

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

VYUŽITÍ SEKUNDÁRNÍ KRYSTALIZACE PRO ZVÝŠENÍ ODOLNOSTI CEMENTOVÝCH KOMPOZITŮ VŮČI AGRESIVNÍM PROSTŘEDÍM

UTILIZATION OF SECONDARY CRYSTALLIZATION TO INCREASE THE RESISTANCE OF CEMENT
COMPOSITES TO AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

VLADIMÍR JAMBOR

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. JIŘÍ BYDŽOVSKÝ, CSc.

BRNO 2016



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 Vladimír Jambor

Název Využití sekundární krystalizace pro zvýšení odolnosti cementových kompozitů vůči agresivním prostředím

Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.

Datum zadání bakalářské práce 30. 11. 2015

Datum odevzdání bakalářské práce 27. 5. 2016

V Brně dne 30. 11. 2015



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





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



Podklady a literatura

Pazderka, J., Burgetová, E., Krystalizační hydroizolace, Stavitel, ISSN 1210-4825, č. 6, s. 28-30, 2008.

Pazderka, J., Analýza spolehlivosti krystalizačních hydroizolací a jejich uplatnění v oblasti pozemních staveb, disertační práce, České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha, 2008.

Pazderka, J. Principy použití krystalizačních hydroizolací. [Online] <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyroby/betonove-vyroby/principy-pouziti-krystalizacnich-hydroizolaci-161.html>.

Nekap, CPM a Xypex. Firemní podklady: Nekap, s. r. o., CPM, spol. s. r. o., a Xypex Chemical Corporation.

Oikawa, R., Furuzumi, M., Fujiwara, C., Abe, M., Wakuishi, K., Chemical durability of cement crystal increasing agent applied concrete, technická zpráva, North-East District Committee of Civil Engineering Society of Japan, Japonsko, 1996.

Související poznatky z webu scopus.com.

Zásady pro vypracování (zadání, cíle práce, požadované výstupy)

V teoretické části práce bude provedena rešerše tuzemských i zahraničních odborných publikací týkajících se vlivu sekundární krystalizace na vlastnosti cementových kompozitů zejména z hlediska snížení jejich porozity. V rámci experimentální části práce budou zhotovena tělesa s obsahem a bez obsahu přísady pro sekundární krystalizaci a po jejich expozici v agresivních prostředích na nich budou provedeny zkoušky mechanických parametrů a rovněž studium mikrostruktury. Získané poznatky budou vyhodnoceny s určením vlivu sekundární krystalizace na míru degradace cementových kompozitů.

Struktura bakalářské/diplomové práce

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

.....
doc. Ing. Jiří Bydžovský, CSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt:

Tato bakalářská práce je zaměřena na studium vlivu sekundární krystalizace na mechanické vlastnosti cementových kompozitů. Cílem teoretické části této práce je rešerše odborných publikací o dané problematice, praktická část se zabývá ověřením vlivu sekundární krystalizace na míru degradace cementových kompozitů, vystavených agresivnímu prostředí a posouzení mikrostruktury těchto kompozitů prostřednictvím elektronové mikroskopie.

Klíčová slova:

Sekundární krystalizace, beton, cement, mikrostruktura, agresivní prostředí, sírany, dusičnany, amoniak

Abstract:

This thesis is focused on the study of impact secondary crystallization on the mechanical properties of cement composites. The aim of the theoretical part this work is research and a comparison of specialist publications on the issue, the practical part deals with the verification secondary crystallization influence on the degradation of cementitious composites exposed to aggressive environment and assessment of the microstructure of these composites through electron microscopy.

Keywords:

Secondary crystallization, concrete, cement, microstructure, aggressive environments, sulphates, nitrates, ammonium

Bibliografická citace VŠKP:

JAMBOR, Vladimír. *Využití sekundární krystalizace pro zvýšení odolnosti cementových kompozitů vůči agresivním prostředím*. Brno, 2016. 66 s., 0 s. příloh. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav technologie stavebních hmot a dílců. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jirí Bydžovský, CSc.

Prohlášení:

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

V Brně dne

.....

Vladimír Jambor
autor práce

Poděkování:

Rád bych upřímně poděkoval vedoucímu práce panu doc. Ing. Jiřímu Bydžovskému, CSc., za pomoc, rady, připomínky a podněty, dále pak paní Ing. Šárce Keprdové, za pomoc v laboratořích v centru AdMaS.

Samozřejmě obrovské a upřímné poděkování patří i mé rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu, kterou mně poskytovali během celého studia.

OBSAH:

I.	Úvod.....	10
II.	TEORETICKÁ ČÁST.....	11
2.1	Beton	11
2.1.1	Kamenivo	14
2.1.2	Cement.....	15
2.1.2.1	Výroba cementu:.....	16
2.1.3	Voda.....	17
2.1.4	Přísady a příměsi	18
2.2	Degradace betonu	19
2.2.1	Chemická koroze.....	19
2.2.1.1	Chemická koroze kapalným agresivním prostředím.....	21
2.2.1.2	Chemická koroze plynným agresivním prostředím.....	25
2.3	Způsoby izolace betonu	27
2.3.1	Asfaltové pásy	27
2.3.2	Izolační fólie	28
2.3.3	Povrchové nátěry	28
2.4	Krystalizační přísady.....	29
2.4.1	Akvatron 12	32
2.4.2	BASF Masterseal 501	33
2.4.3	Redrock Krystol Mix	33
2.4.4	Sika WT 200 P	34
2.4.5	Krystalizační přísady Xypex	35
2.5	Porovnání krystalizačních přísad	37
III.	PRAKTICKÁ ČÁST	40
3.1	Příprava zkušebních těles.....	40

3.1.1	Návrh receptury a počtů zkušebních těles.....	42
3.1.2	Použité suroviny	42
3.2	Zkoušení	43
3.2.1	Metodika a zkušební zařízení	43
3.2.1.1	ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1 Stanovení pevností.....	43
3.2.1.2	Elektronová mikroskopie	46
3.3	Výsledky zkoušek	47
3.3.1	28 denní pevnosti	47
3.3.2	90 denní pevnosti	48
3.3.3	180 denní pevnosti	53
3.3.4	Souhrn výsledků:.....	57
3.4	Mikrostruktura zkušebních těles	60
4	Závěr:.....	63
	Zdroje a související literatura:.....	64

I. Úvod

Každý stavební materiál podléhá působení degradačních vlivů. Konstrukce z cementových kompozitů, které jsou předmětem této práce, mohou být vystaveny rozličným druhům agresivních prostředí, jako je například typické pro zemědělské stavby (uskladnění hnojiv, působení produktů biologických pochodů zvířat apod.), dopravní stavby (působení chemických rozmrazovacích látek), běžná výstavba (kyselé deště, atmosferické vlivy). Před těmito vlivy je nutno tyto konstrukce chránit. To lze již při samotném návrhu betonové směsi jejím vhodným složením, použitím správných přísad, nebo dodatečným ošetřením konstrukce.

V teoretické části této práce byla provedena rešerše tuzemských i zahraničních odborných publikací týkajících se vlivu sekundární krystalizace na vlastnosti cementových kompozitů z hlediska utěsnění jejich pórové struktury, přičemž lze předpokládat, že utěsnění struktury velmi úzce souvisí se zvýšením odolnosti proti agresivním prostředím.

V rámci experimentální části práce byla zhotovena sada těles s obsahem krystalizační přísady, sada bez obsahu přísady pro sekundární krystalizaci a dále jedna sada ošetřená dodatečně nátěrem obsahujícím složky sekundární krystalizace. Po jejich expozici v agresivních prostředích na nich byly provedeny zkoušky mechanických vlastností a také byla studována jejich mikrostruktura.

Takto získaná data a poznatky byly vyhodnoceny s určením vlivu sekundární krystalizace na míru degradace cementových kompozitů jak z hlediska mechanických vlastností, tak i z hlediska změn mikrostruktury zkušebních těles.

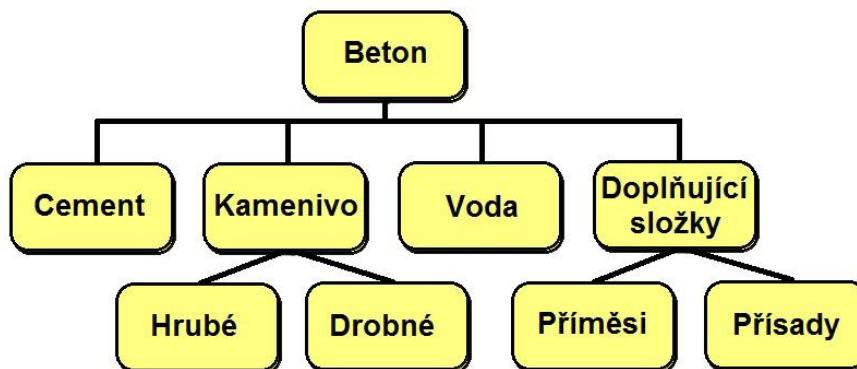
II. TEORETICKÁ ČÁST

2.1 Beton

Každý stavební materiál má přirozeně svůj historický vývoj. Historie betonu se datuje již kolem roku 3600 př. n. l. do doby starého Egypta. Zde jsou zaznamenané sloupy z tzv. umělého kamene. Dalším historickým užitím betonu v praxi je antický Pantheon s kopulí z lehkého betonu o průměru 49 m a se středovým otvorem o průměru 9 m. Na této stavbě bylo pravděpodobně vůbec poprvé využito litého betonu. Nejvýznamnějším obdobím rozvoje bylo ovšem 20. století, kdy se beton stal nejrozšířenějším stavebním materiálem. Představuje dvě třetiny ze všech používaných stavebních materiálů. Hlavní zásluhu na tom mají jeho technologické a ekonomické výhody. Beton je velmi trvanlivý materiál s dlouhou životností konstrukcí, ale může podléhat degradaci vlivem prostředí, ve kterém se nachází.

Beton je kompozitní stavební materiál, kde anorganické kamenivo plní funkci plniva. Pojivo je druhou fází kompozitu, sestávající z hydratované maltoviny (cementu) a pórů. [1]

Obr. 1: Schéma složení betonu



Základní rozdělení betonu:

Hovoříme o **prostém betonu**, který neobsahuje žádné vyztužení se statickou funkcí a využívá se u konstrukcí namáhaných pouze tlakem (základové pasy, patky). Dále o **železobetonu**, který je vyztužen ocelovými pruty. Vyztužení betonu významně ovlivňuje jeho výsledné mechanické vlastnosti, především zásadně zlepšuje pevnost v tahu a v tahu za ohybu. Dalším druhem je beton **předpjatý** s předepnutou výztuží. Ta zde může být předpjata ve výrobě, nebo dodatečně pomocí předpínacích lisů. Předpjatý beton se převážně používá v mostním stavitelství, u speciálních staveb v jaderné energetice apod. K vylepšení vlastností betonu, jako pevnost v tahu, či v tahu za ohybu, můžeme využít **vláknobetonu** s rozptýlenými ocelovými, skelnými či polymerními vlákny. Tato vlákna ztužují strukturu betonu. Nakonec uvedu **sít'obeton**, což je drobnozrnný beton vyztužený drátěnou sítí.

Objemová hmotnost betonu je jedna z jeho významných vlastností. Má vliv na hmotnost, případně i statiku konstrukce. Dle objemové hmotnosti lze beton rozdělit do tří skupin. **Lehký beton** má objemovou hmotnost $800 - 2000 \text{ kg.m}^{-3}$ a je tvořen zcela, nebo z části z pórovitého kameniva. **Obyčejný beton** s objemovou hmotností $2000 - 2600 \text{ kg.m}^{-3}$ a **těžký beton**, který má objemovou hmotnost více než 2600 kg.m^{-3} , kde je kamenivem například baryt, nebo olověné plnivo.

Dle uložení do konstrukce se beton dělí na **monolitický**, který se dopravuje na stavbu autodomíchávači, případně se vyrábí v bezprostřední blízkosti stavby. Čerpadly se ukládá do bednění, kde se následně hutní a ošetřuje. Druhou kategorií je **prefabrikovaný** beton, což jsou dílce vyráběné mimo staveniště, které se ošetří a odbední a na stavbu se dopravují hotové, připravené k uložení do konstrukce.

ČSN EN 206 dělí beton podle pevnosti v tlaku, kde například C 20/25 je beton s pevností v tlaku na válci o průměru 150 mm a výšce 300 mm 20 N/mm^2 a pevností v tlaku na krychli o hraně 150 mm 25 N/mm^2 , stanovené na vzorcích za 28 dnů normového zrání. Výše zmíněná norma určuje pevnostní třídy od C 8/10 do C 100/115 u běžných betonů, u lehkých pak od LC 8/9 do LC 80/88. Za vysokopevnostní se potom považují betony od C 50/60, případně LC 50/55.

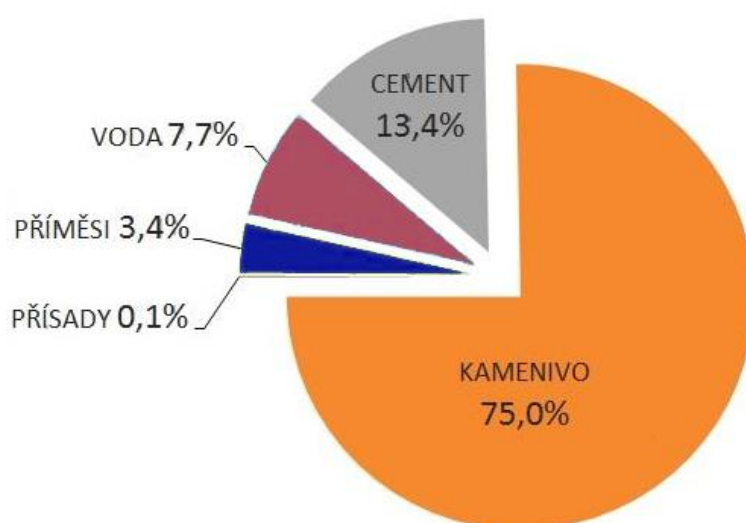
Tabulka 1: Pevnosti betonu v tlaku dle ČSN EN 206

Pevnostní třídy betonu v tlaku (obvyčejný a těžký beton)		
Pevnostní třída v tlaku	$f_{ck, cyl}$ (válec) MPa	$f_{ck, cube}$ (krychle) MPa
C -/5	-	5
C -/7,5	-	7,5
C 8/10	8	10
C 12/15	12	15
C 16/20	16	20
C 20/25	20	25
C 25/30	25	30
C 30/37	30	37
C 35/45	35	45
C 40/50	40	50
C 45/55	45	55
C 50/60	50	60
C 55/67	55	67
C 60/75	60	75
C 70/85	70	85
C 80/95	80	95
C 90/105	90	105
C 100/115	100	115

Pevnostní třídy betonu v tlaku (lehký beton)		
Třída pevnosti	$f_{ck, cyl}$ MPa	$f_{ck, cube}$ MPa
LC 8/9	8	9
LC 12/13	12	13
LC 16/18	16	18
LC 20/22	20	22
LC 25/28	25	28
LC 30/33	30	33
LC 35/38	35	38
LC 40/44	40	44
LC 45/50	45	50
LC 50/55	50	55
LC 60/66	60	66
LC 70/77	70	77
LC 80/88	80	88

Složky betonu

Obr. 2: Obvyklé zastoupení jednotlivých složek betonu



2.1.1 Kamenivo

Kamenivem do betonu se rozumí přírodní či umělá zrnitá látka určená pro stavební účely, nejčastěji s největším zrnem o velikosti 32 mm (maximálně 63 mm). Kamenivo zaujímá více než 75% objemu betonu a tvoří pevnou kostru s minimální mezerovitostí. Proto obsahuje různé frakce ve vhodném poměru. Pro výrobu betonu musí být kamenivo čisté, pevné a nesmí na sobě mít chemické povlaky, nebo zbytky jílu a jemných materiálů. Jinak by nebyla zabezpečena soudržnost s cementovým tmelem, což by se negativně projevilo na mechanických vlastnostech výsledného betonu. Dělí se dle mnoha parametrů, z nichž jedním z nejzásadnějších je například dle zrnitosti na jemné (do 0,25 mm), drobné (0 – 4 mm) a hrubé (4 – 63 mm).

Jemné kamenivo jsou nejčastěji jemné písky a filery, drobné pak šterky nebo písky s maximálním zrnem do velikosti 4 mm. Hrubé kamenivo má zrna o velikosti od 4 do 32 mm (max. 63 mm). Jsou to opět buďto šterky, nebo kamenivo drcené. Šterky se získávají těžbou z řek, jezer, nebo mořského dna, drcené zase drcením v kamenolomech z balvanů. Takto získané kamenivo se třídí dle frakcí. [5]

Další možnosti dělení jsou: dle původu (přírodní, umělé), způsobu vzniku (těžené, drcené), objemové hmotnosti (pórovité do 2000 kg.m⁻³, hutné 2000 – 3000 kg.m⁻³, těžké nad 3000 kg.m⁻³), frakce, apod.

Zrnitost, respektive křivka zrnitosti, je pro výslednou pevnost, spotřebu cementu a dobrou zpracovatelnost velmi důležitá. Proto je vhodné mít plynulou čáru zrnitosti, která má tvary:

Čára zrnitosti dle Fullera:

$$y = \left(\frac{d}{D_{max}}\right)^n \cdot 100 \quad [\%]$$

kde n je dle Fullera rovno 0,5

Čára zrnitosti EMPA I:

$$y = 50 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + \sqrt{\frac{d}{D_{max}}}\right) [\%]$$

Čára zrnitosti EMPA II:

$$y = 20 \cdot \left(\frac{d}{D_{max}} + 4 \cdot \sqrt{\frac{d}{D_{max}}} \right) \quad [\%]$$

2.1.2 Cement

Cement je hydraulické pojivo. Je to jemně mletá anorganická látka, která po smíchání s vodou vytváří kaši, která tuhne a tvrdne v důsledku hydratačních reakcí a procesů. Tuhne a tvrdne i pod vodou, čímž zachovává svoji pevnost a stálost. Cement dle ČSN EN 197-1 označovaný jako cement CEM, musí při daném dávkování a smíchání s kamenivem a vodou umožnit výrobu betonu nebo malty zachovávající po dostatečnou dobu vhodnou zpracovatelnost. Po předepsané době musí mít předepsanou pevnost a dlouhodobou objemovou stálost. Hydraulické tvrdnutí cementu CEM probíhá hlavně v důsledku hydratace vápenatých silikátů a dále aluminátů. Na hydrataci se v průběhu tvrdnutí mohou podílet i jiné chemické sloučeniny. Celkový obsah aktivního oxidu vápenatého a aktivního oxidu křemičitého musí být v cementu CEM nejméně 50 % hmotnosti, je-li obsah těchto oxidů stanoven dle EN 196-2. [7]

Dle ČSN EN 197-1 se cementy dělí podle směsnosti do 5 kategorií a to:

CEM I – Portlandský cement

CEM II – Portlandský směsný cement

CEM III – Vysokopeční cement

CEM IV – Pucolánový cement

CEM V – Směsný cement

Z těchto kategorií je nejpoužívanější cement portlandský. Ten je v podstatě tvořen portlandským slinkem a regulátorem tuhnutí (síranem vápenatým), který je zde obsažen asi z 5 %.

2.1.2.1 Výroba cementu:

Cement se vyrábí v cementárnách z přírodních surovin - vápence, břidlice a jílu. Z těchto surovin se připraví směs s vhodným poměrem oxidu vápenatého CaO , křemičitého SiO_2 , hlinitého Al_2O_3 , železitého Fe_2O_3 . Tato surovinová směs se pomele a následně suchým či mokrým způsobem homogenizuje a vypálí v cementářské peci při teplotě kolem 1450°C . Vyrobený slínek se pak mele, v závislosti na typu cementu, s příměsemi (vysokopevní struska, popílek,...).

Suchý způsob je v ČR jediný používaný. Vápenec a zemina se podrtí a melou, přičemž ztrácí část své vlhkosti a homogenizují se. Následně se tato směs předeheje a jde do krátké rotační pece, kde se vypaluje do slinutí. Po vychlazení se tento slínek mele spolu s regulátorem tuhnutí, případně s dalšími složkami. Těmi jsou například vysokopevní struska (latentně hydraulické vlastnosti), pucolány (tufy, opuky, porcelanit, aktivované hlíny a břidlice), popílek (křemičito-hlinitý má pucolánové vlastnosti, křemičito-vápenatý hydraulické vlastnosti), vápenec (nárůst počátečních pevností) a další.[10]

Portlandský slínek:

Je produktem pálení surovinové směsi. Po výpalu je ve formě tvrdých spečených granulí o velikosti od 1 do 6 cm. Chemické složení portlandského slínku se pohybuje v rozmezí: 61 – 68 % CaO , 20 – 24 % SiO_2 , 4 – 8 % Al_2O_3 , 2 – 4 % Fe_2O_3 , 0,1 – 0,3 % P_2O_5 , 0,5 – 6 % MgO , 0,2 – 1 % SO_3 , 0,8 – 1,5 % $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, 0,1 – 0,5 % TiO_2 . Celkový obsah aktivního CaO a SiO_2 musí však být vyšší než 50 %. Některé oxidy mají na vlastnosti cementu špatný vliv, a proto se musí regulovat jejich obsah. Například MgO nesmí být více než 5 %, jinak by docházelo k objemovým změnám při hydrataci. Alkálií nesmí být nad 2 %, jinak hrozí alkalické rozpínání betonu ve spojení s aktivním SiO_2 obsaženým v kamenivu. Protože chemické reakce při tvorbě slínkových minerálů jsou velmi složité, uvedu jen jejich základní přehled:

- Alit (trikalciumsilikát) - C_3S , průměrně 63 %, obvykle od 45 %, do 80 %
 - vzniká při více než 1350°C , vysoce reaktivní, podíl na počátečních pevnostech
- Belit (dikalciumsilikát) – C_2S , průměrně 20 %, obvykle od 5 %, do 32 %

- 4 různé modifikace dle rychlosti chlazení slinku po výpalu, pomalejší, ale déle trvající růst pevností

- Trikalciumaluminát – C_3A , průměrně 8 %, obvykle od 4 %, do 16 %
 - rychle tuhne a tvrdne, hodně hydratačního tepla, větší obsah nežádoucí (nižší odolnost proti síranům a větší smrštění)
- Brownmillerit (dikalciumaluminátferit) – $C_2(AF)$ nebo $C_4(AF)$, průměrně 7 %, obvykle od 3 %, do 12 %
 - malý vliv na pevnosti, ale přispívá k lepší odolnosti proti agresivnímu prostředí
- Volné CaO – průměrně 1 %, obvykle od 0,1 %, do 3 % (nad 3 %, objemová nestálost)
- Volné MgO (periklas), průměrně 1,5 %, obvykle od 0,5 %, do 4,5 %. Za určitých podmínek se rozpíná – hořčnaté rozpínání reakcí MgO s vodou, kdy vznikne brucit $Mg(OH)_2$. [1], [10]

2.1.3 Voda

Voda použitá do betonu se rozděluje na vodu záměsovou a ošetřovací. Záměsová se dávkuje přímo při míchání čerstvé betonové směsi a má dvě funkce. Spolupodílí se na hydrataci a ovlivňuje zpracovatelnost betonu. Minimální množství záměsové vody pro dostatečnou hydrataci cementu by mělo být mezi 25-35 % z celkové hmotnosti cementu. Při nedostatku vody nezhydratuje všechno použitý cement, což znamená nejen ztrátu pevnosti, ale i peněz. Naopak při přebytku vody získáme o něco lepší zpracovatelnost, ale při vysychání se vytvoří velké množství nežádoucích pórů a kapilár. To způsobí snížení pevnosti a mnohem horší odolnost vůči vlivům prostředí.

Ošetřovací voda slouží k udržení betonu ve vlhkém stavu po několik dnů po zatuhnutí betonu. Částečně nahrazuje vodu záměsovou, která se z betonu odpařila vlivem vysychání. V letním období ochlazuje povrch betonu a tím zabraňuje prudkému vyschnutí. To by způsobilo nejen praskliny, ale ani by nestihl zhydratovat všechno

cement. Minimální doba ošetřování by měla být 12 hodin, ale dle počasí to může být i několik dní, v extrémních případech týdnů.

Pro obě aplikace lze použít pitnou vodu bez nutnosti zkoušení. Při použití recyklované vody v betonárnách je nutno denně měřit její objemovou hmotnost, která nemá být vyšší než 1010 kg.m^{-3} .

2.1.4 Přísady a příměsi

V dnešní době se u betonu už neobejdeme bez látek upravujících jeho vlastnosti. A to ať už jde o jeho zpracovatelnost, objemovou hmotnost, výslednou pevnost, či jen barvu.

Proto se používají přísady, což jsou tekuté nebo práškové látky. Ty se přidávají během míchání v malém množství. Toto množství se vždy udává v poměru z dávky cementu (max. do 5 %). Jsou to především látky, které působí na cementovou suspenzi, tudíž jsou závislé na druhu cementu. Nejčastěji se používají přísady plastifikační, které výrazně zlepšují zpracovatelnost čerstvého betonu. Zároveň také usnadňují hutnění a snižují množství potřebné záměsové vody až o 5 %, čímž zvyšují výslednou pevnost betonu. K dispozici jsou i superplastifikační přísady, které mají podobný efekt jako výše zmíněné, ale co je důležité, snižují množství záměsové vody až o 12 %. Další často užívanou skupinou jsou přísady provzdušňovací, které tvoří v betonu póry snižující kapilární tlak a zvyšující trvanlivost, pak také přísady urychlující tuhnutí cementu, urychlující tvrdnutí cementu, zpomalující tuhnutí a hydrofobizační přísady. [1]

Příměsi jsou většinou práškového charakteru s velikostí částic do 0,125 mm a dělí se do dvou základních kategorií. Příměsi I. a II. druhu.

Příměsi I. druhu jsou téměř inertní částice (filery, pigmenty apod.) a příměsi II. druhu jsou pucolány (látky s vysokým obsahem aktivního SiO_2 , které potřebují „budič“ pro získání hydraulických vlastností), nebo latentně hydraulické látky např. vysokopecní struska, popílek, křemičité úlety apod. (látky schopné tvrdnout ve vodném prostředí reakcí s Ca(OH)_2).

2.2 Degradace betonu

Vlivem působení vnějšího prostředí na beton, dochází k jeho postupné a trvalé degradaci, vedoucí až k rozpadu betonu. Faktory můžeme rozdělit na fyzikální, biologické a chemické. Mezi fyzikální patří například porušení vlivem nárazů, tření, proudící vody, změny teplot (nad 150 °C se začínají rozkládat produkty hydratace cementu), vlhkosti a podobně. Biologickým faktorem může být působení kořenových systémů stromů a rostlin, mikroorganismy či chemické produkty životních pochodů živočichů.[13]

Z hlediska skupenství je možno rozdělit agresivní prostředí, se kterými přicházejí betonové konstrukce do styku, na prostředí kapalná, plynná a pevná. Přitom kapalná jsou dvojího původu. Přírodní vody (atmosferické, povrchové a podzemní) a odpadní vody (spláskové, průmyslové). Plynné prostředí není agresivní vůči hutnému vyvrálenému betonu, ale CO₂ z atmosféry může za určitých vlhkostních podmínek způsobovat karbonataci betonu. Udává se, že po 10 letech působení atmosféry, postoupí karbonatace asi do hloubky 30 mm pod povrch betonu. Pevným agresivním prostředím se rozumějí suché půdy, prachy nejrůznějšího původu, které se na konstrukci usazují postupně či periodicky. Působení těchto pevných látek je ale vždy podmíněno přítomností vody.[22]

2.2.1 Chemická koroze

Pro účely mé práce je nejpodstatnější degradace betonu způsobená chemickými činiteli – chemická koroze. Chemický faktor jsou například agresivní látky z ovzduší, roztoky kyselin, zásad a solí, nebo organické látky. Předpokladem pro chemickou reakci je přítomnost vody, ať už kapalná či plynná. Agresivní látky difundují do pórového systému betonu. Rychlost následné chemické reakce je ovlivněna teplotou (přičemž s rostoucí teplotou roste i rychlost reakce), koncentrací agresivních látek v okolí betonu, porositě cementového tmele a rychlosti výměny agresivního prostředí u povrchu betonu. Málo rozpustné produkty vytváří na povrchu betonu vrstvu, která brání vnikání dalších látek do betonu. Všechny procesy koroze betonu související se snížením obsahu Ca(OH)₂ v cementovém tmelu mají vliv na korozi ocelové výztuže betonu.[13]

Tabulka 2: Stupně vlivu prostředí pro beton

Označení stupně	Popis prostředí	Příklady výskytu stupně vlivu prostředí
Bez nebezpečí koroze nebo narušení		
X0	Velmi suché	Beton uvnitř budov s velmi nízkou vlhkostí vzduchu
Koroze vlivem karbonatace		
XC1	Suché nebo stále mokré	Beton uvnitř budov s nízkou vlhkostí vzduchu, beton trvale ponořený ve vodě
XC2	Mokré, občas suché	Povrch vystaven dlouhodobému působení vody, většina základů
XC3	Středně mokré, vlhké	Beton v budově se střední nebo velkou vlhkostí vzduchu, venkovní beton chráněný proti dešti
XC4	Střídavě mokré a suché	Povrch betonu ve styku s vodou, ne však ve stupni XC2
Koroze vlivem chloridů, ne však z mořské vody		
XD1	Středně mokré, vlhké	Povrch vystaven chloridům rozptýleným ve vzduchu
XD2	Mokré, občas suché	Plavecké bazény, betony vystavené působení průmyslových vod s chloridy
XD3	Střídavě mokré a suché	Mosty vystavené postřikům s chloridy, vozovky, parkoviště
Koroze způsobená chloridy z mořské vody		
XS1	Vystavené slanámu vzduchu, ale ne ve styku s mořskou vodou	Stavby na pobřeží, nebo v jeho blízkosti
XS2	Trvale ponořené ve vodě	Části staveb na moři
XS3	Smáčené a ostříkované přílivem	Části staveb na moři
Střídavé působení mrazu a rozmrazování		
XF1	Mírně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků	Svislé povrchy vystavené dešti a mrazu
XF2	Mírně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky	Svislé povrchy konstrukcí pozemních komunikací vystavené mrazu a rozmrazovacím prostředkům rozptýleným ve vzduchu
XF3	Značně nasycen vodou bez rozmrazovacích prostředků	Vodorovné povrchy vystavené dešti a mrazu
XF4	Značně nasycen vodou s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou vodou	Vozovky a mostovky vystavené rozmrazovacím prostředkům, povrchy vystavené ostříku rozmrazovacími prostředky a mrazu, omývaná část staveb na moři vystavená mrazu
Chemické napadení		
XA1	Slabě agresivní prostředí	Nádrže čistíren odpadních vod, jímky
XA2	Středně agresivní prostředí	Části staveb v půdách agresivních vůči betonu

XA3	Vysoce agresivní prostředí	Průmyslové čistírny odpadních vod s chemicky agresivními vodami, sklady chemických rozmrazovacích látek a umělých hnojiv
Koroze vlivem mechanického působení		
XM1	Mírně nebo středně namáhané obrusem	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly s pneumatikami
XM2	Silné namáhání obrusem	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly s pneumatikami nebo celogumovými koly vysokozdvihných vozíků
XM3	Velmi silné namáhání obrusem	Nosné vyztužené nebo nevyztužené průmyslové podlahy pojižděné vozidly s ocelovými nebo umělohmotnými koly vysokozdvihných vozíků, pásovými vozidly

2.2.1.1 Chemická koroze kapalným agresivním prostředím

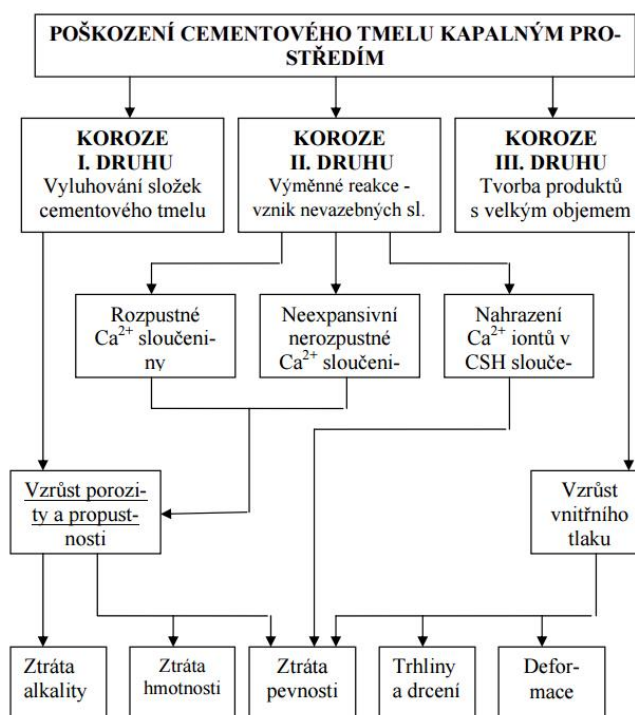
Atmosferická, tedy srážková, voda je značně ovlivněna stupněm znečištění ovzduší. Může se v ní vyskytovat SO₂, další oxidy síry a dusíku, amoniak z průmyslových exhalací. Je zřejmé, že takto znečištěny budou především srážkové vody v okolí velkých měst a průmyslových center, i když v dnešní době je snaha toto co nejvíce eliminovat.

Podzemní voda je nejvíce ovlivněna dvěma faktory. Prvním z nich je prostředí, čili hornina v její bezprostřední blízkosti. Od této horniny se voda mineralizuje a mění své chemické složení. Mezi takto rozpuštěnými látkami může také probíhat výměna iontů, čili další modifikace. Druhým faktorem je délka oběhu vody. Vody, které přichází do kontaktu s horninou na krátkou dobu, mají většinou agresivní nenasycený charakter. Ten se s hloubkou oběhu ztrácí a voda je pak méně agresivní. Výjimkou je tady voda silně proplyněná CO₂. [22]

U povrchové vody je složení poměrně proměnlivé. Může to být směs vod podzemních a atmosferických. Největší vliv na složení těchto vod má kontaminace vodami odpadními a také intenzivní zemědělství. [22]

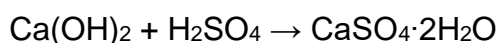
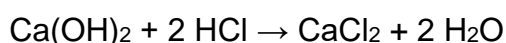
Podle povahy produktů reakcí při kontaktu betonu s kapalným agresivním prostředím se koroze zařazuje do tří skupin, viz obrázek níže.

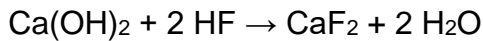
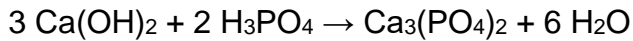
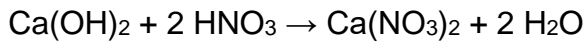
Obr. 3 Schéma poškození betonu kapalným agresivním prostředím [13]



Koroze I. druhu je typická vyluhováním a rozpuštěním hydroxidu vápenatého z cementového tmelu. Snižuje se hodnota pH pórového roztoku, stabilita hydratovaných minerálů a pasivita výztuže. Tuto korozi způsobují především vody s nízkou přechodovou tvrdostí, tedy vody s nízkým obsahem vápenatých a hořečnatých iontů (vody říční, rybníční, srážkové). Rozpustnost hydroxidu vápenatého je závislá také na přítomnosti jiných iontů v roztoku. Ionty jako Na^+ , K^+ , Cl^- jeho rozpustnost zvyšují, naopak ionty Ca^{2+} , OH^- rozpustnost snižují. Rychlost vyluhování závisí především na množství a velikosti kapilárních pórů cementového tmelu a hydrostatickém tlaku vody. U vodorovných konstrukcí (například mosty) při vyluhování $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a jeho následném karbonatování se vzduchem se mohou vytvořit malé krápníky CaCO_3 . [13]

Koroze II. druhu je charakterizována vznikem snadno rozpustných sloučenin. Takových, které nemají vazebné vlastnosti. Je způsobena reakcí $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a agresivním CO_2 , hydroxidy, kyselinami, hořečnatými a amonnými solemi (mimo sírany). Příklady takovýchto reakcí:



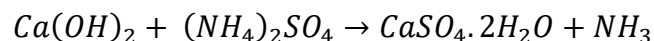


Také organické kyseliny neutralizují hydroxid vápenatý za tvorby vápenatých solí. Jde především o kyselinu octovou a máselnou. [13]

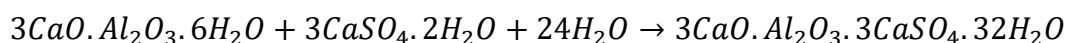
Principem **korozie III. druhu** je porušení betonu tvorbou objemných sloučenin. To je způsobováno především sírany, které reagují s hydroxidem vápenatým a tvoří málo rozpustný síran, čímž způsobují sádrovcovou korozi. Vznik sádrovce při tomto ději je doprovázen nárůstem objemu o 17 %. Při vhodné vlhkosti může dojít k rekrystalizaci za vzniku objemnějších krystalů a tlak v pórovém systému může dosáhnout až desítek N/mm². Tyto sírany se běžně vyskytují v podzemních vodách a v některých druzích odpadních vod. [13]

Praktický příklad agresivního prostředí:

V praxi je beton vystavován různým vlivům. V případě použití betonové konstrukce v průmyslové či zemědělské výrobě je vystavován koncentraci síranu amonného až 760 g/l při 25°C. Je-li vystaven přímému působení, může dojít k různým reakcím jako například alkalické reakci, korozi, rozkladu či rozpuštění hydrátů. Sírany reagují s C₃A v hydratovaném portlandském cementu. Tato reakce je rozpínavá a výsledné sloučeniny mají až dvojnásobný objem. Obecně jsou dvě možnosti, jak mohou působit síranové ionty. V první reakci vzniká sádrovec, v druhé ettringit jak je ukázáno v rovnicích níže. Ve většině případů je tvorba sádrovce spojována se ztrátou objemu a pevnosti, než s expanzí.



Sádrovec + amoniak



Etringit

Výrazné zhoršení vlastností v krátkém čase způsobují amonné sloučeniny. Poškození závisí na koncentraci, době trvání kontaktu, kvalitě betonu, ve smyslu porozity, propustnosti, obsahu a typu cementu.[9]

- **Chemická koroze vlivem síranů**

Koroze betonu zapříčiněná působením síranů patří k příkladům koroze III. druhu. Síranová koroze může být vyvolána buďto přírodními, nebo průmyslovými vodami s vyšším obsahem iontů SO_4^{2-} . Reakcí hydroxidu vápenatého a SO_4^{2-} dochází k tvorbě sádrovce.

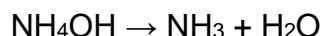
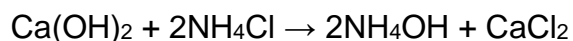
Vzniklý sádrovec dále reaguje s vysoce zásaditými vápenatými hydroalumináty, kdy vzniká ettringit ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$).

Špatně rozpustný ettringit při svém vzniku z C_3AH_6 podstatně zvětšuje svůj objem (jeho molární objem je 2,65 x větší) a vyvolává nežádoucí tlaky na stěny pórů a kapilár, což má za následek vznik trhlin a porušení struktury. Podstatný vliv na odolnost proti působení síranů má chemické a mineralogické složení cementu. Vyšší obsah C_2S v cementu snižuje koncentraci vznikajícího $\text{Ca}(\text{OH})_2$, tím zvyšuje odolnost proti síranové korozi. Naopak vyšší obsah C_3S má negativní vliv na odolnost proti síranům. Zásadní vliv na odolnost betonu má také C_3A obsažený v cementu.[14]

- **Chemická koroze vlivem amoniaku**

Tato koroze se projevuje především v agrochemických podnicích. Konkrétně tam, kde se manipuluje s průmyslovými hnojivy a kde se skladují. Takovýchto dusíkatých hnojiv je více. Například síran amonný, ledek amonný s vápencem či močovina. Jde o práškové či krystalické látky, které při manipulaci silně práší a tento prach se potom usazuje na konstrukcích. Následky této koroze jsou patrné již po 2 až 3 letech užívání objektu. Přítomnost amoniaku je také značná ve stájových objektech. Zde je také vysoká vlhkost, špatné větrání. V těchto prostorách hraje důležitou roli i počet a druh ustájených zvířat. [22]

Amonné soli mohou působit agresivně na beton při vyšší koncentraci NH_4^+ (více než cca 80 mg/l). Tento reaguje spolu s OH^- ionty z hydroxidu vápenatého a uvolňují plynný amoniak NH_3 . Tím se narušuje rovnováha a spotřebovává hydroxid vápenatý. [16]



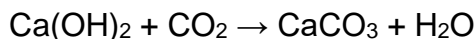
Tato reakce je příkladem koroze II. druhu.

2.2.1.2 Chemická koroze plyným agresivním prostředím

Agresivní plyny dělíme na kyselé, jako například CO_2 , SO_2 , NO_2 , HCl , H_2S , HF , a ostatní plyny, jako NH_3 , Cl_2 . Tyto plyny se dostávají do pórového systému betonu, stejně tak jako voda, která je pro reakci nezbytná. Tyto reakce hydroxidu vápenatého s uvedenými plyny jsou z chemického hlediska neutralizace. Nejvíce prozkoumaná je reakce s CO_2 , takzvaná karbonatace. [22]

- **Karbonatace**

Karbonatace betonu je chemický proces, způsobený reakcí oxidu uhličitého (jeho obsah v atmosféře je asi 0,03 %), v synergii s vodní párou, se složkami cementového tmelu v betonu. To vyvolá neutralizační reakci, při které vznikají karbonáty.



Tuto reakci lze rozdělit do čtyř etap. V první etapě dochází dokonce ke zlepšení vlastností betonu, díky zhutnění tmelu a vyplnění pórů nově vykrystalizovanou kalciovou modifikací CaCO_3 .

Ve druhé etapě dochází k napadání dalších hydratačních produktů cementu (C_xAH_y , C_xSH_y) po vyčerpání Ca(OH)_2 . Vznikají modifikace uhličitanu vápenatého s amorfními gely kyseliny křemičité, které tvoří velmi jemnozrnné krystalické novotvary CaCO_3 . Vlastnosti betonu se příliš nemění, jsou na úrovni původních hodnot.

Ve třetí etapě nastává rekrystalizace jemnozrnných útvarů uhličitanu vápenatého. Jejich objem se 10x zvětší a vzniknou zrna kalcitu a aragonitu. Nyní dochází ke zhoršení mechanických vlastností vlivem tlaku rozměrných krystalů na stěny pórového systému.

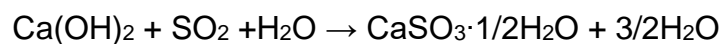
Čtvrtá etapa už je stav, kdy krystaly kalcitu a aragonitu prostoupily celou strukturou a beton ztrácí soudržnost a pevnost.

Obecně při karbonataci dochází ke snižování pH pórového roztoku až k hodnotě 8,3. Prostoupí-li karbonatace až k výztuži, dojde k narušení pasivační vrstvy na povrchu výztuže. Ta pak může za přítomnosti kyslíku a vlhkosti korodovat a v této fázi dojde brzy k odpadení krycí vrstvy a obnažení výztuže.[15]

- **Sulfatace**

Proces sulfatace probíhá na podobném principu jako karbonatace. Způsobuje ji oxid siřičitý, který také proniká do betonu a spolu s vlhkostí reaguje s hydratačními produkty za vzniku sádrovce a ettringitu. Její význam není tak velký jako u karbonatace, vzhledem k zanedbatelnému množství SO₂ v porovnání s CO₂ v ovzduší (koncentrace SO₂ v ovzduší se pohybuje kolem 50 µg.m⁻³). [14]

Reakce probíhající při sulfataci vypadá následovně, nejprve neutralizuje oxid siřičitý hydroxid vápenatý:



Dále se hemihydrát siřičitanu vápenatého oxiduje na sádrovec.

Obdobně jako u karbonatace i zde můžeme pozorovat čtyři etapy sulfatace. Nejdříve v první etapě dochází k reakci SO₂ s rozpuštěným Ca(OH)₂ v pórovém roztoku, kdy vzniká hemihydrát siřičitanu vápenatého (CaSO₃·1/2H₂O). Ten postupně vyplňuje póry a s ubývajícím hydroxidem vápenatým klesá pH. V druhé etapě se také začínají přeměňovat další hydratační produkty. K rekrystalizaci dochází v etapě třetí, kdy se primárně vzniklý hemihydrát siřičitanu vápenatého modifikuje do objemově větších krystalů sádrovce. Ty už póry zaplní zcela a zároveň je dosaženo nejvyšších pevností. Na konci třetí etapy ale pevnosti prudce klesají. Ve čtvrté etapě už tyto krystaly prostoupí celou strukturou cementového tmelu, nastává porušení a ztráta pevnosti.[14]

- **Synergie působení karbonatace a sulfatace**

Etapy karbonatace a sulfatace v reálném prostředí působí synergicky. Vzhledem k většímu obsahu CO₂ dochází nejprve ke karbonataci a poté co se CO₂ dostane hlouběji do struktury, začne od povrchu probíhat sulfatace. Ve struktuře karbonatovaného betonu dochází k rozkladu kalcitu, hlavního produktu karbonatace.

Po karbonataci probíhá siřičitanová koroze, která podstatně mění mechanické vlastnosti betonu. V povrchových vrstvách dochází k tvorbě sádrovce a tento proces postupně pokračuje do středu betonu. Přímé spolupůsobení směsi plynů způsobí rychlejší degradaci materiálu. Rozhodující vliv zde má koncentrace těchto plynů v ovzduší.[15]

2.3 Způsoby izolace betonu

K hydroizolaci betonu se využívá celá řada materiálů. Jsou to například různé druhy asfaltových pásů, plastových fólií, různé hydroizolační nátěry a stěrky na nejrůznější bázi. Úkolem těchto materiálů je zamezit vstupu vody s agresivní látkou do konstrukce a tím zvýšit její trvanlivost. Praktickým příkladem těchto agresivních látek je třeba roztok posypové soli s vodou, který může vnikat do konstrukce, narušit její povrchové vrstvy a způsobit korozi výztuže. Plynné agresivní prostředí tvoří třeba CO_2 , které s vodou způsobuje karbonataci betonu. [4]

Právě proto je tedy nutné vhodným způsobem betonové konstrukce ochránit před těmito vlivy, aby nedošlo k poškození povrchové vrstvy betonu, jejímu odpadení a v krajním případě obnažení výztuže a její korozi. To by mohlo mít pochopitelně pro konstrukci fatální následky.

V současné době ještě stále převažují klasické hydroizolace a to asfaltové pásy, izolační fólie či vodostavební betony. Záleží na konkrétním projektu jaký druh je pro dané účely nejvhodnější ať už z hlediska mechanických vlastností, nebo z hlediska ekonomické náročnosti.

2.3.1 Asfaltové pásy

Již přes 100 let se u nás využívají ve stavebnictví asfaltové pásy, coby izolace proti zemní a dešťové vlhkosti. Základními druhy jsou lehké asfaltové pásy, oxidované asfaltové pásy, modifikované asfaltové pásy a speciální modifikované asfaltové pásy. Na spodní stavby se nevyžívají jenom jako hydroizolace, ale i jako ochrana proti radonu, například pás Bitagit 40 AL+V60 MINERAL RADON. Je to pás s hliníkovou nosnou vložkou v kombinaci se skelnou rohoží. Používá se jako parotěsná zábrana,

hydroizolační vrstva ve skladbách střešních plášťů a radonová + hydroizolační ochrana spodní stavby. Vyrábí se v síle 4 mm a role má rozměry 1 x 7,5 m. [6]

Využití těchto pásů, coby hydroizolace, je tradiční, ale nese s sebou několik nevýhod, jako například:

- Možnost mechanického porušení (proražení)
- Riziko netěsnosti v místě spoje
- Nutnost suchého podkladu
- Nutnost další ochrany při zásypu zeminou (přízdívka, nopova fólie, polystyrenové desky)
- Podklad by měl být vyrovnaný

2.3.2 Izolační fólie

Hydroizolační fólie jsou podobné svými vlastnostmi asfaltovým pásům. Co se týká výhod a nevýhod jsou na tom téměř shodně. Fólie jsou obvykle vyrobeny na bázi měkčeného PVC-P například do podlah, ve své vícevrstvé variantě i pro izolace spodních staveb, a pro náročnější aplikace jsou i vícevrstvé vyztužené fólie. Tyto fólie mohou být vyztuženy skelnou tkaninou na bázi flexibilních polyolefinů FPO, jako například výrobek *Sikaplan WT 1200-20C*, od výrobce *Sika*. Tato fólie se dodává v tloušťce 2 mm a role má rozměry 2 x 15 m.

2.3.3 Povrchové nátěry

Betonové konstrukce lze chránit, obdobně jako ty ocelové, nátěrem proti korozi. U betonu konkrétně proti karbonataci a dalším degradujícím vlivům. Nátěr vytvoří bariéru agresivním činitelům. Proto musí mít tento nátěr dostatečnou tloušťku a pružnost. To, aby dokázal přemostit i mírné trhlinky, které v betonu časem vzniknou. Nátěry mají pochopitelně také svoji mikrostrukturu a hodně záleží, jaký tvar mají jejich částice. Kulaté částice jsou více propustné, než destičkovité.

Jako příklad bych zde uvedl asfaltovou izolační stěrku *HYDRO BLOK B400* od výrobce *Den Braven*. Jedná se o asfaltovo-bentonitovou hydroizolační hmotu. Je vodou ředitelná a obsahuje syntetická armovací vlákna. Ta tvoří pružnou zpevňující

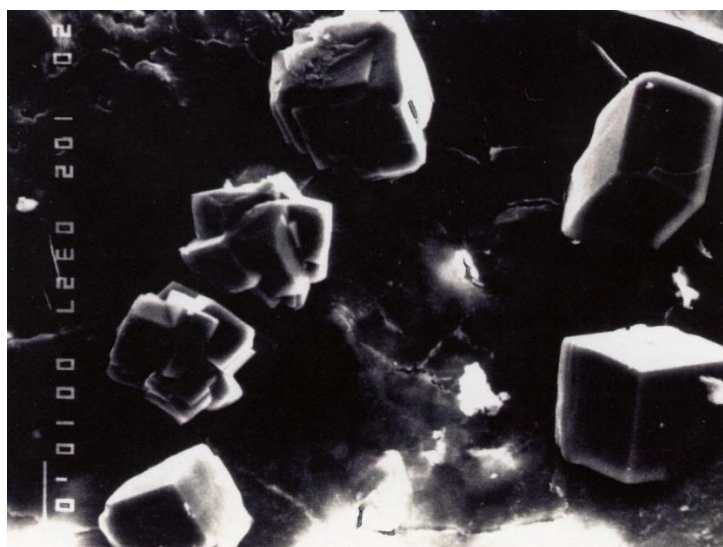
kostru. Po vyschnutí vznikne kompozitní povlak, který je schopen nahradit běžné asfaltové hydroizolační pásy.[11]

2.4 Krystalizační přísady

Prvopočátek používání krystalizačních hydroizolací ve světě byl v 70. letech 20. století. U nás se pak objevují až po roce 1989. Jsou to práškové směsi složené převážně z jemně mletého portlandského cementu, jemného křemičitého písku a speciálních přísad, jejichž složení a poměr je know how každého výrobce. [2]

Základem krystalizačních hydroizolací je chemická reakce, která vyvolává v pórovém systému krystalizační proces (v některých zdrojích též zvaný katalytická reakce). Při tomto procesu jsou zaplněny všechny kapilárně aktivní póry novými těsnícími krystaly. Výhodou je, že i při aplikaci na povrchu nátěrem, aktivní látky prostupují do hmoty betonu a nové krystaly „prorůstají“ do hloubky, čímž se beton stane pro vodu nepropustným. Při samotné tvorbě těsnících krystalů je ovšem nezbytně nutné, aby v pórech byla přítomna kapalná voda. Jedině tak bude zajištěno, že krystalizace proběhne v dostatečné míře. V opačném případě nebude krystalizační přísada plně využita. Proto je u všech typů aplikace nutné správné ošetřování a dostatek vody v pórovém systému pro správný růst krystalů. [3]

Obr. 4: Neošetřený beton 50mm pod povrchem - kubické a rhombické tvary hydroxidu vápenatého



Obr. 5: Ošetřený beton 50mm pod povrchem - začátek růstu krystalů z hydroxidu vápenatého do C-S-H gelu



Obr. 6: Ošetřený beton 50mm pod povrchem - tři týdny po aplikaci Xypex concentrate



Výhody krystalizačních hydroizolací:

- Nepotřebuje k aplikaci suché prostředí, naopak potřebuje vodu
- Nevyžaduje povrchovou úpravu, vyrovnání a podobně
- Nedá se prorazit, roztrhnout, či jinak porušit
- Zacelí praskliny až do 0,4 mm
- Netřeba ochrany proti poškození při zásypech zeminou apod.
- Časově i finančně méně náročná aplikace
- Možnost aplikace z pozitivní i negativní strany tlaku vody
- Zabrání průniku agresivních látek do struktury betonu
- Lze aplikovat ihned po dokončení betonáže

Způsoby aplikace:

- **Nátěr či nástřik**

Nejrozšířenější postup, který je také nejvhodnější pro sanační práce starších betonových konstrukcí, zatížených vlhkostí. Toto je také možné aplikovat na zděné konstrukce opatřené cementovou omítkou. Stáří konstrukce není podstatné, jen je nutné prověřit její technický stav. To znamená, aby měla spojitý povrch a dostatečnou soudržnost a pevnost. Po vyhodnocení těchto podmínek lze přistoupit k aplikaci krystalizační vrstvy. Je prokázáno, že i při vystavení ošetřované konstrukce tlakové vodě plně postačuje jedna vrstva nátěru/nástřiku, je-li kvalitně proveden.

- **Přidání do čerstvé betonové směsi**

Tento způsob použití je z podstaty věci použitelný pouze u nových konstrukcí, kdy se přísada zapracuje přímo v míchačce do betonové směsi.

- **Jednosložkové ucpávky**

Další z možností použití těchto krystalizačních hydroizolací. Zabraňuje lokálním průsakům vody trhlinami v betonové konstrukci během jedné až dvou minut. Vždy se používá v kombinaci s krystalizačním nátěrem.

- **Injektáže do zdiva**

Tato metoda funguje tak, že se zdivo navrtá ve stanovených roztečích, otvory se naplní řídkým cementovým mlékem a po jeho vytvrdnutí se do otvorů aplikuje směs krystalizačního materiálu a vody.

- **Vsyp na čerstvý povrch betonu**

Tato metoda použití je možná pouze u vodorovných konstrukcí a v podstatě nahrazuje izolační nátěr.

Vybrané přísady:

2.4.1 Akvatron 12

Modifikovaná směs anorganického původu. Používá se jako přísada do čerstvé betonové směsi, kde zlepšuje vlastnosti betonu. Především odolnost proti vodě a agresivním látkám. Přidává se do čerstvé betonové směsi v množství 0,4 – 1 % z hmotnosti cementu. Dle výrobce se má rozmíchat s minimálním množstvím vody na pastu a následně zapracovat do betonové směsi. Výrobce dále stanovuje, že po dobu 21 dnů se má povrch betonu udržovat vlhký. To proto, aby proběhly všechny krystalizační procesy. Na 1 kg směsi Akvatron 12 výrobce udává přidat 250 ml vody. [31]

Obrázek 7: Akvatron 12 [23]



2.4.2 BASF Masterseal 501

Obrázek 8: BASF Masterseal 501 [24]

Izolační systém pro zvýšení vodonepropustnosti betonů a malt, který je schválen pro kontakt s pitnou vodou. Přidává se do čerstvé betonové směsi v množství 1,5 – 2 %. Lze jej použít k izolaci zdiva, spodních staveb, opěrných zdí, vodních nádrží, vodojemů, bazénů či přehrad. Tato přísada zamezuje vnikání, prosakování či vyvěrání vody z, nebo do betonové konstrukce. Tím zvyšuje její životnost. Prášková směs se smíchá s vodou dle pokynů výrobce.



Vytvořenou pastou se můžou stávající konstrukce ošetřit nátěrem, nebo nástřikem, případně vsypem na vodorovné konstrukce. Jako přísada se může do betonové směsi zapracovat ihned v betonárně, nebo přímo na staveništi v domíchávači. Takto ošetřený beton je nutno chránit před přímým slunečním zářením a uchovat 5 – 7 dní ve vlhkém stavu. Stavby určené k zadržování vody výrobce doporučuje naplnit vodou do 24 hodin od nanesení poslední vrstvy systému Masterseal. Proces krystalizace je zde ukončen asi po 3 týdnech. [32]

2.4.3 Redrock Krystol Mix

Obrázek 9: Redrock Krystol Mix [25]

Další krystalizační přísadou je Krystol Mix. Výrobce ji prezentuje jako těsnící přísadu do betonů z portlandských cementů. Tato přísada je určena pro základy, zdi, podlahy, terasy, střechy, tunely. Dale pak pro výtahové šachty, podzemní parkoviště, vodárenské nádrže. Výrobce v technickém listu prezentuje opět výhody krystalizačních přísad, jako nepropustnost pro vodu a další kapaliny (oleje, nafta, benzin), odolnost proti agresivním vodám a podobně. Výrobce dále udává objemovou hmotnost své směsi 1480 kg/m³, velikost částic 45 – 150 μm a



pH po smíchání s vodou 13. Výrobce dále udává, že Krystol Mix zlepšuje zpracovatelnost a tím snižuje potřebu vody při stejné zpracovatelnosti o 5 – 10 %. Dávkuje se do čerstvé betonové směsi v množství 1,5 – 2 % z hmotnosti cementu (včetně strusky u struskoportlandských cementů). Dávkování je předepsané buďto do míchačky, nebo do autodomíchače. Nutno je směs aspoň 10 minut míchat. Čas za jak dlouho se má beton uložit není stanoven, nicméně výrobce udává, že za 45 minut se snižuje plastifikační schopnost přísady Krystol Mix. [33]

2.4.4 Sika WT 200 P

Obrázek 10: Sika WT 200 P [26]

Kombinovaná těsnící a krystalizační přísada do betonu, schopná překlenovat trhlinky, snižující propustnost betonu. Je navržena pro výrobu vysoce kvalitních vodonepropustných betonů. Výrobce doporučované použití je následující: základové konstrukce, parkovací domy, tunely, plavecké bazény, nádrže na vodu, přehrady, čistírny odpadních vod a podobně. Výrobce prezentuje tuto směs jako směs cementu, funkčních aditiv (aminoalkoholů) a plniva. Zajišťuje hydrofobizaci betonu a vyplnění pórů a kapilár nerozpustnými krystaly. Udávaná objemová hmotnost je 750 kg/m^3 . Postup dávkování výrobce uvádí dvojí a to buď přidáním do záměsové vody formou velmi řídké suspenze a následné vmíchání do směsi, nebo přidáním do kameniva a minimálně 120 sekund míchat před přidáním cementu a vody. Tato přísada je nezávislá na druhu cementu, jen je požadováno, aby maximální podíl příměsí byl 40 % z celkového množství pojiva. Obsah cementu má být minimálně 350 kg/m^3 , vodní součinitel do 0,45, což už samo o sobě by mělo zajistit velmi dobrou vodotěsnost. Dávkování příměsí Sika WT-200 P je stanoveno od 1 do 2 %. [34]



2.4.5 Krystalizační přísady Xypex

Xypex Chemical Corporation je kanadská firma vyrábějící přísady do betonu již od roku 1970, jenž zajišťuje nepropustnost betonových konstrukcí nejen pro vodu, ale i pro všechny kapaliny. To má samozřejmě velmi příznivý vliv na trvanlivost konstrukce a stabilitu její fyzikálních vlastností. Materiály Xypex jsou práškové kompozity složené z portlandského cementu, velmi jemně mletého křemičitého písku a dalších aktivních chemikálií, které jsou výrobním tajemstvím výrobce. Princip účinku tohoto výrobku je, že při smíchání s vodou a nanesení na povrch betonové konstrukce, proniká do pórového systému betonu, kde vytváří vláknité krystaly a ty tento systém uzavřou. Takto nanesená vrstva sama o sobě těsnící funkci nemá, je pouze „nositel“ aktivních látek, které krystalizaci uvnitř pórů zajistí. Přísady Xypex jsou vhodné jak pro nové, tak i pro stávající stavby ve formě povrchového povlaku. Xypex concentrate je první vrstvou a xypex modified je navržen jako druhá vrstva k posílení koncentratu, nebo výhradně pro odolnost proti vlhkosti. Velmi pozitivní vliv má Xypex i na ochranu výztuže armovaných konstrukcí v agresivním prostředí. Tím není myšleno, že by sám o sobě zvyšoval chemickou odolnost cementového kamene, ale když jakýkoli roztok začne pronikat do pórů betonu a dostane se do styku s Xypexem, tak ten začne spotřebovávat jeho vodu na tvorbu dalších krystalů a tím pádem utěsnění póru. Na povrchu betonu tak může být například vrstva chloridů, ale výztuž bude netknutá.

- **Xypex Admix**

Obrázek 11: Xypex Admix [27]

Tato přísada reaguje s vlhkostí a vedlejšími produkty hydratace cementu (hydroxidem vápenatým, sírany vápníku, draslíku, sodíku i nehydratovanými cementovými částmi). Tvoří nerozpustné, ale stále přírodní krystalové struktury. Zvyšuje kvalitu betonu jako takového. Zabraňuje průniku vody a všech kapalin, dokonce pod vysokým tlakem. Neblokuje pouze póry a povrch, ale je součástí betonové hmoty, jako takové.

Xypex Admix je schopen odolat vysokému hydrostatickému tlaku a vykazuje dlouhodobou odolnost betonové struktury. [8]



Tato přísada do čerstvého betonu Xypex Admix se vyrábí ve třech druzích: C-500, C-1000, C-2000. Xypex Admix série C- 500 je pro moderní betony, které obsahují přísady jako popílek a strusku nemá žádný vliv na dobu tuhnutí. Admix C-1000 je pro betony bohaté na portlandský cement, kde je vítána prodloužená doba tuhnutí. C-2000 je pro projekty, kde je vyžadována prodloužená doba tuhnutí, nebo vyšší okolní teploty, případně delší doba dopravy na stavbu. Může být bez problémů kombinován s dalšími přísadami, ale doporučuje se nejdříve provést zkoušky, jak se daná kombinace bude chovat, před samotnou výrobou ve velkém a dodávkou na stavbu. Optimální vodní součinitel je mezi 0,40 a 0,55. Dávkuje se od 2 do 3 % z hmotnosti portlandského cementu. Vykazuje dobré vlastnosti i v samošetřování betonu, kdy zacelí až 0,4mm trhlinky, vzniklé například smrštěním při vysychání. Samozřejmě záleží na kvalitě betonu, efektivním návrhu složení a v neposlední řadě i na profesionalitě realizace. [8], [35]

Xypex Admix můžeme použít kdekoliv přichází voda a beton do kontaktu, čili různé rezervoáry, čističky odpadních vod, tunely, podzemní garáže, apod. Xypex je primárně navržen pro nové konstrukce, ale lze jím ošetřit i stávající, pomocí stříkané vrstvy, nebo nátěru. Efektivita xypexu je dána spoustou parametrů, jako např. tloušťka betonové vrstvy, obsah portlandského cementu, atd. Doporučuje se alespon 5 cm tloušťky a pevnost min 20 N/mm², což reprezentuje alespoň 265 kg portlandského cementu na 1 m³. [8]

Xypex zabraňuje korozi betonářské ocele, jeho účinek je trvalý, protože je obsažen přímo v betonu. Nepůsobí ani žádné rozpínání nebo vnitřní pnutí, jen vyplní póry a dutiny a naopak zlepší mechanické vlastnosti betonu, ve kterém se nachází. Je nezávislý na působení vlhkosti, UV záření, kyslíku nebo teplotě. Když se aplikuje dle specifikace, funguje 100 % od -32°C do +130°C a ani mimo tento rozsah není nepoužitelný, jen je nutno konzultovat dávkování s techniky z Xypexu. Díky uzavření pórů vykazuje ošetřený beton lepší vlastnosti i při rozmrazovacích cyklech. Odolává chemikáliím s pH 3-11 trvale, 2-12 nárazově. Je netoxický a zdraví neškodný. [8]

2.5 Porovnání krystalizačních přísad

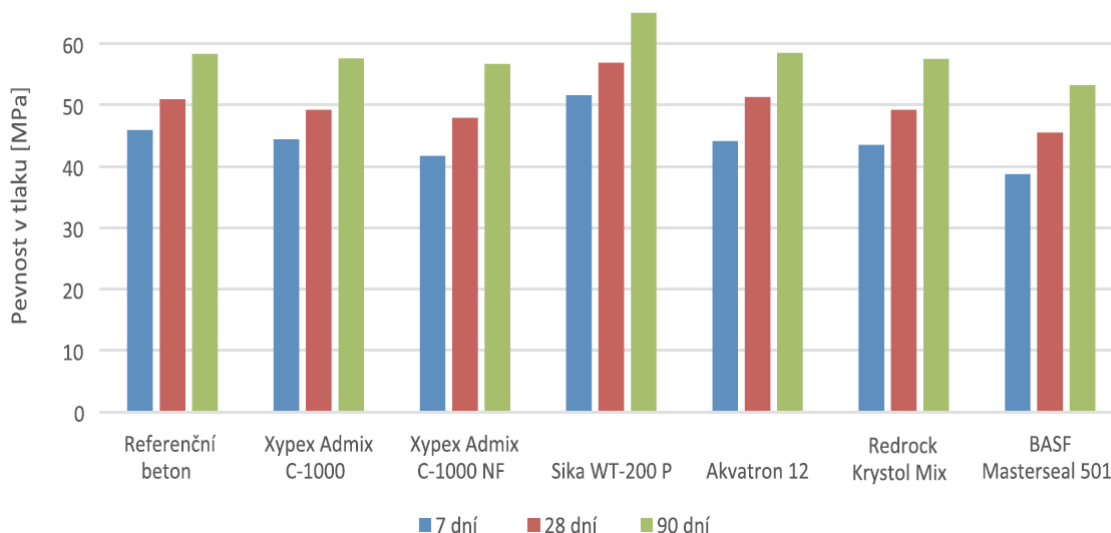
V časopise Beton TKS vydání 2/2015, byl prezentován článek autorů Ing. Michala Kropáčka a Ing. Jiřího Šafraty, který se věnoval praktickému porovnání těchto krystalizačních přísad. V tomto porovnání byl zvolen beton C20/25 XC3, navržen dle ČSN EN 206-1. Dávkování krystalizačních přísad bylo zvoleno vždy v polovině rozmezí, udávaného v technickém listě výrobku.

Tabulka 3: Dávkování jednotlivých krystalizačních přísad.[12]

Krystalizační přísada	Dávkování		
	objemová hmotnost [kg/m ³]	[% obj. hm.]	rozsah dávkování dle technického listu [% obj. hm.]
Akvatron 12	1,96	0,7	0,4 až 1
BASF Masterseal 501	4,9	1,75	1,5 až 2
Redrock Krystol Mix	4,9	1,75	1,5 až 2
Sika WT-200 P	4,2	1,5	1 až 2
Xypex Admix C-1000	5,6	2	1 až 3
Xypex Admix C-1000 NF	2,8	1	0,5 až 1,5

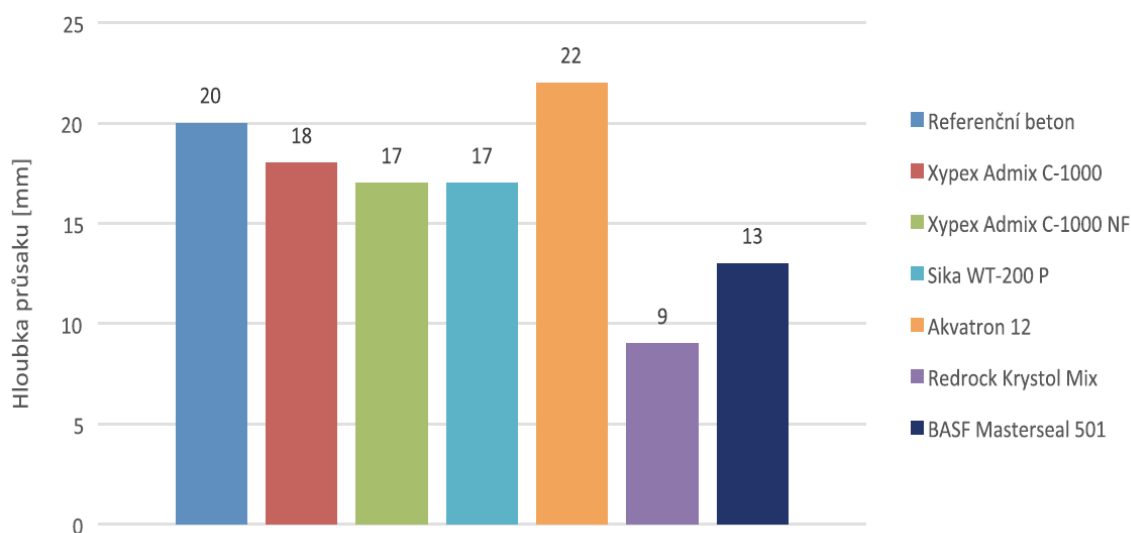
U většiny přísad se dočteme v technických listech o zvýšení pevnosti v tlaku. Z grafu níže vyplývá, že krystalizační přísady nemají na pevnost v tlaku pozitivní vliv, kromě přísady Sika WT-200 P. Pevnosti ostatních přísad jsou téměř stejné, u některých dokonce nižší. To vše za laboratorních podmínek.

Graf 1: Srovnání výsledných pevností betonu v tlaku [12]



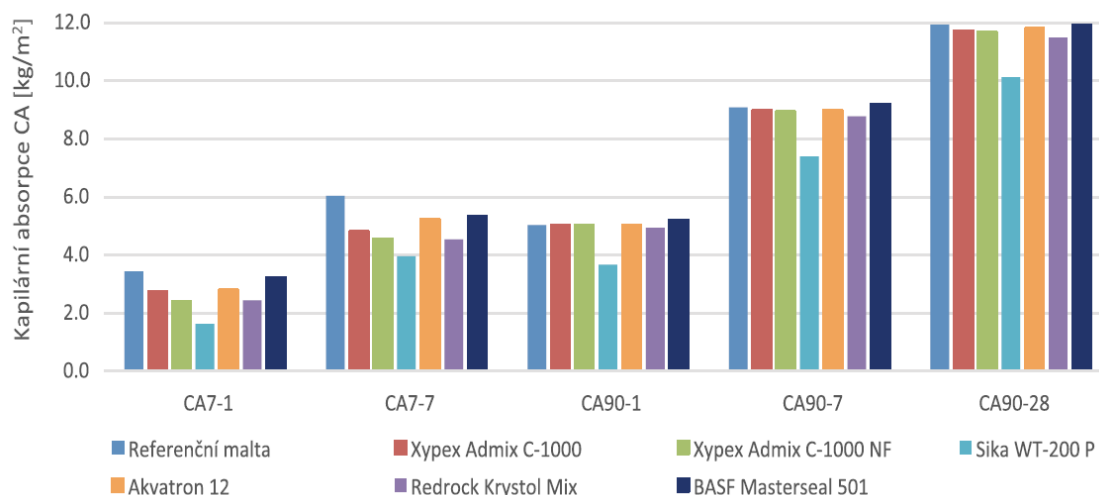
Jeden z hlavních parametrů, kde by krystalizační přísady měly prokázat svoji účinnost je hloubka průsaku tlakovou vodou. Zkoušky byly provedeny dle ČSN EN 12390-8. Z grafu níže je patrné, že nejlepší v tomto ohledu byla přísada Redrock Krystal Mix, která dokázala omezit hloubku průsaku cca na polovinu. Dobře si vedla i přísada BASF Masterseal 501. Ostatní měly jen minimální vliv. [12]

Graf 2: Srovnání výsledné vodotěsnosti betonu [12]



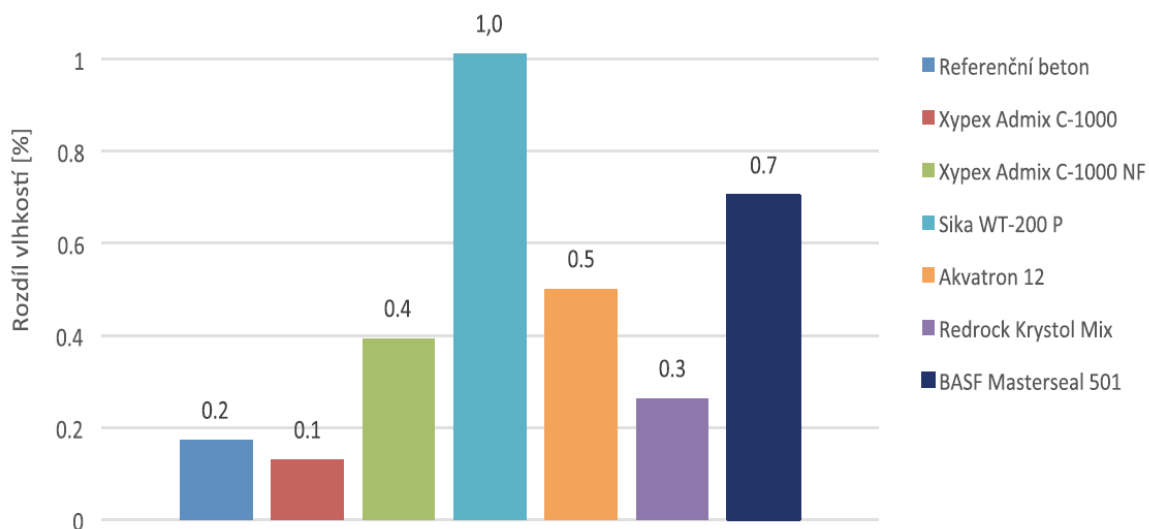
Zkouška kapilární absorpce vychází z normy ČSN EN 480-5. Udává nám kolik vzorky vstřebají vlhkosti v prostředí s relativní vlhkostí vzduchu $65 \pm 5 \%$ a teplotou $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. Výsledná absorpce se vypočítala z rozdílu hmotností trámečků před kontaktem s vodou a jejich absorpcí dělený plochou, která je v kontaktu s vodou. [12]

Graf 3: Kapilární absorpce cementových trámečků [12]



Níže uvedený graf vyobrazuje nasákavost vzorků. Po 28 dnech byla tělesa vytažena z vodního uložení, osušena a zvážena. Poté byly vzorky umístěny do sušárny s teplotou 80 °C, později do ustálené hmotnosti 105 °C. Pak byla opět uložena do vody na 48 hodin. V grafu níže potom nalezneme rozdíl vlhkostí mezi kostkou před vysušením a po vysušení. Znázorňuje nám to „míru utěsnění“ struktury. Z takto získaných hodnot lze konstatovat, že přísady Sika WT-200 P a BASF Masterseal 501 si vedly velmi dobře a významně utěsnily strukturu betonu. Ve zkoušce ale hraje významnou roli velikost pórů a kapilár, proto autoři článku doporučují pozorování rozšířit o rtuťovou porozimetrii. [12]

Graf 4: Poměr vlhkosti kostek před a po vysušení [12]



[12]

III. PRAKTICKÁ ČÁST

3.1 Příprava zkušebních těles

Zkušební tělesa byla připravována v centru AdMaS, kde byla následně i uložena. Pro účely mé práce byla vyrobena zkušební tělesa ve tvaru kvádrů, o rozměrech 40 x 40 x 160 mm, ve trojformách k tomu určených, v celkovém počtu 60 kusů (20 trojforem). Tělesa byla připravena ze dvou odlišných záměsí. První záměs byla pro tělesa srovnávací a tělesa, která byla následně ošetřena nátěrem Xypex Concentrate. Do druhé záměsi byla přidána přísada Xypex Admix. Takto připravená směs byla promíchána vrtačkou s míchacím nástavcem a následně jí byly naplněny trojformy. Ty byly zhutněny na vibračním stole a přikryty fólií proti vysychání. Po odformování, následující den, byla všechna tělesa uložena do vody. Po 18 dnech ve vodním uložení byla na jednu sadu zkušebních těles, k tomu určených, aplikována ošetřovací vrstva Xypex Concentrate. Po 36 dnech byla tělesa uložena do agresivních prostředí. Ta byla v návaznosti na poznatky uvedené v teoretické části zvolena dvě. První je tvořeno síranem sodným (o koncentraci 36 000 mg SO_4^{2-} , tj. 53,27 g/l Na_2SO_4) a druhé chloridem amonným (o koncentraci 3 000 mg NH_4^+ , tj. 8,85 g/l NH_4Cl). Tyto roztoky byly po dvou měsících vyměněny za nové o stejných koncentracích.

Obr. 12: Připravená zkušební tělesa



Obr. 13: Odformování zkušebních těles



Obr. 14: Odformovaná zkušební tělesa



Obr. 15: Uložená zkušební tělesa



3.1.1 Návrh receptury a počtů zkušebních těles

Za účelem porovnatelnosti výsledků, byla zvolena receptura odpovídající svým složením normové maltě na zkoušení pevnosti cementu. Vyrobeny byly tři sady zkušebních těles, s pracovním označením S (srovnávací tělesa), C (tělesa, při výrobě totožná se srovnávacími, po zatvrdnutí dodatečně povrchově ošetřená hmotou Xypex Concentrate) a A (tělesa, s přísadou XYPEX Admix).

Tabulka 4: Receptura zkušebních těles

Složka	S+C [g]	A [g]	Celkem [g]
Cement	5850	3150	9000
Kamenivo	17550	9450	27000
Voda	2925	1575	4500
Admix	0	31,5	31,5
Celkem	26325	14206,5	

Tabulka 5: Počty trojforem

Směs	Počty trojforem			Celkem
	28 dní	90 dní	180 dní	
Srovnávací	1	3	3	7
	NZ	NZ+AG1+AG2	NZ+AG1+AG2	
Admix	1	3	3	7
	NZ	NZ+AG1+AG2	NZ+AG1+AG2	
Concentrate	0	3	3	6
		NZ+AG1+AG2	NZ+AG1+AG2	
				20

Kde NZ je normální zrání, AG1 a AG2 je uloženo v agresivním prostředí

3.1.2 Použité suroviny

Na výrobu zkušebních těles byl použit cement CEM I 42,5 z cementárny Mokrá, kamenivo frakce 0-4 mm ze Žabčic, voda a XYPEX Concentrate, Admix C-1000, což je prášková přísada, která zajišťuje tvorbu těsnících krystalů ve struktuře betonu.

3.2 Zkoušení

Všechny zkoušky byly provedeny v prostorách zkušební laboratoře na ústavu THD, fakulty stavební. Byly provedeny zkoušky pevnosti v ohybu a pevnosti v tlaku po 28 dnech, 90 dnech a 180 dnech.

3.2.1 Metodika a zkušební zařízení

Zkoušky stanovují pevnost v tlaku a pevnost v tahu za ohybu na zkušebních tělesech tvaru trámečku o rozměrech 40 mm x 40 mm x 160 mm. Zkušební tělesa byla nejprve zlomena při stanovení pevnosti v tahu za ohybu. Následně byla každá takto vzniklá polovina zkoušena na pevnost v tlaku.

3.2.1.1 ČSN EN 196-1 Metody zkoušení cementu – Část 1 Stanovení pevnosti

- **Pevnost v tahu za ohybu**

Podstatou zkoušky je určení pevnosti v tahu ohybem zkušebních těles. Ta mohou být zatěžována jedním, nebo dvěma břemeny. Pro účely mé práce byla zkouška provedena se zatěžováním jedním břemenem. Zkušební tělesa byla umístěna na střed v lisu tak, aby byla namáhána kolmo na směr hutnění. Rychlost zatěžování má být od 40 do 60 N/s a výsledná pevnost se získá ze vztahu:

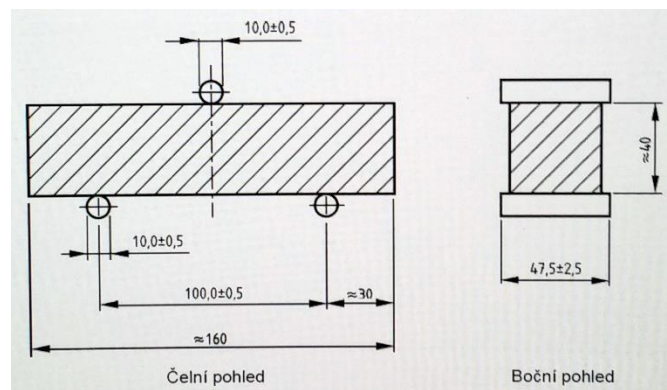
$$f = \frac{3.F.l}{2.b.h^2} \quad [\text{N/mm}^2]$$

kde:

- F... maximální zatížení vynaložené na střed trámečku při zlomení [N]
- l... vzdálenost mezi podporami [mm]
- b... šířka zkušebního tělesa [mm]
- h... výška zkušebního tělesa [mm]

Výsledná hodnota pevnosti v tahu za ohybu se zaokrouhlí na 0,1 N/mm². [17]

Obrázek 16: Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tahu za ohybu [17]



Obrázky 17 a 18: Provádění zkoušky pevnosti v tahu za ohybu



- **Pevnosti v tlaku**

Cílem této zkoušky je stanovení pevnosti v tlaku zkušebních vzorků. Ke zkoušce byly použity vždy obě poloviny vzorků zlomených při předchozí zkoušce. Ty se uloží do aparátu lisu opět kolmo ke směru hutnění. Zatěžování při této zkoušce má růst rychlostí 2200 až 2600 N/s Výsledná pevnost vzorku je potom aritmetickým průměrem pevností jednotlivých polovin, získaných ze vztahu:

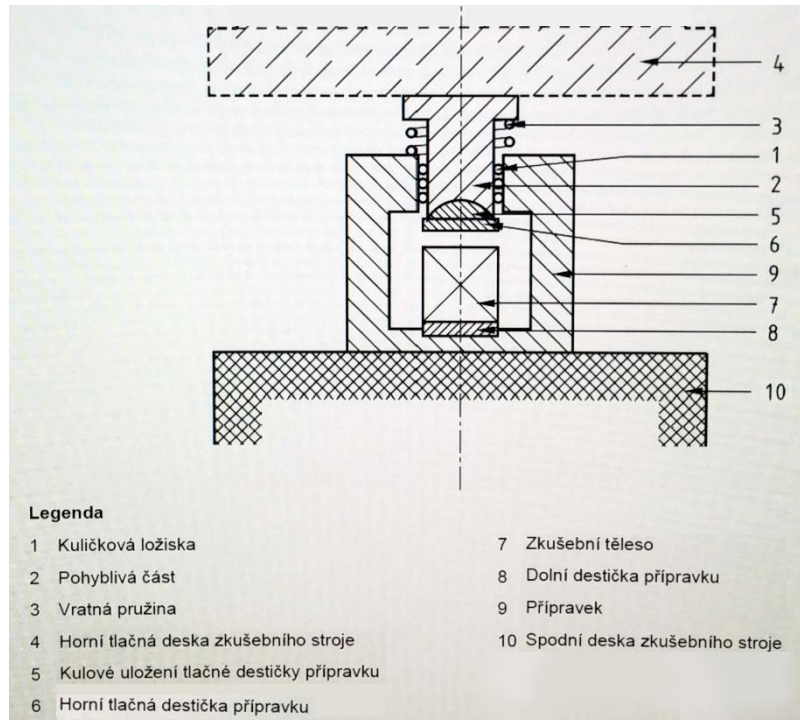
$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

kde:

- F_c ... maximální síla do porušení [N]
- A ... působící plocha [mm²]

Výsledná hodnota pevnosti v tlaku se zaokrouhlí na 0,1 N/mm². [17]

Obrázek 19: Uspořádání zatížení pro stanovení pevnosti v tlaku [17]



Obrázky 20 a 21: Provádění zkoušky pevnosti v tlaku



3.2.1.2 Elektronová mikroskopie

Z každého prostředí byla odložena vždy jedna polovina zkušebního tělesa od každé sady. Vzorek pro studium mikrostruktury vznikl vždy odseknutím tělíska o velikosti asi 1 cm³ z poloviny trámečku.

Studium mikrostruktury bylo prováděno v centru AdMaS, na rastrovacím elektronovém mikroskopu TESCAN MIRA3 XMU. Ten je schopen pracovat jak ve vysokovakuovém, tak i nízkovakuovém módu s možností nastavení tlaku v komoře. Nízkovakuový mód umožňuje pozorování nevodivých preparátů v přirozeném prostředí (tzn. v nepokoveném stavu). Tento mikroskop vytváří proud elektronů pomocí Schottkyho autoemisní katody.

Obrázek 22: Elektronový mikroskop TESCAN MIRA3 řady XM [36]



3.3 Výsledky zkoušek

3.3.1 28 denní pevnosti

Zkušební tělesa na 28 denní zkoušky byla uložena ve vodě.

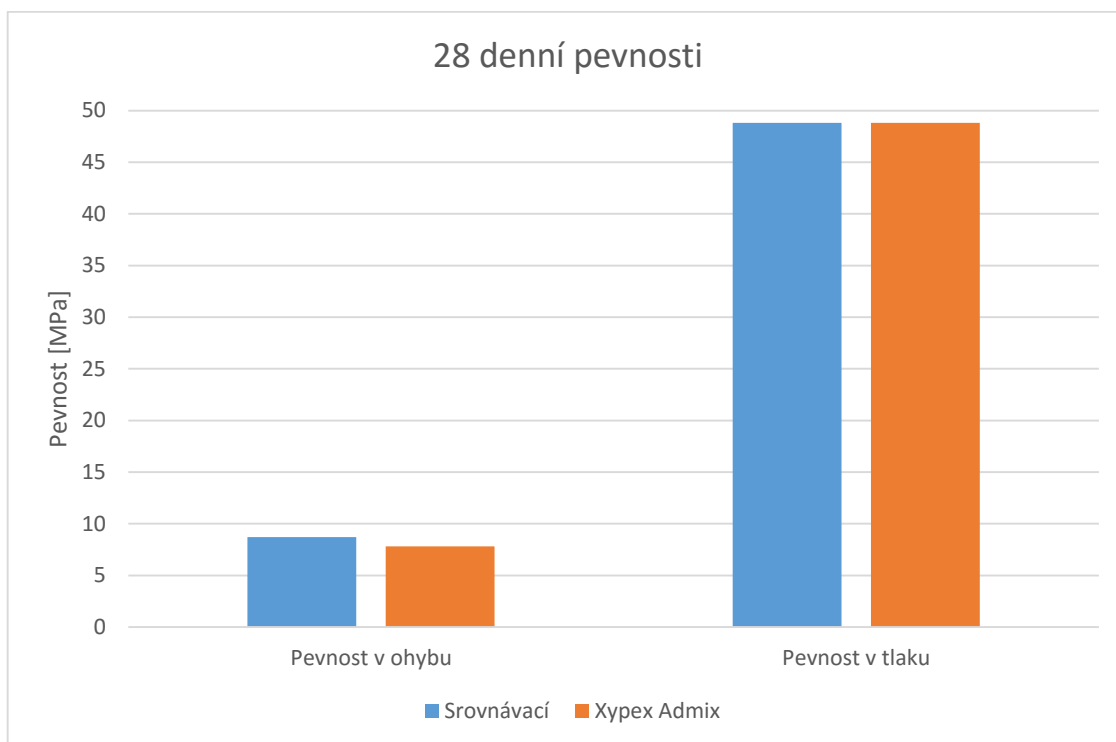
Tabulka 6: Naměřené rozměry a hmotnosti a vypočtená objemová hmotnost

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [kg.m ⁻³]
srovnávací 1	40,15	39,73	159,93	582	2281
srovnávací 2	40,10	40,07	159,43	580	2263
srovnávací 3	40,04	40,62	160,25	578	2220
Průměr					2255
admix 1	40,25	40,43	159,59	576	2217
admix 2	40,48	41,04	159,66	588	2217
admix 3	40,07	40,56	160,28	592	2268
Průměr					2234

Tabulka 7: Naměřené síly a vypočtené 28 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 1	3,60	81	75	8,5	50,6	46,9
srovnávací 2	3,95	81	78	9,2	50,6	48,8
srovnávací 3	3,75	77	76	8,5	48,1	47,5
Průměr				8,7		48,8
admix 1	3,35	77	77	7,6	48,1	48,1
admix 2	3,40	77	78	7,5	48,1	48,8
admix 3	3,70	80	79	8,4	50,0	49,4
Průměr				7,8		48,8

Graf 5: Pevnost v ohybu a tlaku po 28 dnech



3.3.2 90 denní pevnosti

Vodní uložení:

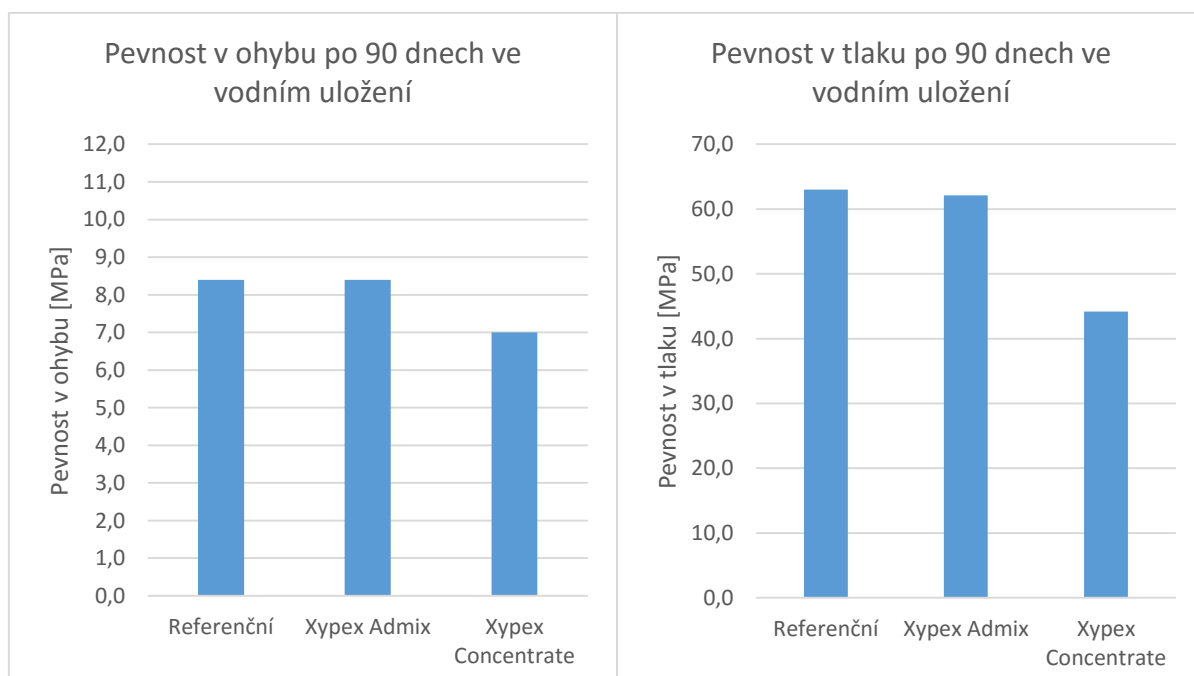
Tabulka 8: Naměřené rozměry a hmotnosti a vypočtená objemová hmotnost

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [kg.m ⁻³]
srovnávací 4	40,1	40,6	159,9	591	2270
srovnávací 5	40,0	40,1	159,9	587	2289
srovnávací 6	40,1	40,5	160,0	581	2236
Průměr					2265
admix 4	40,0	39,9	160,0	571	2236
admix 5	40,0	39,6	159,9	565	2231
admix 6	40,0	39,3	159,7	571	2274
Průměr					2247
concentrate 1	41,6	41,3	161,5	601	2166
concentrate 2	42,1	41,7	161,2	615	2173
concentrate 3	42,1	41,5	161,4	597	2117
Průměr					2152

Tabulka 9: Naměřené síly a vypočtené 90 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 4	3,96	99	101	9,0	61,9	63,1
srovnávací 5	3,34	102	106	7,8	63,8	66,3
srovnávací 6	3,66	100	97	8,3	62,5	60,6
Průměr				8,4		63,0
admix 4	3,50	95	99	8,2	59,4	61,9
admix 5	3,48	99	102	8,3	61,9	63,8
admix 6	3,56	101	100	8,6	63,1	62,5
Průměr				8,4		62,1
concentrate 1	3,48	76	71	7,4	47,5	44,4
concentrate 2	3,27	71	78	6,7	44,4	48,8
concentrate 3	3,41	66	62	7,1	41,3	38,8
Průměr				7,0		44,2

Graf 6 a 7: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 90 dnech ve vodním uložení



Uložení sírany (Na_2SO_4):

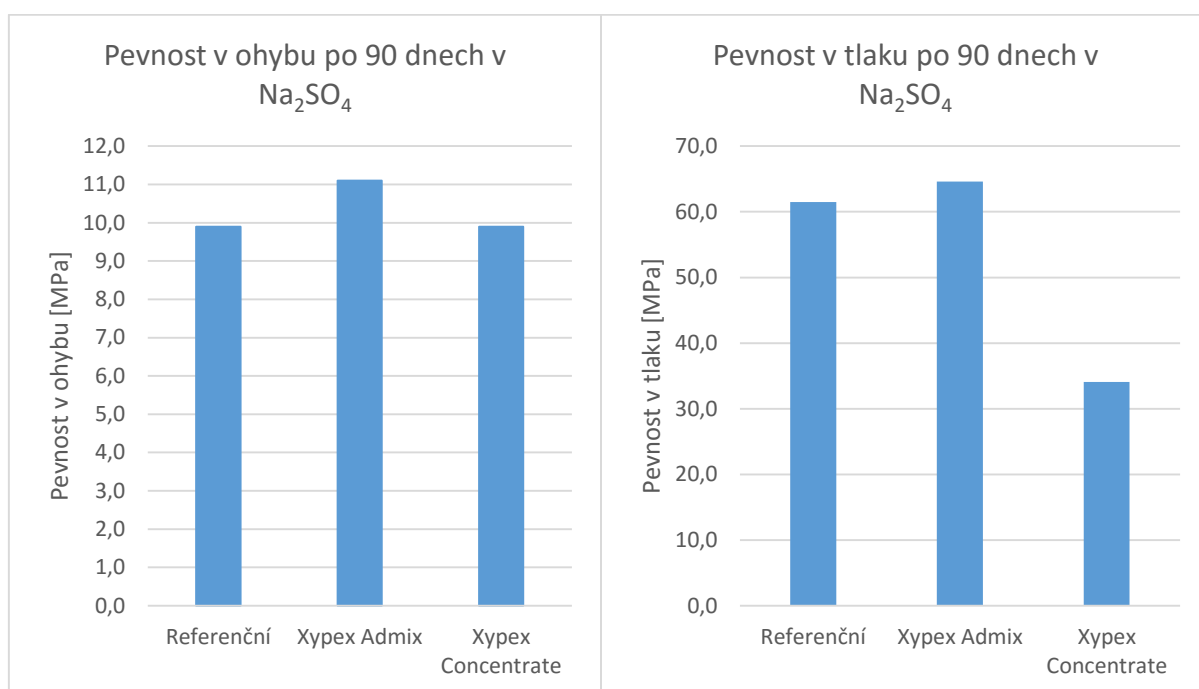
Tabulka 10: Naměřené rozměry a hmotnosti na 90 denní pevnosti

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
srovnávací 7	40,2	40,0	159,5	574	2238
srovnávací 8	40,0	40,0	160,2	583	2275
srovnávací 9	40,1	40,5	159,9	591	2276
Průměr					2263
admix 7	40,1	39,7	160,0	570	2238
admix 8	40,0	39,9	159,6	579	2273
admix 9	40,0	40,2	160,2	586	2275
Průměr					2262
concentrate 4	41,8	41,1	160,7	597	2162
concentrate 5	42,0	42,0	161,1	625	2199
concentrate 6	41,5	42,2	161,6	614	2170
Průměr					2177

Tabulka 11: Naměřené síly a vypočtené 90 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 7	4,18	97	94	9,7	60,6	58,8
srovnávací 8	3,94	104	99	9,2	65,0	61,9
srovnávací 9	4,65	99	97	10,6	61,9	60,6
Průměr				9,9		61,5
admix 7	4,98	103	102	11,8	64,4	63,8
admix 8	4,67	100	101	11,0	62,5	63,1
admix 9	4,58	107	107	10,6	66,9	66,9
Průměr				11,1		64,6
concentrate 4	4,12	57	55	8,8	35,6	34,4
concentrate 5	5,24	49	45	10,6	30,6	28,1
concentrate 6	5,11	64	57	10,4	40,0	35,6
Průměr				9,9		34,1

Graf 8 a 9: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 90 dnech v Na₂SO₄



Uložení dusičnany (NH₄Cl):

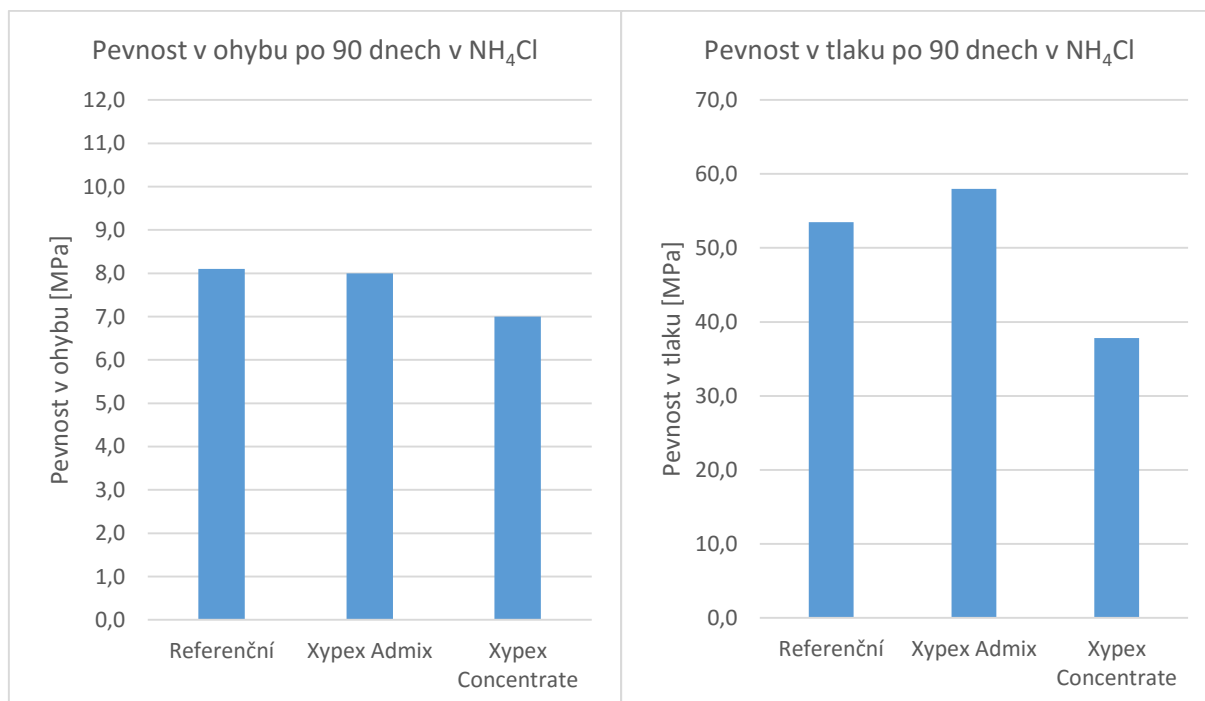
Tabulka 12: Naměřené rozměry a hmotnosti na 90 denní pevnosti

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [kg.m ⁻³]
srovnávací 10	40,1	40,7	160,2	592	2264
srovnávací 11	40,1	40,0	160,0	579	2256
srovnávací 12	40,2	39,9	160,0	578	2252
Průměr					2258
admix 10	40,2	40,6	159,9	589	2257
admix 11	40,1	39,6	159,4	560	2212
admix 12	40,1	40,8	160,5	592	2254
Průměr					2241
concentrate 7	41,9	41,6	161,3	597	2123
concentrate 8	41,8	41,0	161,1	591	2141
concentrate 9	40,5	41,7	161,6	581	2129
Průměr					2131

Tabulka 13: Naměřené síly a vypočtené 90 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 10	3,27	93	92	7,4	58,1	57,5
srovnávací 11	3,52	73	85	8,2	45,6	53,1
srovnávací 12	3,77	82	89	8,8	51,3	55,6
Průměr				8,1		53,5
admix 10	3,62	92	93	8,2	57,5	58,1
admix 11	3,50	90	95	8,3	56,3	59,4
admix 12	3,34	93	94	7,5	58,1	58,8
Průměr				8,0		58,0
concentrate 7	3,22	60	56	6,7	37,5	35,0
concentrate 8	3,43	55	61	7,3	34,4	38,1
concentrate 9	3,35	69	62	7,1	43,1	38,8
Průměr				7,0		37,8

Graf 10 a 11: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 90 dnech v NH₄Cl



3.3.3 180 denní pevnosti

Vodní uložení:

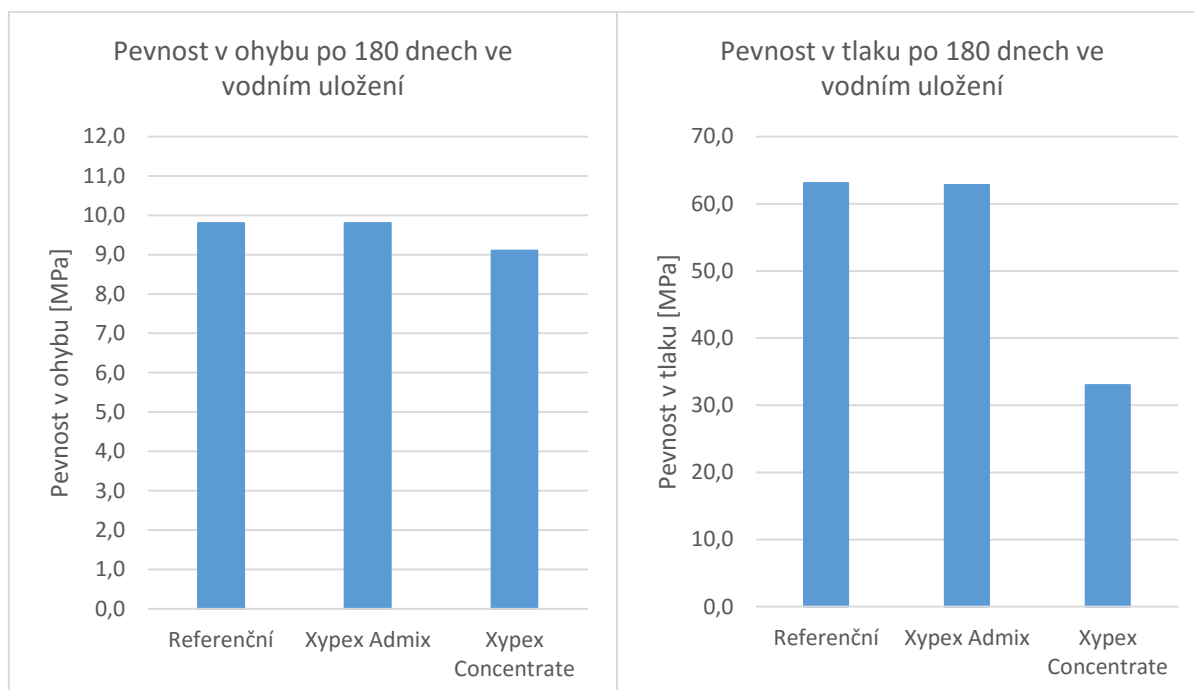
Tabulka 14: Naměřené rozměry a hmotnosti na 180 denní pevnosti

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [kg.m ⁻³]
srovnávací 13	40,1	40,9	159,9	598	2280
srovnávací 14	40,1	40,2	160,2	578	2238
srovnávací 15	40,2	41,0	160,3	592	2241
Průměr					2253
admix 13	40,0	39,5	159,9	570	2256
admix 14	40,2	40,7	159,6	586	2244
admix 15	40,2	40,1	159,9	578	2242
Průměr					2248
concentrate 10	41,5	41,9	161,0	606	2165
concentrate 11	40,7	41,3	162,5	588	2153
concentrate 12	42,5	42,0	160,7	610	2127
Průměr					2148

Tabulka 15: Naměřené síly a vypočtené 180 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 13	4,60	-	109	10,3	-	68,1
srovnávací 14	4,10	93	103	9,5	58,1	64,4
srovnávací 15	4,35	101	99	9,7	63,1	61,9
Průměr				9,8		63,1
admix 13	4,10	-	98	9,9	-	61,3
admix 14	4,25	99	96	9,6	61,9	60,0
admix 15	4,30	102	107	10,0	63,8	66,9
Průměr				9,8		62,8
concentrate 10	4,50	-	64	9,3	-	40,0
concentrate 11	4,05	51	55	8,8	31,9	34,4
concentrate 12	4,60	46	48	9,2	28,8	30,0
Průměr				9,1		33,0

Graf 12 a 13: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 180 dnech ve vodním uložení



Uložení sírany (Na_2SO_4):

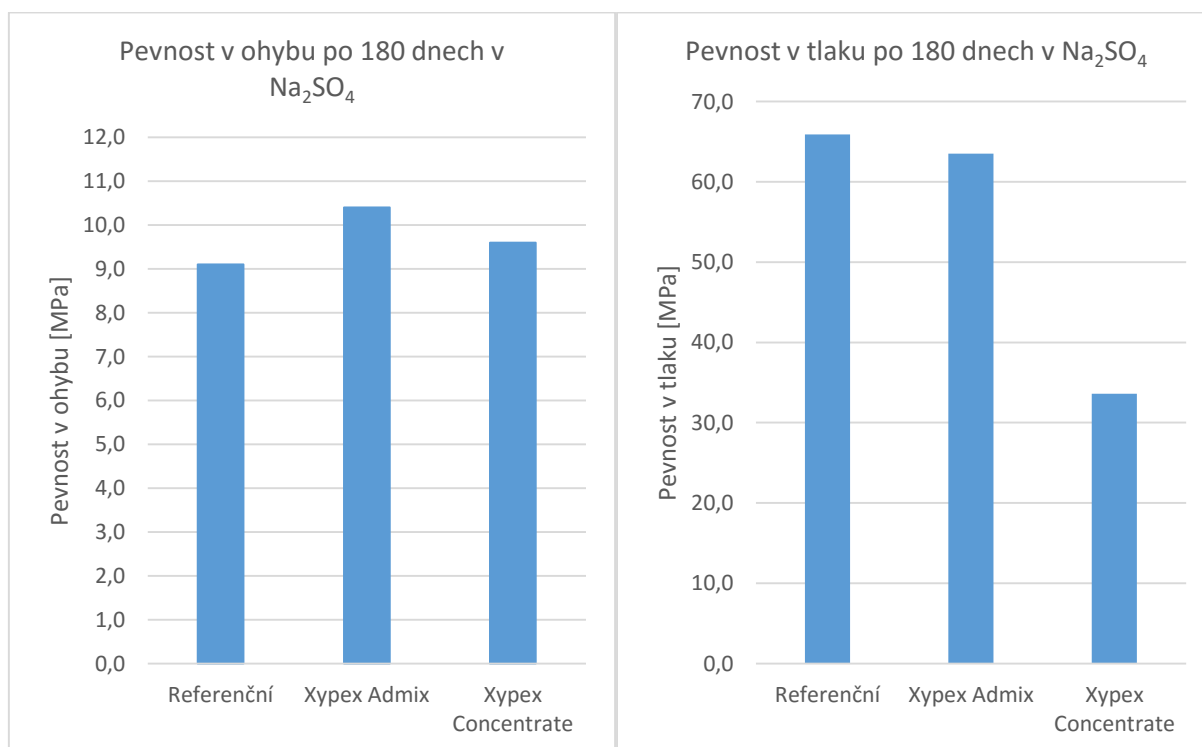
Tabulka 16: Naměřené rozměry a hmotnosti na 180 denní pevnosti

	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
srovnávací 16	40,5	40,7	159,9	588	2231
srovnávací 17	40,6	41,4	160,6	602	2230
srovnávací 18	40,4	40,4	160,7	596	2272
Průměr					2244
admix 16	40,4	39,7	160,9	568	2201
admix 17	40,5	39,8	160,5	570	2203
admix 18	40,2	40,0	160,5	576	2232
Průměr					2212
concentrate 13	41,7	41,9	162,0	612	2162
concentrate 14	41,4	42,0	161,7	608	2162
concentrate 15	41,7	41,9	161,8	608	2151
Průměr					2158

Tabulka 17: Naměřené síly a vypočtené 180 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 16	4,25	-	105	9,5	-	65,6
srovnávací 17	3,50	104	109	7,5	65,0	68,1
srovnávací 18	4,50	99	110	10,2	61,9	68,8
Průměr				9,1		65,9
admix 16	4,20	-	97	9,9	-	60,6
admix 17	4,65	98	101	10,9	61,3	63,1
admix 18	4,50	108	104	10,5	67,5	65,0
Průměr				10,4		63,5
concentrate 13	4,85	-	56	9,9	-	35,0
concentrate 14	4,50	51	52	9,2	31,9	32,5
concentrate 15	4,75	61	49	9,7	38,1	30,6
Průměr				9,6		33,6

Graf 14 a 15: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 180 dnech v Na_2SO_4



Obrázek 23: Poskození zkušebníko tělesa, opatřeného nátěrem Xypex Concentrate



Uložení dusičnany (NH_4Cl):

Tabulka 18: Naměřené rozměry a hmotnosti na 180 denní pevnosti

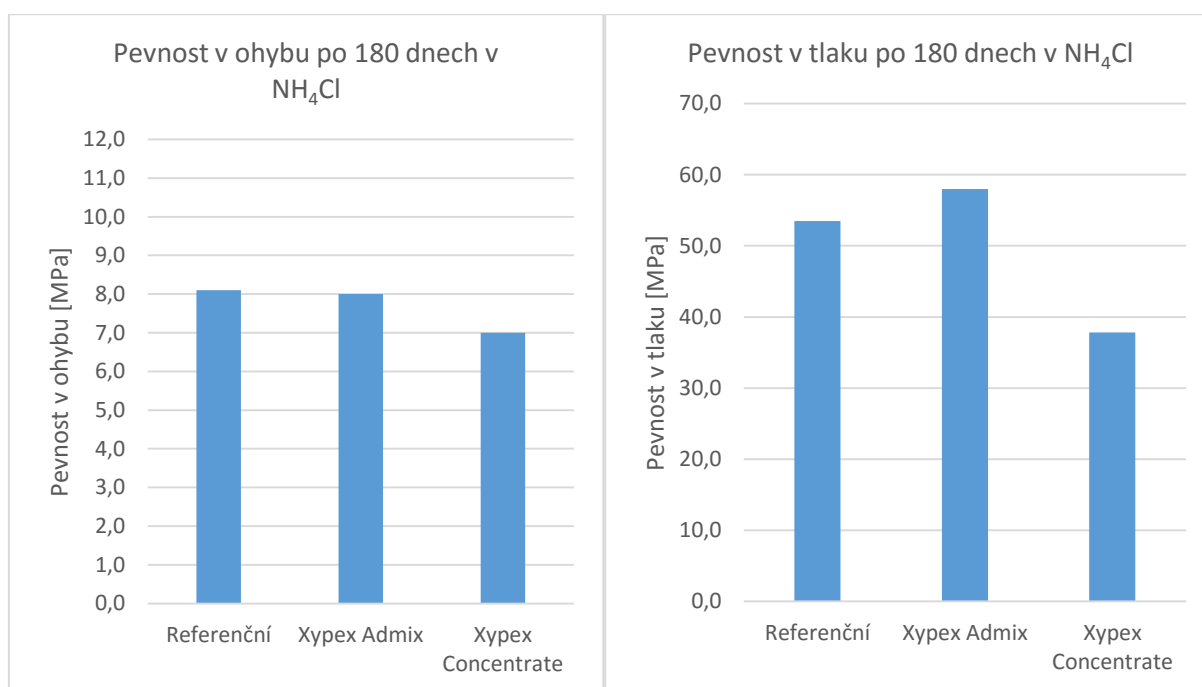
	b [mm]	h [mm]	l [mm]	m [g]	OH [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]
srovnávací 19	40,0	39,5	160,0	560	2215
srovnávací 20	40,1	40,1	160,0	572	2223
srovnávací 21	40,0	40,4	160,0	578	2235
Průměr					2225
admix 19	40,1	40,2	159,6	564	2192
admix 20	40,1	40,0	160,0	568	2213
admix 21	40,4	41,3	160,2	590	2207
Průměr					2204
concentrate 16	42,1	41,5	161,5	594	2105
concentrate 17	41,4	42,3	161,9	600	2116
concentrate 18	42,3	41,3	160,8	582	2072
Průměr					2098

Tabulka 19: Naměřené síly a vypočtené 180 denní pevnosti

	Síly [kN]			Pevnosti [MPa]		
	ohyb	tlak 1	tlak 2	v ohybu	v tlaku 1	v tlaku 2
srovnávací 19	3,35	-	80	8,1	-	50,0
srovnávací 20	3,40	81	86	7,9	50,6	53,8
srovnávací 21	3,40	90	82	7,8	56,3	51,3
Průměr				7,9		52,4

admix 19	3,35	-	84	7,8	-	52,5
admix 20	2,85	80	81	6,7	50,0	50,6
admix 21	3,40	86	82	7,4	53,8	51,3
Průměr				7,3		51,6
concentrate 16	3,20	-	61	6,6	-	38,1
concentrate 17	3,10	66	69	6,3	41,3	43,1
concentrate 18	3,10	63	62	6,4	39,4	38,8
Průměr				6,4		40,1

Graf 16 a 17: Pevnost v ohybu a pevnost v tlaku po 180 dnech v NH_4Cl

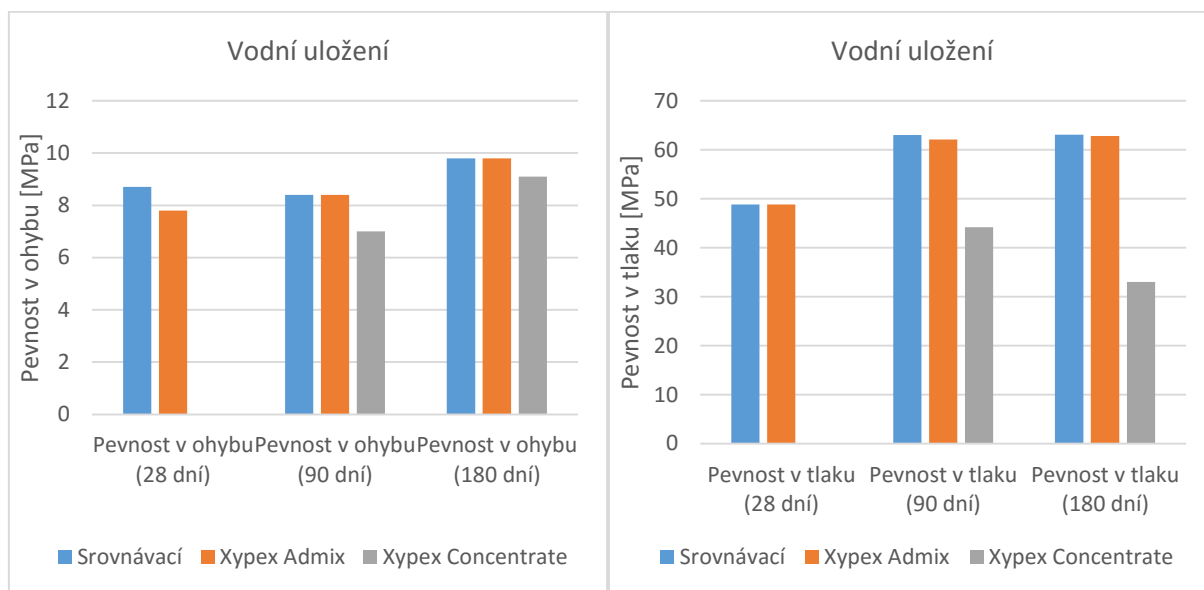


3.3.4 Souhrn výsledků:

Tabulka 20: Vývoj sledovaných vlastností ve vodním uložení

	OH (28) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v ohybu (28) [MPa]	Pevnost v tlaku (28) [MPa]	OH (90) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v ohybu (90) [MPa]	Pevnost v tlaku (90) [MPa]	OH (180) [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost v ohybu (180) [MPa]	Pevnost v tlaku (180) [MPa]
srovnávací	2255	8,7	48,8	2265	8,4	63	2253	9,8	63,1
admix	2234	7,8	48,8	2247	8,4	62,1	2248	9,8	62,8
concentrate	-	-	-	2152	7,0	44,2	2148	9,1	33,0

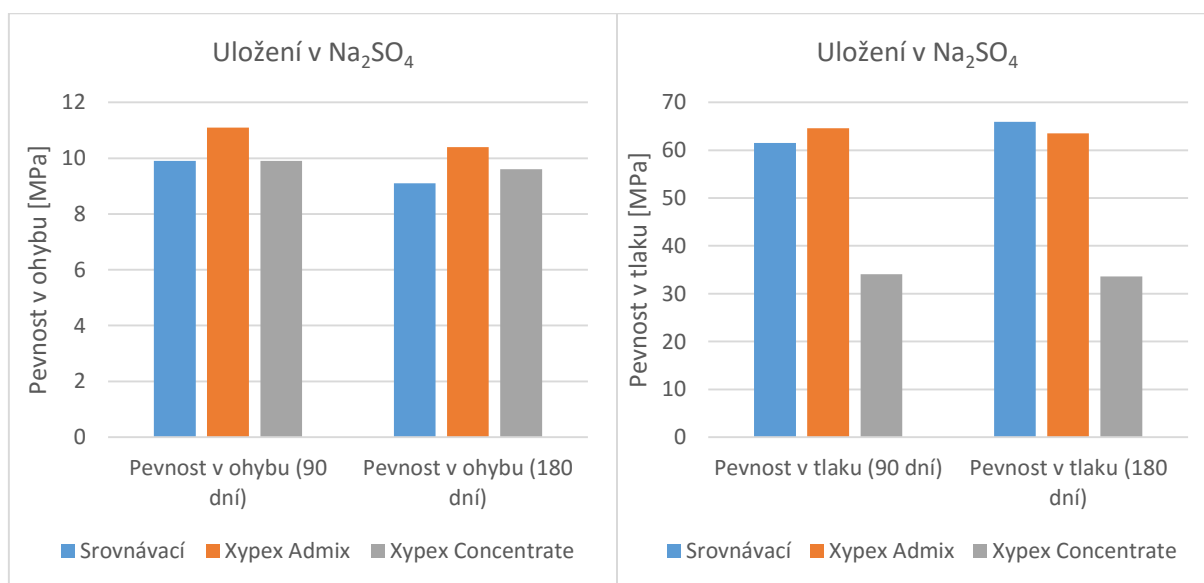
Graf 18 a 19: Vývoj sledovaných vlastností ve vodním uložení



Tabulka 21: Vývoj sledovaných vlastností v síranu sodném

	OH (28) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (28) [MPa]	Pevnost v tlaku (28) [MPa]	OH (90) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (90) [MPa]	Pevnost v tlaku (90) [MPa]	OH (180) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (180) [MPa]	Pevnost v tlaku (180) [MPa]
srovnávací	-	-	-	2263	9,9	61,5	2244	9,1	65,9
admix	-	-	-	2262	11,1	64,6	2212	10,4	63,5
concentrate	-	-	-	2177	9,9	34,1	2158	9,6	33,6

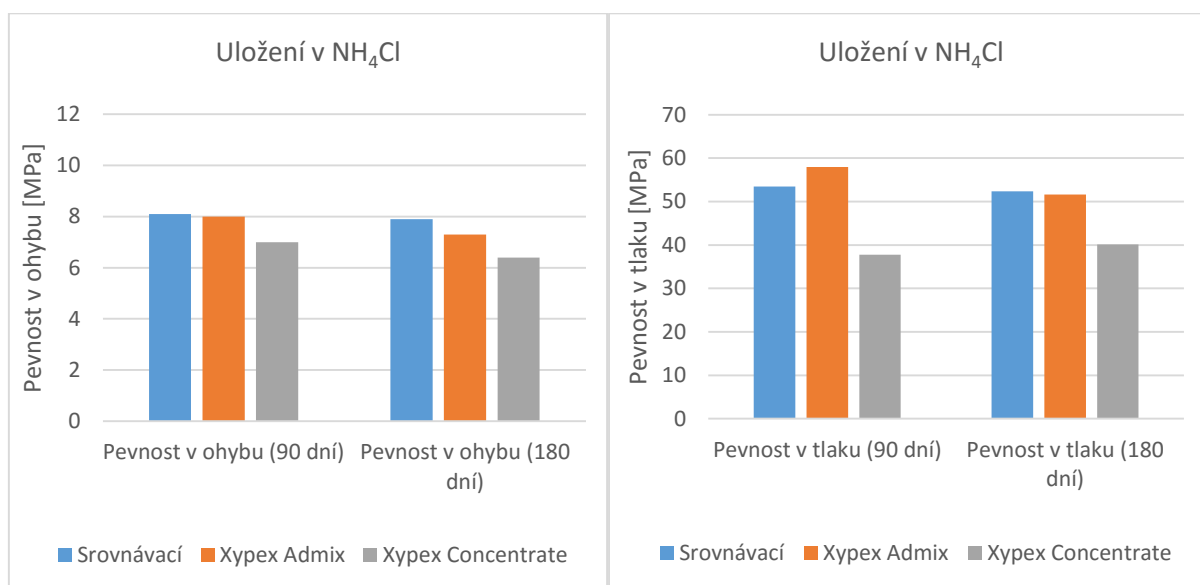
Graf 20 a 21: Vývoj sledovaných vlastností v síranu sodném



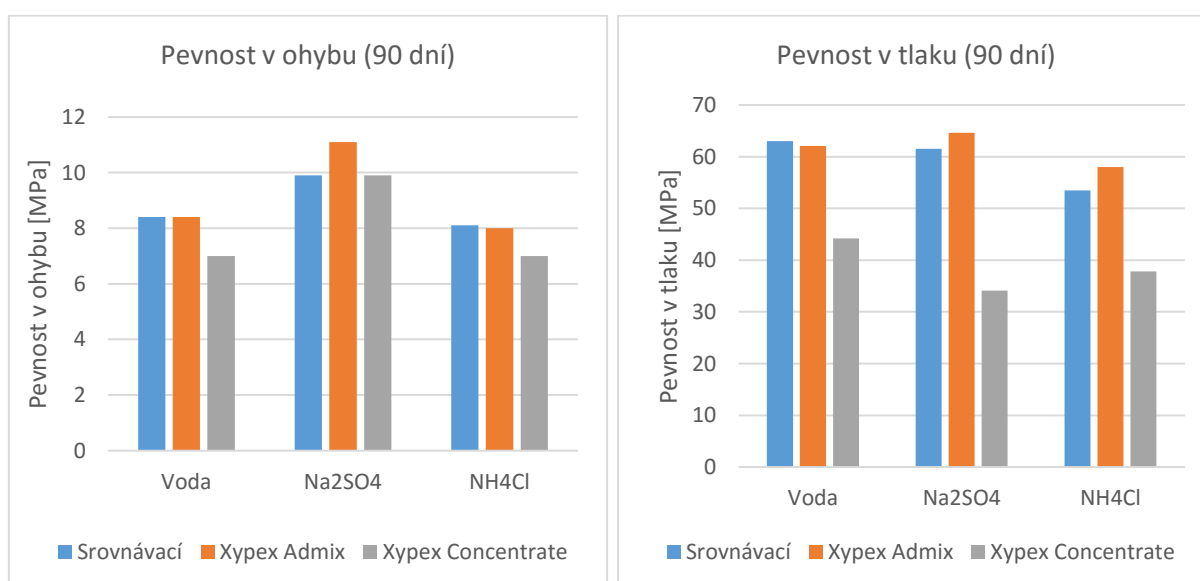
Tabulka 22: Vývoj sledovaných vlastností v chloridu amonném

	OH (28) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (28) [MPa]	Pevnost v tlaku (28) [MPa]	OH (90) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (90) [MPa]	Pevnost v tlaku (90) [MPa]	OH (180) [kg.m ⁻³]	Pevnost v ohybu (180) [MPa]	Pevnost v tlaku (180) [MPa]
srovnávací	-	-	-	2258	8,1	53,5	2225	7,9	52,4
admix	-	-	-	2241	8,0	58,0	2204	7,3	51,6
concentrate	-	-	-	2131	7,0	37,8	2098	6,4	40,1

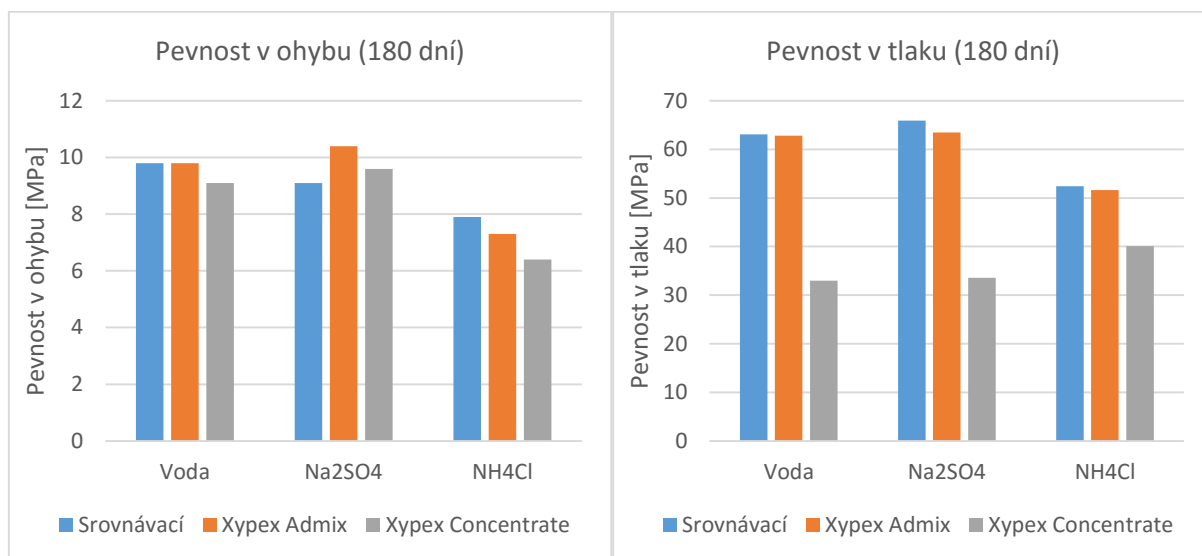
Graf 22 a 23: Vývoj sledovaných vlastností v chloridu amonném



Graf 24 a 25: Přehled pevností v jednotlivých prostředích po 90 dnech



Graf 26 a 27: Přehled pevností v jednotlivých prostředích po 180 dnech



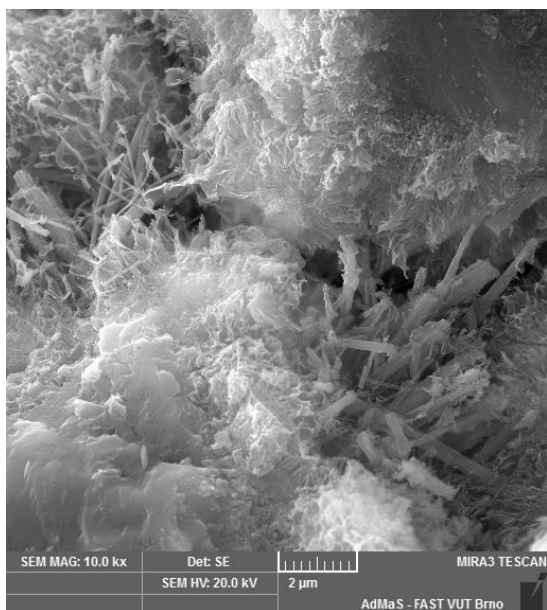
3.4 Mikrostruktura zkušebních těles

Posouzení mikrostruktury zkušebních těles bylo provedeno za účelem prokázání novotvarů, vzniklých působením přísady a nátěru firmy Xypex. Po prostudování materiálů je očekáván výskyt krystalů vzniklých při reakci s vedlejšími produkty hydratace v betonu. Tyto nerozpustné krystaly mají utěsnit póry a kapiláry proti vodě a chemickým roztokům. Krystalické formace Xypex vyrůstají z oblasti částic $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a prorůstají C-S-H gelem. To dokládají i prezentační fotografie z elektronového mikroskopu dostupné na stránkách www.xypex.com.

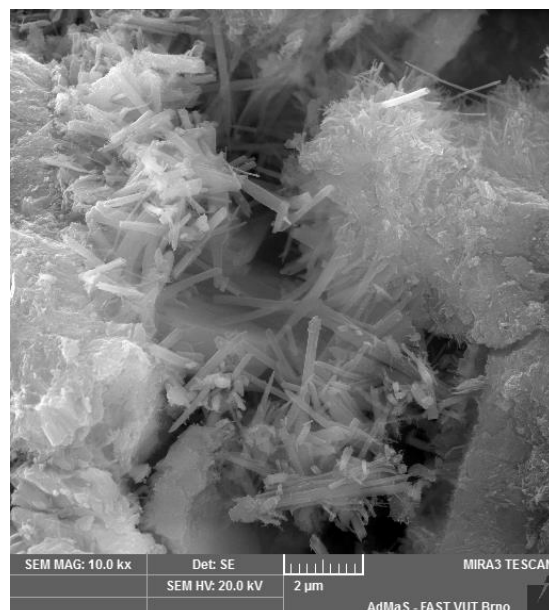
Vzorky, jejichž mikrostruktura byla zkoumána, byly vybrány po zkoušce pevnosti v ohybu. Vybrána byla vždy jedna polovina vzorku od každého druhu a z každého prostředí. Pomocí fotografií z elektronového mikroskopu byla prokázána přítomnost krystalických novotvarů Xypex.

Vzorky uložené ve **vodě** vykazují přítomnost tyčinkovitých krystalických novotvarů. Vzorek s nátěrem Concentrate má tyto novotvary tenší a nepravidelněji rozmístěné, než vzorek s přísadou Admix.

Obrázek 24: Snímek vzorku s přísadou Admix stáří 180 dnů (vodní uložení)

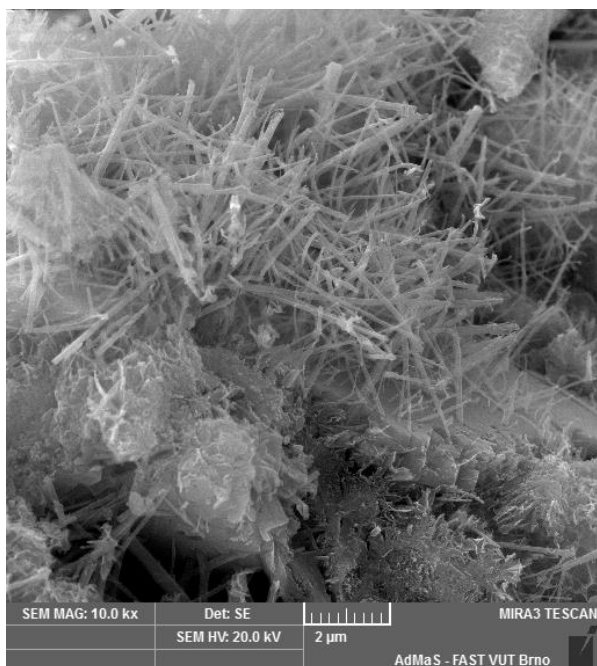


Obrázek 25: Snímek vzorku s nátěrem Concentrate stáří 180 dnů (vodní uložení)

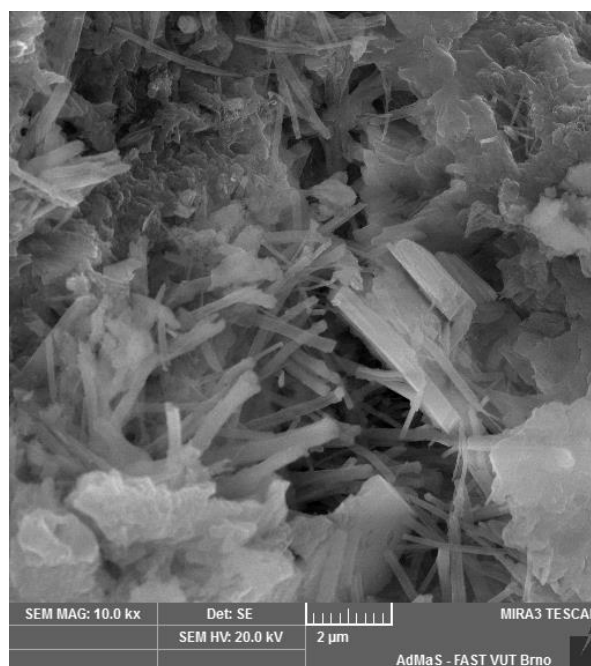


U vzorků vystavených působení **chloridu amonného** je po 90 dnech potvrzena přítomnost novotvarů Xypex. To jak u vzorku s přísadou Xypex Admix, tak i s nátěrem Xypex Concentrate. U vzorku s přísadou Admix je četnost těchto novotvarů větší než u vzorku s nátěrem Concentrate. U vzorků stáří 90 dnů je však hustota nových krystalů nepatrně větší než u vzorků stáří 180 dnů, což je patrné u snímku vzorku s Admixem.

Obrázek 26: Snímek vzorku s přísadou Admix stáří 90 dnů (uložení NH_4Cl)

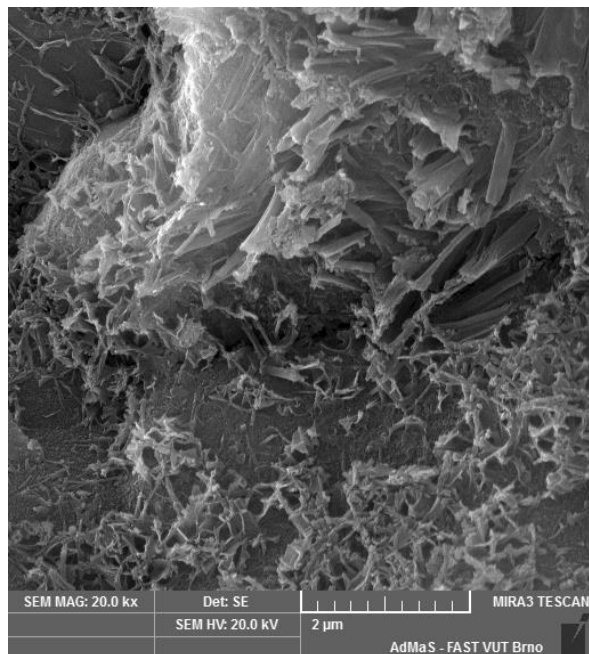


Obrázek 27: Snímek vzorku s nátěrem Concentrate stáří 90 dnů (uložení NH_4Cl)

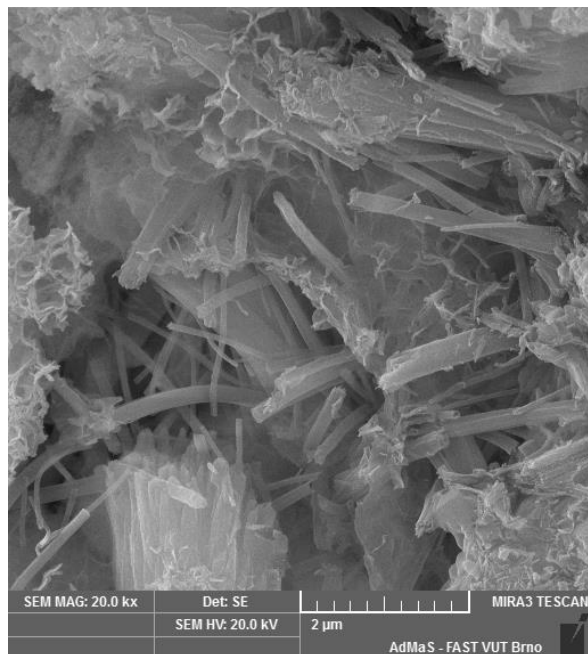


U vzorků uložených v **síranu sodném** je ve srovnání s ostatními prostředími četnost krystalů menší.

Obrázek 28: Snímek vzorku s přísadou Admix stáří 90 dnů (uložení Na_2SO_4)



Obrázek 29: Snímek vzorku s nátěrem Concentrate stáří 90 dnů (uložení Na_2SO_4)



4 Závěr:

V bakalářské práci jsem se zabýval vlivem sekundární krystalizace na odolnost, respektive mechanické vlastnosti cementových kompozitů vystavených agresivnímu prostředí. V teoretické části byla popsána různá prostředí, způsobující korozi betonu a dále byl proveden průzkum trhu s krystalizačními přísadami, jejich popis a vzájemné porovnání. Z průzkumu krystalizačních přísad různých výrobců jsem vyhodnotil jako nejvšestrannější přísadu Sika WT-200 P. Ve většině zkoušek, popsanych v dostupných zdrojích, měla velmi dobré výsledky. Jako jediná měla pozitivní vliv na pevnost betonu v tlaku, nepatrně snížila hloubku průsaku tlakovou vodou (podobně jako přísady Xypex) a velmi dobře se projevila i ve zkoušce nasákavosti, i když tady bylo doporučováno provést ještě rtuťovou porozimetrii. Teprve potom by se dalo s jistotou říci, nakolik tato přísada utěsnila pórovou strukturu. Ostatní mají dle použitých zdrojů na cementové kompozity vliv poměrně nízký.

V rámci praktické části byla připravena zkušební tělesa. Konkrétně tělesa srovnávací (to je bez jakéhokoli ošetření), tělesa s obsahem krystalizační přísady a tělesa opatřená nátěrem s krystalizační složkou. Přitom v návaznosti na teoretickou část byla použita jedna ze dvou přísad, která dle rešerší vykazuje výraznější vliv na strukturu cementové matrice, a to Xypex. Zkušební tělesa byla exponována v agresivních prostředích. Ta zastupoval chlorid amonný a síran sodný. Na zkušebních tělesech byly provedeny základní fyzikálně – mechanické zkoušky a studium mikrostruktury prostřednictvím elektronového mikroskopu. Z výsledků lze konstatovat, že krystalizační přísada Xypex Admix mírně přispěla ke zlepšení odolnosti vůči vybraným agresivním prostředím, což je patrné z provedených mechanických zkoušek. Potvrzuje to i elektronová mikroskopie, prokazující výskyt produktů sekundární krystalizace. Dá se ale předpokládat, že z dlouhodobého hlediska by byl přínos přísady Xypex Admix znatelnější, což ale nelze prokázat s ohledem na krátkou dobu zpracování bakalářské práce. Krystalizační nátěr Xypex Concentrate se projevilo negativně. V rámci zkoušek bylo dosaženo snížení pevností ve všech prostředích, v němž byla tělesa uložena. Elektronovým mikroskopem byl prokázán výrazně nižší výskyt produktů sekundární krystalizace.

Zdroje a související literatura:

- [1] HELA, R. *Technologie betonu*, Modul M01, BJ04 – Technologie Betonu I, Brno, 2005.
- [2] PAZDERKA, J., BURGETOVÁ, E., *Krystalizační hydroizolace*, Stavitel, ISSN 1210-4825, č. 6,s. 28-30, 2008.
- [3] PAZDERKA, J., *Účinnost sanačních postupů založených na krystalizačních materiálech*, Beton TKS, ISSN 1213-3116, č.2, s. 16-19, 2009.
- [4] DOHNÁLEK, P. *Vývoj bariérových kapalinotěsných a plynotěsných povrchových úprav s využitím odpadních látek*, doktorská dizertační práce, Brno 2010, 188s.
- [5] Kamenivo v betonu, [online]. [cit. 2016-03-31]. Dostupné z: <<http://www.mujsbeton.cz/kamenivo-v-betonu>>
- [6] JAMBOR, V. *Asfaltové pásy*, seminární práce do BJ13 – Speciální izolace, 2014.
- [7] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. *Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití*. Český normalizační institut, 2012. Třídící znak ČSN EN 197-1 .
- [8] Xypex Chemical Corporation, *Technology question*, Specification and application manual, Richmond, Kanada, 2001.
- [9] TRINDER, P., CHALMERS, C., *Resistance of concrete to harsh environments ammonium sulphate*, Xypex Australia, 1999.
- [10] BYDŽOVSKÝ, J., NOVÁK, P., *Maltoviny – laboratoře*, Modul 01, BJ52 – Maltoviny – laboratoře, 2006.
- [11] DEN BRAVEN, *Technický list 81.40 Asfaltová izolační stěrka HYDRO BLOK B400*.
- [12] KROPÁČEK, M., ŠAFRATA, J., *Vliv sekundární krystalizace na vlastnosti betonu*, Beton TKS, ISSN 1213-3116, č. 2, s. 52-54, 2015.
- [13] ROVNANÍKOVÁ, P.,ROVNANÍK, P., KŘÍSTEK, R., *Stavební chemie*, Modul 3 – Degradace stavebních materiálů a chemie kovů (2004).
- [14] DROCHYTKA, R., *Trvanlivost stavebních materiálů*.Vyd. 1. Brno: VUT (2007).
- [15] MATOUŠEK, M., DROCHYTKA, R., *Atmosférická koroze betonu*. Vyd. 1. Praha: IKAS, 1998, ISBN 80-902-5580-9.

[16] KOLÁŘ, K., REITERMAN, P., *Betonujeme svépomocí*, Praha 2010, ISBN 978-80-247-3248-0.

[17] ČESKÁ TECHNICKÁ NORMA. *Metody zkoušení cementu – Část 1: Stanovení pevnosti*. Český normalizační institut, 2005. Třídící znak ČSN EN 196-1.

[19] PAZDERKA, J., *Analýza spolehlivosti krystalizačních hydroizolací a jejich uplatnění v oblasti pozemních staveb*, disertační práce, ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Katedra konstrukcí pozemních staveb, Praha, 2008.

[20] PAZDERKA, J., *Principy použití krystalizačních hydroizolací*. [Online] <http://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/materialy-a-vyrobky/betonove-vyrobky/principy-pouziti-krystalizacnich-hydroizolaci-161.html>

[21] OIKAWA, R., FUZURUMI, M., FUJIWARA, C., ABE, M., WAKUISHI, K., *Chemical durability of cement crystal increasing agent applied concrete*, technická zpráva, North-East District Committee of Civil Engineering Society of Japan, Japonsko, 1996.

[22] DOBRÝ, O., PALEK, L., *Koroze betonu ve stavební praxi*, Praha, 1988.

[23] Obrázek akvatron 12 [online] dostupný

z: <http://www.mcprofi.cz/fotky_akvatron/akvatron12.jpg>

[24] Obrázek BASF Masterseal 501 [online] dostupný

z: <http://images.kz.prom.st/4056488_w200_h200_masterseal501.jpg>

[25] Obrázek Redrock Krystol Mix [online] dostupný

z: <http://www.redrock-cz.com/katalog/img/p/1/9/4/194-thickbox_default.jpg>

[26] Obrázek Sika WT-200 P [online] dostupný

z: <<http://www.guidamaterialiedili.it/wp-content/uploads/2015/12/SikaWT200P.jpg>>

[27] Obrázek Xypex Admix [online] dostupný

z: <[http://www.xypex.com/images/products---pails/admix-\(big\).jpg?sfvrsn=2](http://www.xypex.com/images/products---pails/admix-(big).jpg?sfvrsn=2)>

[28] Klečka, T., a kolektiv, *Hodnocení hmoty Xypex Concentrate proti tlakové vodě*, Kloknerův ústav ČVUT, Praha, 1994.

[29] Klečka, T., a kolektiv, *Hodnocení pórovitosti betonu opatřeného hmotami Xypex*, Kloknerův ústav ČVUT, Praha, 1994.

[30] Xypex Chemical Corporation, *Concrete Waterproofing By Crystallization*,

Specification and application manual, Richmond, Kanada, 2001.

[31] Akvatron 12 – Hydroizolační krystalizační hmota – koncentrát, technický list výrobku.

[32] BASF Construction Chemicals Belgium N. V., Masterseal 501, technický list výrobku.

[33] Redrock Construction s.r.o., Krystal Mix, technický list výrobku.

[34] Sika CZ s.r.o., Sika WT-200 P, technický list výrobku, 2013.

[35] Xypex Chemical Corporation, Xypex Admix C-1000, technický list výrobku.

[36] Obrázek TESCAN MIRA3 XM [online] dostupný z:

<http://www.tescan.com/sites/default/files/styles/colorbox_img/public/img/content/products/product/mira3xm-02.jpg?itok=JdXhNIHA>