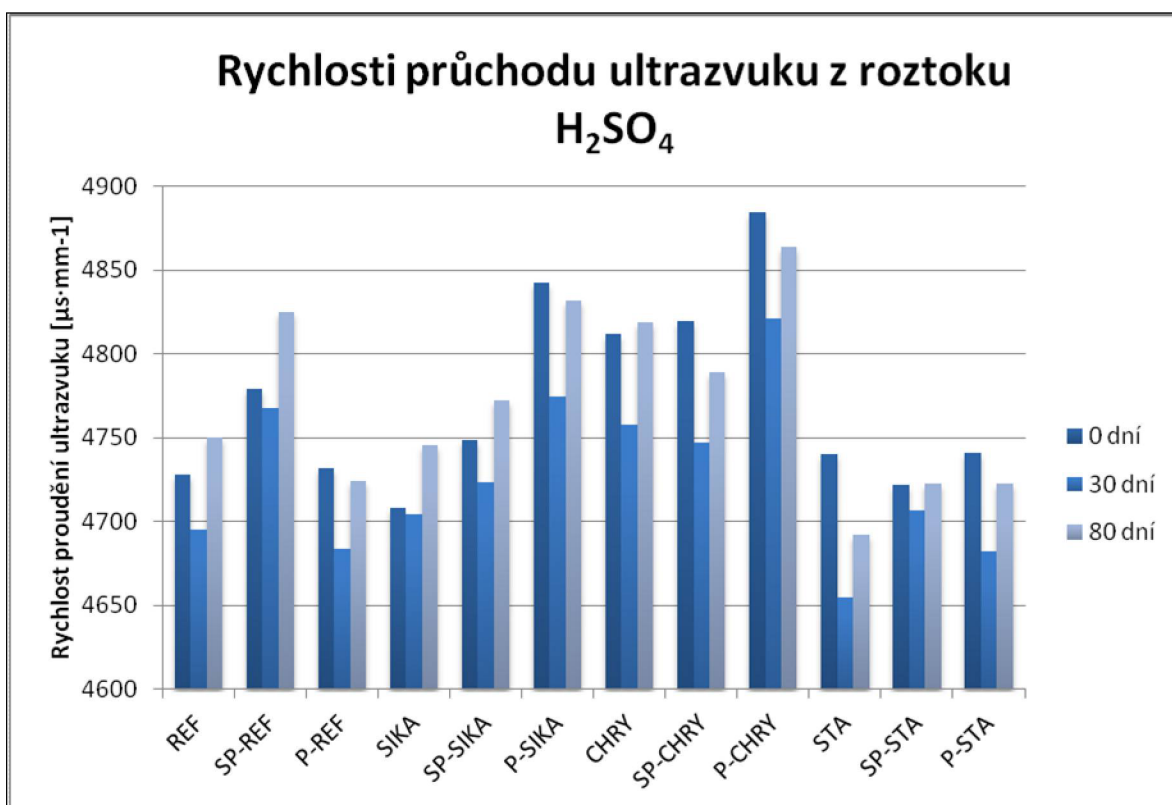
Obr. 12 Bezobrazový ultrazvuk TICO



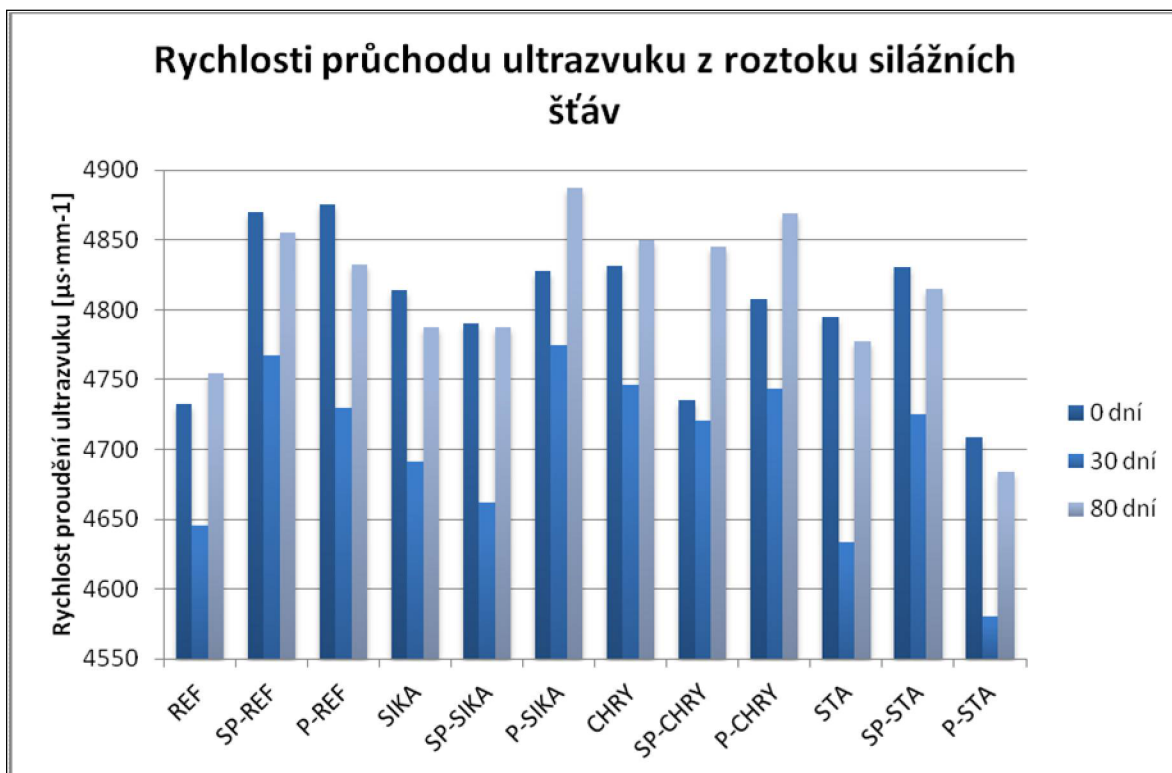
Graf 17 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku Na_2SO_4



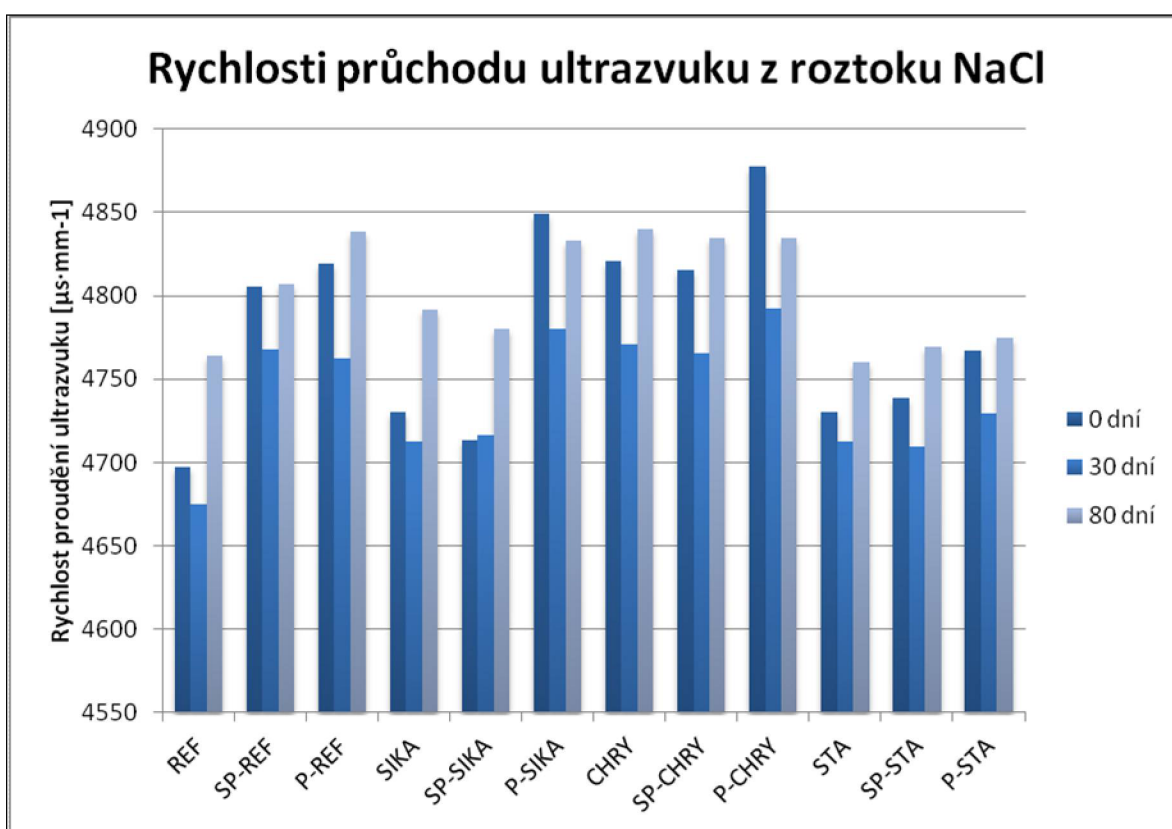
Graf 18 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku KNO_3



Graf 19 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku H_2SO_4



Graf 20 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku silážních šťáv



Graf 21 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku NaCl

ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce byl návrh receptur betonů, které budou vykazovat vysoké odolnosti ve vysoce agresivním prostředí v oblasti zemědělských staveb.

V teoretické části je popsána daná problematika agresivního prostředí a jeho vliv na beton. V této části jsou také popsány vlivy, které mají za následek degradaci betonu při jejich dlouhodobém působení. Dále jsou popsány mechanismy vlivu tohoto agresivního prostředí na vnitřní strukturu betonu.

V praktické části této práce byl řešen vliv použitého cementu a daných příměsí na chemickou odolnost betonu. V první receptuře byl využit pro pojivovou složku pouze portlandský cement CEM I 42,5 R. Druhá receptura obsahovala 30% substituci portlandského cementu příměsemi. 15 % cementu bylo nahrazeno vysokopeční struskou a 15 % bylo nahrazeno vysokoteplotním popílkem. Třetí receptura obsahovala vysokopeční cement CEM III/A 42,5 N. V této receptuře bylo nahrazeno 15 % pojiva vysokoteplotním popílkem. Tyto 3 receptury se staly jako referenční a každá receptura byla modifikována chemickými přísadami, Sika WT 200 P, Sika Control 45, ChrysoSerenis, ChrysoFuge a Stachema SL3. Modifikací vzniklo 12 zkušebních receptur, dle kterých byly následně vyrobeny zkušební vzorky, které byly zatíženy agresivním prostředím. Byl zkoumán vliv pěti agresivních prostředí, jež obsahovaly roztoky silážních šťáv, H_2SO_4 , KNO_3 , Na_2SO_4 a NaCl.

Všechny receptury byly navrženy pomocí rovnice absolutních objemů a byl zvolen vodní součinitel referenční receptury odpovídající sednutí Abramsova kužele S3 (100 – 150 mm). Ve všech recepturách bylo využito plastifikační přísady Stachement 2489.

Vyrobené zkušební vzorky byly po odformování uloženy do zracích kádí. Po 7 dnech hydratace byly stanoveny pevnosti v tlaku. Nejvyšší pevnosti po 7 dnech zrání vykazovala záměs č. 4 SIKA, kde hodnoty dosahovaly 46,3 MPa pevnosti v tlaku a nejmenších pevností dosáhla

směs č. 12 P-STA, u které byly naměřeny pevnosti v tlaku po 7 dnech pouze 29,4 MPa.

Následné zkoušky po 28 dnech zrání ukázaly nejvyšší pevnosti u směsi č. 10 STA, u které dosahovaly pevnosti v tlaku hodnot 56,5 MPa. Podobných výsledků dosahovala také směs č. 11 SP-STA, která vykazovala pevnosti v tlaku po 28 dnech zrání o hodnotě 56,1 MPa. Nejnižší hodnotu pevnosti v tlaku vykazoval směs č. 12 P-STA, která dosáhla hodnot pouze 41,2 MPa.

Po 60 dnech zrání ve vodním uložení byly hodnoty pevnosti v tlaku nejvyšší u směsi č. 11 SP-STA a to 68,2 MPa. Podobných vlastností opět vykazovala směs č. 5 SP-SIKA a to pevnosti v tlaku o hodnotě 65,5 MPa. Tyto vysoké hodnoty pevností v tlaku byly nejspíše ovlivněny přidavkem krystalizačních přísad, které vedly k zaplnění pórové struktury cementové matrice druhotnou krystalizací.

Následně probíhaly zkoušky pevností vzorků uložených ve vysoce agresivním prostředí. Do každého prostředí bylo uloženo 6 zkušebních vzorků z každé receptury. Na zkušebních vzorcích bylo provedeno nulté měření ultrazvukem před uložením do agresivního prostředí a následně byla tato měření provedena opět po 30 a 80 dnech uložení v těchto prostředích. Výsledky měření průchodů ultrazvukových signálů, jakožto zkoušení nedestruktivní metodou, nám daly přehled o dějích ve vzorcích v průběhu uložení v agresivním prostředí. Téměř na všech výsledcích průchodů ultrazvukových impulsů můžeme vidět, že při nultém měření, tj. při měření před uložením do agresivního prostředí, dosahovalo měření délky průchodu impulsu vysokých hodnot rychlostí, což značí dobrou kvalitu betonu. Při měření po 30 dnech uložení v agresivním prostředí došlo k výraznému poklesu rychlostí průchodu ultrazvukových impulsů, což může značit pokles pevností, či narušení struktury betonu. Po 60 dnech uložení v agresivním prostředí došlo opět k nárůstu rychlostí, což značí, že při dlouhodobém působení došlo opět ke zvýšení hutnosti vyrobeného betonu. Hutnost vzorku je přímo závislá na rychlosti průchodu ultrazvuku, jinými slovy, čím je vzorek hutnější,

tím rychleji se ultrazvuk přenesl. Můžeme tedy usoudit, že při nultém měření byl vzorek pevnější, než při prostředním měření a než se dostalo k poslednímu měření, jejich póry se zaplnili druhotnými krystaly společně s reakcí s agresivním prostředím (vznik ettringitu či jiných nerozpustných solí) čím přesně nemůžeme říci, protože agresivní prostředí se dalo považovat za "stojatou vodu" což znamená, že se kolem vzorků vytvořila nepropustná nasycená membrána rozpuštěných částí betonu, která zabraňovala další degradaci. Mezitím se do posledního měření spustily druhotné krystalizace vlivem přísad.

Nejvyšších dosažených hodnot pevností v tlaku v agresivním prostředí KNO_3 je 30 dnech u směsi č. 5 SP-SIKA, která dosahovala hodnot 66,1 MPa, po 80 dnech byla hodnota pevnosti v tlaku u směsi č.3 REF-P 72,7 MPa, podobných vlastností vykazovala směs č. 5 SP-SIKA s hodnotami pevnosti v tlaku 69,3 MPa.

V prostředí NaCl máme po 30 dnech nejvyšší pevnosti v tlaku u směsi č.5. SP-SIKA 75,4 MPa a po 80 dnech je s nejvyšší hodnotou pevnosti v tlaku směs č. 5 SP-SIKA s hodnotou 72,3 MPa.

Pro silážní prostředí po 30 dnech jsou nejvyšší hodnoty pevností v tlaku u směsí č. 5 SP-SIKA a 9 P-CHRY (73,0 MPa a 73,9 MPa), po dalších 50 dnech jsou pevnosti v tlaku nejvýraznější u směsi č. 5 SP-SIKA s hodnotou 73,8 MPa

V prostředí kyseliny sírové (H_2SO_4) byly po 30 dnech hodnoty vyrovnané, nejvyšších hodnot pevností v tlaku dosahovala směs č. 5 SP-SIKA, 70 MPa, po 80 dnech byly nejvyšší pevnosti v tlaku u směsi č. 9 P-CHRY a 11 SP-STA s hodnotami 72,3 MPa a 71,5 MPa.

Obecně lze říci, že nejvyšších hodnot betonu pro použití do agresivního prostředí dosahuje receptura č. 5 SP-SIKA, která obsahovala CEM I 42,5 R, která byla nahrazena z 15 % vysokopevní struskou a z 15 % vysokoteplotním popílkem. Tato receptura sice vykazovala pomalejší růst pevností v tlaku, než směsi pouze s cementem, projevují se však s delší dobou hydratace purolánové vlastnosti použitých substitučních

příměsí, které vedly ke zvýšení hutnosti a pevnosti vyrobených vzorků v čase. Na pozitivním výsledku se podílí také použitá přísada SIKAWT 200 P, která ve směsi funguje jako krystalizační přísada s druhotnou krystalizací a Sika Control 45 snižující nasákavost a smrštění betonu.

V této práci bylo dokázáno, že při substituci až 30 % portlandského cementu CEM I 42,5 R z 15 % vysokopeční struskou a z 15 % vysokoteplotním popílkem lze zachovat fyzikálně-mechanické vlastnosti a po delší době hydratace tyto vlastnosti dokonce zvýšit. Bylo dokázáno, že v kombinaci s krystalizačními přísadami dochází při delší době hydratace k postupnému zarůstání struktury vznikajícími minerály, což vede ke zvýšení hutnosti a pevnosti v tlaku v čase i v případě, že jsou tyto vzorky betonu vystaveny agresivnímu prostředí.

Pokud bych měl vzít ohled na výrobu jednotlivých dílců pro silážní žlaby nebo fermentory, téměř vždy se jedná o výrobu na sklad. Tudíž nelze říci, pro jaký účel je přesně bude klient používat a není ekonomicky možné dělat výrobky ze všech druhů směsí. Dané stavby z prefabrikátů se mohou používat opakovaně a pro jiné leč podobné účely. Proto nejjednodušší je použití směsi č. 5 SP-SIKA, která je velmi odolná vůči všem druhům zkoušených agresivních prostředí. Použití daných příměsí opravdu prodlouží životnost betonů v těchto agresivních prostředích. Po pár letech mohou být výsledky daleko uspokojivější díky druhotné krystalizaci a absolutnímu vyplnění pórů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] PREFA, BIOPLYNOVÉ STANICE A KOMPOSTÁRNY [online]. Dostupné z: <http://www.prefa.cz/pozemni-stavby/konstrukcni-systemy/biopllynovy-stance-a-kompostarny/>
- [2] HANIKA JIŘÍ. Vícefázové reaktory, 1. vydání [online]. VŠCHT v Praze, 1997. ISBN 80-7080-290-1. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-290-1/pages-img/.
- [3] LEDEREROVA J. a kol. Biokorozní vlivy na stavební díla. Silikátový svaz 2009 ISBN 978-80-86821-50-4
- [5] HELA, R., Technologie betonu, BJ15 TECHNOLOGIE BTONU I, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Brno 2007
- [6] Oleson J. P., Brandon C., Cramer S. M., Cucitore R., Gotti E., Hohlfelder R. L. The ROMACONS Project: a Contribution to the Historical and Engineering Analysis of Hydraulic Concrete in Roman Maritime Structures. The International Journal of Nautical Archaeology 33 (2): 199-229, 2004
- [7] Pytlík, P. Technologie betonu. VUTIUM, 2000.
- [8] Článek o betonu, MUJBETON, autor neznámý [online]. Dostupné z: <http://www.mujsbeton.cz/chemicke-prisady-do-betonu>
- [9] FRIDRANSKÝ P. ČVUT v Praze - Fakulta stavební [online]. Dostupné z: http://people.fsv.cvut.cz/www/prochja2/YTBK/Prednaska_5_2015.pdf
- [10] ČSN EN 206-1 Beton-Část 1: Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda (ČSN EN 206-1 Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity)
- [11] ROVNANÍKOVÁ P., Fakulta stavební VUT v Brně [online]. Dostupné z: http://uchp.icpf.cas.cz/ehlt/oscht/KS2011_Rovnanikova.pdf
- [12] PYTLÍK, P. Technologie betonu. 2. vydání. Brno: Nakladatelství VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1647-5

- [13] RMC Group. CONCRETE. www.concrete.org.uk, [online]. Dostupné z: <http://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=768>
- [14] Technický list Sika WT-200 P [online]
dostupný z: <https://cze.sika.com/dms/getdocument.get/a332c247-3123-340c-b93e-51dd3d1d8de4/Sika%20WT-200%20P.pdf>
- [15] Technický list Sika control-40 [online]
dostupný z: <https://cze.sika.com/dms/getdocument.get/55793eeb-fd4d-3bea-8ebe-bc079d457145/Sika%20Control-40.pdf>
- [16] Technický list CHRYSO Serenis [online]
dostupný z: <http://www.chryso.cz/p/7458/3/2570/cz>
- [17] Technický list CHRYSO Fuge [online]
dostupný z: <http://www.chryso.cz/p/7510/3/2662/cz>
- [18] Technický list STACHEMA SL3
- [19] ČSN EN 197-1 ed. 2 (722101) Cement - Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [20] PECHÁČEK J. článek Cement na beton. [online]
dostupný z: <https://www.stavebni-vzdelani.cz/cement-na-beton/>
- [21] HELA R., BROŽOVSKÝ J. TECHNICKÉ KVALITATIVNÍ PODMÍNKY STAVEB ŘVC ČR, Praha 2000, [online] dostupný z:
http://www.rvccr.cz/public/files/userfiles/Technicko%20kvalitativn%C3%AD%20podm%C3%ADnky/beton_konstrukce.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

XA	- třída betonu pro chemicky agresivní prostředí
C_3S	- trikalciumpilikát (alit)
C_2S	- dikalciumpilikát (belit)
C_3A	- trikalciumaluminát
$C_2(AF)$	- kalciumaluminátferit (brownmillerit)
CSH	- kalciumsilikát hydrát
XC	- třída betonu pro korozi vlivem karbonatace
XD	- třída betonu pro korozi vlivem chloridů
XF	- třída betonu vystaveným vlivu mrazu
V	- stupeň vodotěsnosti betonu
SiO_2	- oxid křemičitý
Al_2O_3	- oxid hlinitý
Fe_2O_3	- oxid železitý
CaO	- oxid vápenatý
$Ca(OH)_2$	- hydroxid vápenatý (portlandit)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1. Schéma složení betonu.....	11
Obr. 2 Křivka zrnitosti frakce 0-32 mm.....	14
Obr. 3 Mikrosilika.....	16
Obr. 4 Hnědouhelný popílek.....	17
Obr. 5 Metakaolin.....	18
Obr. 6 Výroba betonové podlahy v silážním žlabu.....	20
Obr. 7 Jímka v elektrárně narušena odpadní vodou.....	22
Obr. 8 Zaplnění pórů v mikrostruktuře vzorků krystaly ettringitu.....	26
Obr. 9 Průběh hydratace složek betonu při větším množství vody.....	30
Obr. 10 Uložení zkušebních krychlí do vody.....	36
Obr. 11 správná deformace krychle po pomačkání na lise	36
Obr. 12 Bezobrazový ultrazvuk TICO	47

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 - Druhy chemických látek způsobující korozi II. typu.....	23
Tabulka 2 - Rozdělení druhů agresivního prostředí.....	27
Tabulka 3 - Opatření proti působení agresivních síranových vod (SO ₄)....	27
Tabulka 4 - Opatření proti působení kyselých agresivních vod (pH).....	28
Tabulka 5 - Rozdělení pórů dle velikosti.....	29
Tabulka 6 - Tabulka receptur betonů.....	34

SEZNAM GRAFŮ

Graf 1 – Sednutí betonové směsi	35
Graf 2 – Pevnosti referenční směsi po 7, 28 a 60 dnech	37
Graf 3 – Pevnosti směsi SIKA po 7, 28 a 60 dnech	37
Graf 4 – Pevnosti směsi CHRYSO po 7, 28 a 60 dnech	38
Graf 5 – Pevnosti směsi STACHEMA po 7, 28 a 60 dnech	38
Graf 6 – Pevnosti všech směsí po 7, 28 a 60 dnech	39
Graf 7 – Pevnosti referenční směsi po 30 dnech v agresivním prostředí	40
Graf 8 – Pevnosti směsi SIKA po 30 dnech v agresivním prostředí	41
Graf 9 – Pevnosti směsi CHRYSO po 30 dnech v agresivním prostředí	41
Graf 10 – Pevnosti směsi STACHEMA po 30 dnech v agresivním prostředí	42
Graf 11 – Pevnosti všech směsí po 30 dnech v agresivním prostředí	43
Graf 12 – Pevnosti referenční směsi po 80 dnech v agresivním prostředí	44
Graf 13 – Pevnosti směsi SIKA po 80 dnech v agresivním prostředí	44
Graf 14 – Pevnosti směsi CHRYSO po 80 dnech v agresivním prostředí	45
Graf 15 – Pevnosti směsi STACHEMA po 80 dnech v agresivním prostředí	45
Graf 16 – Pevnosti všech směsí po 80 dnech v agresivním prostředí	46
Graf 17 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku Na_2SO_4	47
Graf 18 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku KNO_3	48
Graf 19 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku H_2SO_4	48
Graf 20 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku silážních šťáv	49
Graf 21 – Rychlosti průchodu ultrazvuku krychlemi z roztoku NaCl	49

SEZNAM PŘÍLOH

Technický list Sika WT-200 P

Technický list Sika control-40

Technický list CHRYSO Serenis

Technický list CHRYSO Fuge

Technický list STACHEMA SL3